

"Research Paper"

Evaluation of Agronomical traits and Drought Tolerance Indices in Some Corn (*Zea mays* L.) Hybrids under Water Deficit Stress

Monireh Shahimoghaddam¹, Ali Asghari¹, Sajjad Moharramnejad²
and Nahid Hosseinzadeh Gharajeh³

1- Department of Genetic and Plant Production, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

2- Crop and Horticultural Science Research Department, Ardabil Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Moghan, Iran, (Corresponding author: s.moharramnejad@areeo.ac.ir)

3- Department of Plant Breeding and Biotechnology, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran
Received: 15, May, 2023 Accepted: 4, October 2023

Extended Abstract

Introduction and Objective: Corn is an important crop that is cultivated in many parts of the world. One of the major factors limiting the plant growth is lack of water, which reduces plant growth and survival in arid and semi-arid areas. For this purpose, evaluation of the effect of drought stress on plant cultivars and identification of the tolerant genotype is of particular importance.

Material and Methods: In this research, nine corn hybrids (including three promising hybrids H1 (SC01; TS01×MS02), H2 (KLM77021/4-1-2-1-2-4-1× K47/3), and H3 (K47/2-2-1-4-2-1-1-1× MO17) and six commercial H4 (NS640), H5 (SC703), H6 (SC704), H7 (SC720), and H9 (SC715) grain corn hybrids as late and medium maturity groups) were planted in split plots in the form of a complete random block design in three replicates at Research Unit of Moghan Agro-Industry and Livestock Company, Ardabil in spring and summer 2022. The main plots include two levels of normal irrigation (10 times of atmospheric and stack irrigation according to the region's custom) and drought stress (interruption of irrigation during the flowering and seed filling stages: eight times of atmospheric and stack irrigation so that the interruption of irrigation at the end of flowering continued to grain filling for 18 days) and the sub-plots included six varieties and three hybrids of corn. In both irrigation conditions, yield and seed yield components were evaluated. To identify the tolerant genotype based on grain yield under stress and normal conditions, stress tolerance indices (STI), stress sensitivity (SSI), tolerance (TOL), mean productivity index (MP) and geometric mean yield (GMP) were calculated. Correlation and grouping was performed based on tolerance indices of drought stress in different corn hybrids.

Results: Dehydration stress significantly reduced the yield and yield components of corn cultivars. The H7 (SC703) and H6 (SC704) hybrids were the ones with the highest plant height, hundred seed weight, number of seed rows in cob, and number of seeds in each cob row. Further, the hybrid H1 (SC01), H6 (SC704), H7 (SC703) and H3 (K47/2-2-1-4-2-1-1-1× MO17) have the highest seed yield in both conditions of normal stress and dehydration. The correlation between grain yield and grain yield components was significant and positive. The data obtained from the evaluation of drought tolerance indices showed that there was a significant difference between different corn hybrids. As the hybrid H6 (SC704) and promising hybrid H1 (SC01) allocated the highest MP, GMP and STI, and the promising hybrid H3 (K47/2-2-1-4-2-1-1-1× MO17) showed the highest SSI value. Correlation analysis between drought tolerance indices also showed a significant positive relationship between STI, SSI, TOL, MP and GMP. The cluster analysis of the studied corn hybrids based on drought tolerance indices divided the corn hybrids into three separate groups, such that the hybrids H1 (SC01), H3 (K47/2-2-1-4-2-1-1-1× MO17), H6 (SC704) and H7 (SC703) were classified as drought tolerant hybrids within the same group.

Conclusion: It seems that by simultaneous trait evaluation of the grain yield and grain yield components along with drought tolerance indices, it is possible to identify the genotype with high grain yield under water deficit stress. The information acquired by the study might be applied in the future remedial programs.

Keywords: Cluster analysis, Correlation, Drought, Grain yield, Tolerance indices



ذرت (*Zea mays* L.) گیاهی است یکساله و از خانواده غلات محسوب می‌شود. ذرت یکی از محصولات مهم و استراتژیک کشور است و سهم قابل توجهی نسبت به غلات علوفه‌ای در تأمین پروتئین مورد نیاز جامعه، از جمله در تغذیه دام و تولید گوشت قرمز و سفید دارد و تأمین امنیت غذایی کشور دارد. مهم‌ترین عاملی که توسعه و کشت و تولید ذرت را در دنیا محدود می‌کند، خشکی‌های فصلی است (Beyene et al., 2021). که منجر به کاهش شدید عملکرد دانه می‌شود (Basafa & Taherian, 2016; Moharramnejad et al., 2019). تنش خشکی باعث می‌شود که عملکرد دانه ذرت در مرحله قبل و بعد از گلدهی به ترتیب ۲۵ و ۵۰ درصد کاهش یابد (Osborne et al., 2002). سانتوس و همکاران (Santos et al., 2020) گزارش کردند که تنش خشکی در ذرت در مرحله قبل از گرده افشانی، مانع طویل شدن کالاله و نمو گلچه‌ها می‌شود که این، تنش باعث می‌شود که تعداد دانه کاهش

کاهش بیشتر عملکرد دانه تحت تنش کم آبی می‌شوند. از میان این صفات می‌توان به وزن صد دانه، طول بلال، قطر بلال اشاره کرد.

در مراحل حساس رشد ذرت خصوصاً مرحله گرده‌افشانی، تخلیه رطوبتی خاک نباید بیشتر از ۴۵ درصد رطوبت قابل مصرف خاک باشد (Allakonon et al., 2022). با بررسی اثر تیمارهای کم آبی در مراحل گوناگون رشد ذرت علوفه‌ای در کرج، مشخص شد که تنش در مراحل رشد رویشی و گلدهی به ترتیب ۲۸ و ۲۹ درصد عملکرد دانه را در مقایسه با تیمار آبیاری رایج کاهش می‌دهد (Basafa & Taherian, 2016). در آزمایشی دیگر، با اجرای کم آبیاری در مرحله رشد رویشی ذرت، گزارش کردند که کمبود شدید آب سبب افت ماده خشک گیاه می‌شود. تنش رطوبتی در مراحل مختلف رشد ذرت، عملکرد آن را کاهش می‌دهد که شدت افت عملکرد علاوه بر شدت تنش به مرحله رشد گیاه نیز بستگی دارد (Sah et al., 2020). تنش رطوبتی در زمان رشد رویشی، گلدهی و پر شدن دانه گیاه ذرت، عملکرد دانه را به ترتیب به اندازه ۲۵، ۵۰ و ۲۱ درصد کاهش داد (Osborne et al., 2002). بررسی تیخیر و تعرق گیاه (ETc) ذرت در روش آبیاری بارانی در منطقه نیمه‌خشک و آبیاری قطره‌ای در جنوب غرب ترکیه نشان داد که میزان ETc در آبیاری بارانی کمتر از آبیاری قطره‌ای است (Messina et al., 2023). تولید ماده‌خشک گیاه رابطه مستقیمی با مساحت برگ و شدت فتوسنتز برگ دارد، چنانچه با افزایش سطح برگ در مراحل رشد، شدت فتوسنتز زیاد می‌شود. لذا، حفظ میزان برگ بیشتر در طی چرخه‌های تنش خیلی مهم می‌باشد. از این رو، کربن زیادی برای انجام فتوسنتز جذب می‌شود (Cairns et al., 2012; Moharramnejad et al., 2019).

مواد و روش‌ها

مواد گیاهی و نحوه اعمال تنش کم آبی:

مواد گیاهی مورد استفاده نه هیبرید ذرت شامل سه هیبرید امیدبخش (H1) تهیه شده از شرکت زیست فناوریان بذر سهند، H2 و H3 تهیه شده از موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر) و شش هیبرید تجاری (H4, H5, H6, H7, H8 و H9) بود. آزمایش به صورت کرت‌های خرد شده در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار در واحد تحقیقات بخش ۱۰ شرکت کشت و صنعت و دامپروری مغان استان اردبیل در بهار و تابستان سال ۱۴۰۱ اجرا شد. کرت‌های اصلی شامل دو سطح آبیاری عادی (۱۰ نوبت آبیاری جوی و پشته‌ای براساس عرف منطقه) و تنش کم آبی (قطع آبیاری در مرحله گلدهی و پر شدن دانه: هشت نوبت آبیاری جوی و پشته‌ای به‌طوری‌که قطع آبیاری در انتهای گلدهی تا پر شدن دانه به مدت ۱۸ روز ادامه داشت) و کرت‌های فرعی شامل نه هیبرید ذرت بود. آماده‌سازی بستر کشت شامل رتیواتور، شخم برگردان و دیسک در فصل بهار بود. براساس تجزیه خاک محل آزمایش، قبل از این که کاشت صورت گیرد، ۳۰۰ کیلوگرم در هکتار فسفات آمونیوم و ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار اوره در زمین توزیع گردید و ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار اوره در مراحل مختلف رشدی گیاه ذرت به صورت سرک استفاده شد. هر کرت آزمایشی شامل چهار خط به فاصله ۷۵ سانتی‌متر و به طول ۵/۶ متر با فاصله بین بوته ۱۸ سانتی‌متر و با تراکم حدود ۷۶ هزار بوته در هکتار کشت شد. برای اطمینان از سبز شدن بذور در هر کپه به صورت دستی سه بذر کاشته شد و پس از تنک کردن در مرحله سه تا چهار برگی فقط تک بوته مناسب در هر کپه نگه داشته شد. هم‌چنین، وجین علف‌های هرز به صورت دستی در همه مراحل انجام گرفت.

شاخص‌های مختلف برای محاسبه توانایی و قدرت ژنوتیپ-ها برای مقابله با تنش وجود دارد. ژنوتیپ‌ها در وضعیت تنش و بدون تنش کمبود آب، به چهار دسته طبقه‌بندی می‌شود: گروه A: ژنوتیپ‌هایی که عملکرد بالا و یکسانی در هر دو محیط دارای تنش و بدون تنش دارند. گروه B: ژنوتیپ‌هایی که فقط در محیط بدون تنش عملکرد مناسبی دارند. گروه C: ژنوتیپ-هایی که فقط در محیط دارای تنش عملکرد نسبتاً زیادتری دارند. گروه D: ژنوتیپ‌هایی که در هر دو محیط دارای تنش و بدون تنش عملکرد کمتری دارند. بنابراین، مناسب‌ترین مقیاس انتخاب، شاخصی است که بتواند ژنوتیپ‌های دسته A را از بقیه دسته‌ها تشخیص دهد (Fernandez, 1992). برای تعیین بهترین شاخص تحمل به خشکی باید شاخصی انتخاب شود که دارای همبستگی مثبت و معنی‌داری با عملکرد دانه در هر دو شرایط تنش و بدون تنش باشد و شاخص‌های تحمل به خشکی از قبیل MP، GMP و STI به واسطه دارا بودن همبستگی مثبت و معنی‌دار با عملکرد هیبریدهای ذرت در دو شرایط بدون تنش و تنش کم آبی پس از مرحله گلدهی، به عنوان مناسب‌ترین معیار برای شناسایی افراد برتر با عملکرد دانه بالا و متحمل به خشکی برای هر دو شرایط هستند (Allakonon et al., 2022; Beyene et al., 2021;)

جدول ۱- مشخصات هیبریدهای ذرت مورد مطالعه

Table 1. Characteristics of studied maize hybrids

رشدگی Maturity	رقم Cultivar	شماره No.	کد Code
متوسط رس Medium maturing	SC01; TS01×MS02	1	H1
دیررس Late maturing	KLM77021/4-1-2-1-2-4-1× K47/3	2	H2
دیررس Late maturing	K47/2-2-1-4-2-1-1-1× MO17	3	H3
متوسط رس Medium maturing	NS640	4	H4
متوسط رس Medium maturing	TWC647	5	H5
دیررس Late maturing	SC704	6	H6
دیررس Late maturing	SC703	7	H7
دیررس Late maturing	SC720	8	H8
دیررس Late maturing	SC715	9	H9

روش حداقل واریانس وارد (Ward) صورت گرفت. برای انجام تجزیه‌های آماری از نرم‌افزار SPSS نسخه ۱۶ استفاده گردید.

نتایج و بحث

مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که تنش کم‌آبی به‌طور معنی‌دار باعث کاهش ارتفاع بوته (۱۲/۱۸ درصد)، وزن صد دانه (۱۸/۱۵ درصد)، تعداد دانه در ردیف بلال (۱۱ درصد)، تعداد ردیف دانه در بلال (۱۲/۲۱ درصد) و عملکرد دانه (۲۵/۲۳ درصد) در مقایسه با شرایط عادی شد که نشان از تأثیر معنی‌دار تنش کم‌آبی روی صفات زراعی گیاه ذرت بود. مقایسه میانگین ارتفاع (SC703) و هیبرید امیدبخش H₃ (K47/2-2-1-4-2-) (MO17 1-1-1×) بیشترین ارتفاع بوته را در مقایسه با سایر هیبریدهای ذرت به‌خود اختصاص دادند (شکل ۱). هیبرید H6 (SC704) و هیبرید امیدبخش H2 (KLM77021/4-1-2-1-) (K47/3 2-4-1×) در مقایسه با سایر هیبریدهای ذرت بیشترین وزن صد دانه را دارا بود (شکل ۱). بر اساس نتایج مقایسه میانگین تعداد ردیف دانه در بلال و تعداد دانه در ردیف بلال، هیبرید H6 (SC704) در مقایسه با سایر هیبریدها، بهترین هیبرید ذرت در پژوهش حاضر بود (شکل ۱). مقایسه میانگین عملکرد دانه هیبریدها در شرایط عادی و تنش کم‌آبی نشان داد (شکل ۲) که هیبرید H6 (SC704)، H7 (SC703)، هیبرید امید بخش H2 (KLM77021/4-1-2-1-2-4-1× K47/3) و هیبرید امید بخش H1 (S01) بیشترین عملکرد را داشتند.

تنش کمبود آب، از طریق یک یا چند صفت مربوط به اجزای عملکرد باعث کاهش عملکرد دانه ذرت می‌شود (Stepanovic et al., 2021). پرازیس و کواهو (Prazeres & Coelho, 2020) در گیاه ذرت تحت تنش کمبود نشان دادند که ارتفاع بوته و ماده خشک گیاه ذرت تحت تنش کم‌آبی به‌شدت کاهش می‌یابد. سیدزوار و همکاران (Seyedzavar et al., 2023) گزارش کردند که هیبرید ۷۰۴ تحت تنش کمبود آب با حفظ ارتفاع بوته، تعداد گره ساقه و فاصله بین گره‌ها مانع از کاهش بیشتر بیوماس می‌شود که این عمل به‌خاطر پتانسیل و ساختار ژنتیکی هیبرید یاد شده

صفات مورد مطالعه: بعد از اعمال تنش کم‌آبی از دو خط

میان به‌طور تصادفی ۵ نمونه برای اندازه‌گیری ارتفاع بوته، وزن صد دانه، تعداد ردیف دانه در بلال و تعداد دانه در بوته نشان داد که هیبرید H6 (SC704)، H7 (ردیف بلال استفاده شد. برای اندازه‌گیری عملکرد دانه توسط ترازوی حساس، از مجموع دو خط میانی با حذف دو بوته از ابتدا و انتهای هر کرت استفاده شد.

شاخص‌های تحمل به خشکی: برای شناسایی

هیبریدهای متحمل به تنش کمبود آب، از شاخص‌های حساسیت به تنش کمبود آب (SSI)، تحمل به تنش (STI)، میانگین حسابی عملکرد (MP)، میانگین هندسی عملکرد (GMP) و شاخص تحمل (TOL) با استفاده از رابطه‌های زیر استفاده شد:

$$SSI = \frac{(1 - \frac{Y_s}{Y_p})}{SI}$$

$$SI = 1 - (\frac{\bar{Y}_s}{\bar{Y}_p})$$

$$TOL = Y_p - Y_s$$

$$MP = \frac{Y_s + Y_p}{2}$$

$$GMP = \sqrt{Y_s \times Y_p}$$

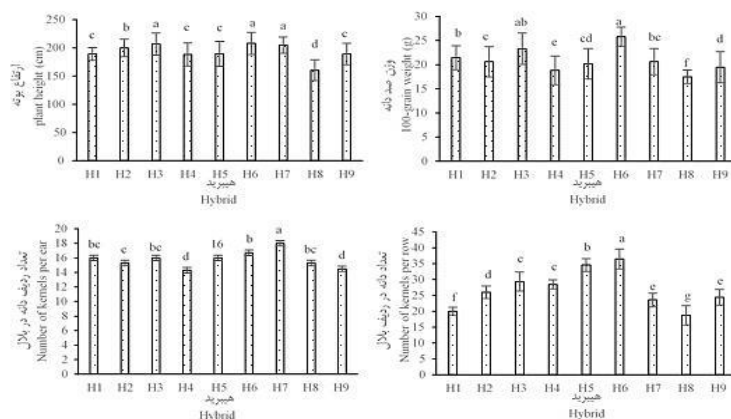
$$STI = \frac{(Y_p)(Y_s)}{(\bar{Y}_p)^2}$$

که در این فرمول‌ها $\bar{Y}_p$ ، $\bar{Y}_s$ ، Y_p ، Y_s به‌ترتیب میانگین عملکرد در شرایط تنش کم‌آبی، شرایط آبیاری عادی، میانگین عملکرد هیبریدها در شرایط تنش کم‌آبی و میانگین عملکرد هیبریدها در شرایط آبیاری عادی است (Fernandez, 1992).

تجزیه‌های آماری: نرمال بودن اشیاهای آزمایشی به‌وسیله آزمون کولموگروف-اسمیرنوف ارزیابی شد و بعد از تجزیه واریانس داده‌ها، مقایسه میانگین‌ها به‌وسیله آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد انجام گرفت. ضرایب همبستگی صفات، با به‌کارگیری میانگین نه هیبرید ذرت مورد مطالعه به‌روش پیرسون محاسبه شد و تجزیه خوشه‌ای هیبریدهای ذرت بر اساس شاخص‌های تحمل به خشکی با

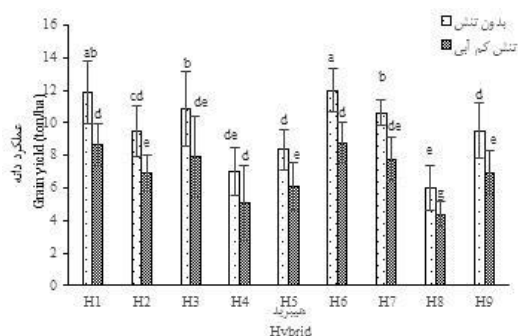
باعث کاهش دانه‌های گرده می‌شوند (Fadhli et al., 2020; Liu & Qin, 2021; Osborne et al., 2002; Sah et al., 2020; Santos et al., 2020). ستپانویچ و همکاران (Stepanovic et al., 2021) اعلام نمود که کاهش اندازه دانه به دلیل کاهش تعداد روز تا رسیدگی فیزیولوژیک به طور مستقیم باعث کاهش عملکرد دانه می‌شود و کمبود آبی در دوره‌ی گلدهی سبب افت شدید در تعداد دانه خواهد بود. در هیبریدهای پایدار، با خارج شدن زود هنگام کاکل‌ها، همزمان با پیدایش دانه‌های گرده و ایجاد کاکل‌ها و بارور بودن بیشتر دانه‌ها، مقدار بی‌دانه بودن در بلال کاسته می‌شود ولی تنش کمبود آب در این دوره باعث کاهش تعداد دانه در ردیف بلال می‌شود. تعداد ردیف در بلال از ویژگی‌هایی است که کمتر در اثر وضعیت محیطی قرار گرفته و از طریق عامل ژنتیکی کنترل می‌شود (Messina et al., 2023). که با نتایج این پژوهش مطابقت داشت. محرم‌نژاد و همکاران (Moharramnejad et al., 2019) اظهار کردند که تنش خشکی در مراحل مختلف به خصوص در زمان پر شدن دانه گیاه ذرت دلیل اصلی کاهش مواد خشک هر بوته می‌باشد. لیو و کین (Liu & Qin, 2021) با ارزیابی هیبریدهای ذرت تحت تنش کم آبی گزارش نمودند که هیبریدهای مختلف با خصوصیات متفاوت با ویژگی متحمل به کم‌آبی اختلاف معنی‌داری از نظر تعداد دانه در ردیف بلال و تعداد ردیف دانه در بلال داشتند، که با نتایج این تحقیق سازگار است.

می‌باشد. همچنین کاهش ارتفاع بوته در تیمار تنش کمبود آب در دوره نمو رویشی در مقایسه با تیمار آبیاری عادی حدود ۱۰/۲ درصد در گیاه ذرت گزارش شده است (Moharramnejad et al., 2019). لیو و کین (Liu & Qin, 2021) بیان کرد که کمبود آب در دوره نمو رویشی سبب کاهش قابل توجهی از ارتفاع بوته شده و به خاطر آن تنش کمبود آب در این دوره ممکن است به آغازهای بلال در دوره‌ی اولیه رویشی خسارت وارد کند. نبود آب به اندازه نیاز در دوره‌ی رشد رویشی ذرت، می‌تواند اثر مستقیمی بر عملکرد پایانی دانه نداشته باشد ولی بر رشد و نمو گیاه اثر منفی می‌گذارد. به طوری که، مانع از جمع شدن مواد در این اندام‌ها می‌شود (Allakonon et al., 2022). یکی از دلایل کاهش وزن صد دانه در تنش کمبود آب در دوره‌ی پرشدن دانه، کوتاه شدن زمان نمو دانه و زودرسی ناشی از تنش کمبود آب می‌باشد (McMillen et al., 2022). ستپانویچ و همکاران (Stepanovic et al., 2021) اظهار کردند که کاهش قابل توجه وزن صد دانه را می‌توان به ایجاد دانه‌های چروکیده در دوره‌ی پرشدن دانه تحت تنش کم آبی که دارای وزن کمتری هستند، نسبت داد. افت تعداد دانه در بلال را می‌توان ناشی از تنش کمبود آب بر ناباروری تخمک‌ها در بلال ارتباط داد. به طوری که، گرده افشانی در گیاه ذرت به شیوه عادی چند روز بعد از پیدایش گل تاجی مشخص می‌شود و عواملی مانند محدودیت آب، نیتروژن و بقیه عنصرهای غذایی



شکل ۱- مقایسه میانگین اثر هیبریدهای مختلف ذرت برای صفات ارتفاع بوته، وزن صد دانه، تعداد ردیف دانه در بلال و تعداد دانه در ردیف بلال (در هر صف حروف متفاوت نشانگر اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد می‌باشد)

Figure 1. Comparison of means for plant height, 100-grain weight, number of kernels per ear, and number of kernels per row in various maize hybrids (various letters indicate significant differences at $p < 0.05$)



شکل ۲- مقایسه میانگین برهمکنش هیبرید در سطوح مختلف تنش کم آبی بر عملکرد دانه (حروف متفاوت نشانگر اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد می‌باشد)

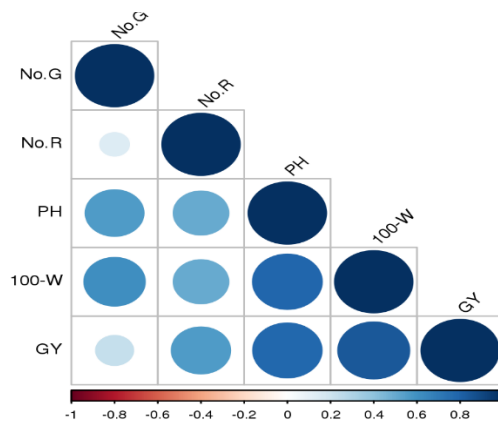
Figure 2. Comparison of means for grain yield in maize hybrids under different water deficit stresses (Various letters indicate significant differences at $p < 0.05$)

(Taherian, 2016). نتایج یک آزمایش نشان داد که وزن بلال، تعداد دانه در ردیف بلال، قطر بلال و درجه روز رشد از ظهور کاکل تا رسیدگی فیزیولوژیک همبستگی مثبت معنی‌دار با عملکرد دانه دارند. همچنین همبستگی مثبت معنی‌دار بین عملکرد دانه با صفات تعداد دانه در ردیف بلال، وزن صد دانه، ارتفاع بوته و تعداد ردیف دانه در بلال وجود داشت (Moharramnejad et al., 2019; Prazeres & Coelho, 2020). بیرگی و همکاران (Beiragi et al., 2011) در تحقیقات خود اعلام نمودند که عملکرد دانه ارتباط مثبت معنی‌دار با صفات ارتفاع بوته، طول بلال، تعداد ردیف دانه در بلال داشت که با نتایج این پژوهش مطابقت دارد.

نتایج حاصل از شاخص‌های تحمل به خشکی هیبریدهای مختلف ذرت بر اساس عملکرد دانه نشان داد (جدول ۲) که اختلاف قابل توجهی بین هیبریدهای مختلف مورد مطالعه وجود داشت. به‌طوری‌که، هیبرید H6 (SC704) و هیبرید امید بخش H1 (SC01) بیشترین مقدار MP، TOL، GMP و STI را داشتند. هیبرید امید بخش H3 ($1 \times 1-1-2-4-2-1-4-2-2$ K47/2) بیشترین مقدار SSI را داشت. چنین به‌نظر می‌رسد که هیبرید H6 (SC704) و هیبرید امیدبخش H1 (SC01) نسبت به بقیه هیبریدها به خشکی متحمل‌تر بودند.

تجزیه همبستگی بین عملکرد دانه با ارتفاع بوته، وزن صد دانه، تعداد ردیف دانه در بلال و تعداد دانه در ردیف بلال نشان داد که ارتباط مثبت معنی‌دار بین عملکرد دانه و ارتفاع بوته، وزن صد دانه و تعداد ردیف دانه در بلال وجود داشت و تعداد دانه در ردیف بلال نیز با ارتفاع بوته ($0/61$) و وزن صد دانه ($0/56$) همبستگی مثبت معنی‌دار نشان داد (شکل ۳). نتایج حاصل نشان داد که ارتباط مستقیمی بین عملکرد دانه با وزن صد دانه، تعداد ردیف دانه در بلال و ارتفاع بوته دارد.

مکملین و همکاران (McMillen et al., 2022) بیان نمودند که افت عملکرد دانه ذرت تحت تنش خشکی در دوره‌ی زایشی به کم شدن زمان رشد و کاهش فتوسنتز بستگی دارد. مطالعه همبستگی عملکرد دانه با صفات مرتبط با عملکرد نشان داد که عملکرد دانه با صفات ارتفاع بوته، وزن صد دانه، طول بلال، تعداد دانه در ردیف بلال ارتباط مثبت و قابل توجهی داشت. علاوه بر این، نتایج پژوهشگران، ارتباط عملکرد دانه با تعداد دانه در ردیف بلال و طول بلال را تایید می‌کند (Fadhli et al., 2020; Moharramnejad et al., 2019; Sah et al., 2020; Santos et al., 2020). بیشترین همبستگی تعداد ردیف دانه در بلال با قطر بلال مشاهده شد. به‌عبارت دیگر، تحت شرایط تنش شدید خشکی، به‌دنبال افزایش قطر بلال تعداد ردیف دانه در بلال نیز افزایش می‌یابد (Basafa &)



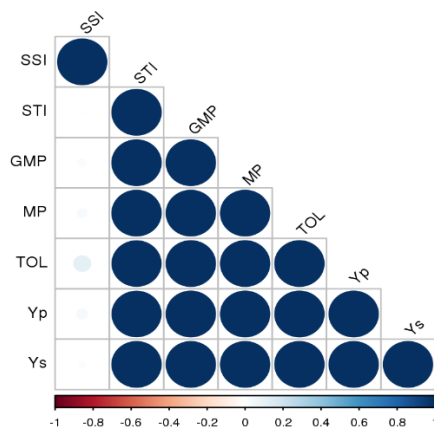
شکل ۳- همبستگی بین عملکرد دانه (GY) و ارتفاع بوته (PH)، وزن صد دانه (100-W)، تعداد ردیف دانه در بلال (No. R)، تعداد دانه در ردیف بلال (No. G)

Figure 3. Correlation between grain yields (GY) and plant height (PH), 100-grain weight (100-W), number of kernels per ear (No. R), and number of kernels per row (No. G)

جدول ۲- شاخص‌های تحمل به تنش خشکی در هیبریدهای مورد بررسی ذرت

Table 2. Drought stress tolerance indices in maize hybrids

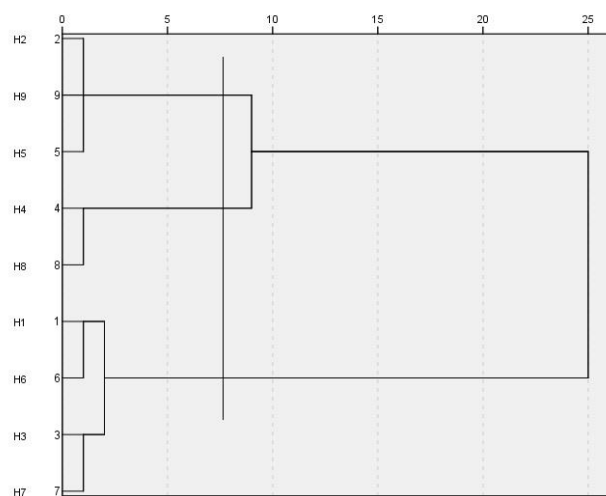
Hybrids هیبرید	Code کد	عملکرد تنش	عملکرد تنش	حساسیت به تنش کمبود آب	شاخص تحمل	میانگین حسابی عملکرد	میانگین هندسی عملکرد	STI تحمل به تنش
SC01; TS01×MS02	H1	11.900	8.700	0.998	3.200	10.300	10.175	1.142
KLM77021/4-1-2-1-2-4-1× K47/3	H2	9.500	6.900	1.015	2.600	8.200	8.096	0.723
K47/2-2-1-4-2-1-1-1× MO17	H3	10.900	7.900	1.021	3.000	9.400	9.280	0.950
NS640	H4	7.000	5.100	1.009	1.900	6.050	5.975	0.394
TWC647	H5	8.300	6.100	0.985	2.200	7.200	7.115	0.558
SC704	H6	12.000	8.800	0.991	3.200	10.400	10.276	1.165
SC703	H7	10.600	7.800	0.982	2.800	9.200	9.093	0.912
SC720	H8	6.000	4.400	0.991	1.600	5.200	5.138	0.291
SC715	H9	9.500	6.900	1.017	2.600	8.200	8.096	0.723



شکل ۴- همبستگی بین شاخص‌های تحمل به خشکی و عملکرد دانه در شرایط تنش کم آبی در ذرت
Figure 4. Correlation between drought tolerance indices and grain yield of maize water deficit stresses

بین شاخص‌های تحمل به تنش کم آبی محاسبه کردند و مشاهده نمودند که عملکرد دانه در تنش ملایم مثبت و قابل توجهی با MP، GMP و STI دارد. در این گزارش شاخص‌های TOL و SSI همبستگی معنی‌داری در شرایط تنش ملایم و تنش شدید کم آبی با عملکرد دانه نشان دادند (Santos et al., 2020). شجاعی و همکاران (Shojaei et al., 2022) گزارش کردند شاخص‌هایی که در دوره تنش و بدون تنش همبستگی زیادی با عملکرد داشته باشند، به‌عنوان مفیدترین شاخص‌ها شناسایی می‌شوند و این شاخص‌ها توانایی ارزیابی و شناسایی ژنوتیپ‌های با عملکرد بالا در هر دو محیط را دارند. شاخص‌های MP، GMP و STI در شرایط تنش بیشترین ارتباط مثبت با عملکرد و با همدیگر داند (Allakonon et al., 2022; Fadhli et al., 2020; Kumar et al., 2022). فرناندز (Fernandez, 1992) بیان کرد که شاخص‌های GMP و STI شاخص‌های سازگار برای تعیین ژنوتیپ‌های متحمل به تنش کم آبی و حاوی پتانسیل عملکرد بیشتر در شرایط بدون تنش می‌باشند.

بر اساس نتایج حاصل از شاخص‌های تحمل به خشکی هیبرید H1 (SC01) جزء هیبرید متحمل به تنش بود اما دارای بیشترین TOL بود چنین به نظر می‌رسد که شاخص TOL، شاخص تحمل خشکی مناسبی برای انتخاب افراد متحمل به خشکی نیست. پایین بودن شاخص تحمل TOL دلیل بر زیاد بودن میانگین عملکرد رقم در وضعیت تنش نمی‌باشد. چون، عملکرد یک رقم مشخص امکان دارد پایین باشد و در شرایط آبیاری با شرایط کم آبی اختلاف معنی‌داری نداشته باشد ولی رقم به دلیل TOL پایین، به‌عنوان یک رقم متحمل به تنش انتخاب شود. لذا، این شاخص باعث انتخاب ژنوتیپ‌های دسته C می‌شود (Seyedzavar et al., 2023). بنابراین، به‌نظر می‌رسد در این مطالعه شاخص‌های STI و GMP به‌دلیل همبستگی‌های معنی‌دار و بالایی که در هر دو شرایط آبیاری عادی و تنش کم آبی با عملکرد داشتند، می‌توانند شاخص‌های مناسبی برای برآورد پایداری عملکرد در هر دو شرایط تنش ملایم و شدید باشند (Bonea, 2020; Khatibi et al., 2022; Santos et al., 2020; Shojaei et al., 2022). خطیبی و همکاران (Khatibi et al., 2022) همبستگی ساده



شکل ۵- تجزیه خوشه‌ای نه هیبرید ذرت بر اساس صفات زراعی و شاخص‌های تحمل به خشکی
Figure 5. Cluster analysis of nine maize hybrids base on agronomical traits and tolerance indices

جدول ۳- میانگین شاخص‌های تحمل به تنش خشکی در خوشه‌ها

STI	GMP	MP	TOL	SSI	Y _s	Y _p	Cluster
تحمل به تنش	میانگین هندسی عملکرد	میانگین حسابی عملکرد	شاخص تحمل	حساسیت به تنش کمبود آب	عملکرد تنش	عملکرد بدون تنش	خوشه
1.042 ^a	9.706 ^a	9.825 ^a	3.050 ^a	0.998 ^c	8.300 ^a	11.350 ^a	1
0.668 ^b	7.769 ^b	7.866 ^b	2.466 ^b	1.005 ^a	6.633 ^b	9.100 ^b	2
0.342 ^c	5.556 ^c	5.625 ^c	1.750 ^c	1.000 ^b	4.750 ^c	6.500 ^c	3
0.762	8.138	8.238	2.566	1.001	6.955	9.522	Mean

حروف متفاوت نشانگر اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد می‌باشد

Various letters indicate significant differences $p < 0.05$

تنش خشکی در یک گروه، هیبرید SC700 به‌تنهایی در یک گروه به‌عنوان هیبرید حساس و سایر هیبریدهای مورد ارزیابی نیز در یک گروه به‌عنوان هیبریدهای نیمه متحمل به خشکی بودند (Seyedzavar et al., 2023; Shojaei et al., 2022). نتایج آن‌ها با نتایج این پژوهش مطابقت داشت.

نتیجه‌گیری کلی

نتایج پژوهش حاضر نشان داد که تنش کم آبی باعث کاهش معنی‌دار عملکرد و اجزای عملکرد دانه هیبریدهای مختلف ذرت مورد مطالعه شد ولی بین هیبریدهای ذرت مورد ارزیابی تنوع وجود داشت. همبستگی بین عملکرد دانه با ارتفاع بوته، وزن صد دانه، تعداد ردیف دانه در بلال و تعداد دانه در ردیف بلال مثبت و معنی‌دار بود. بین هیبریدهای ذرت از لحاظ شاخص‌های تحمل به خشکی اختلاف معنی‌دار وجود داشت. هیبرید H6 (SC704) و هیبرید امید بخش H1 (SC01) بیشترین مقدار MP، GMP و STI داشتند. ارتباط مثبت معنی‌دار بین شاخص‌های تحمل به خشکی وجود داشت که نشان از کارایی این شاخص‌ها در انتخاب هیبریدهای ذرت متحمل به خشکی می‌باشد. تجزیه خوشه‌ای ۹ هیبرید ذرت بر اساس شاخص‌های تحمل به تنش خشکی، آن‌ها را به سه گروه متفاوت تقسیم کرد.

تشکر و قدردانی

بدین‌وسیله نویسندگان از شرکت زیست فناوریان بذر سهند و موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر به‌خاطر تهیه بذور هیبریدهای ذرت جهت کاشت و همچنین از جناب آقای مهندس سردار خلیلی مسئول بخش ۱۰ شرکت کشت و صنعت و دامپروری مغان به‌خاطر تهیه بستر مناسب کاشت این پروژه در واحد تحقیقات کشاورزی آن بخش نهایت تقدیر و تشکر به‌عمل می‌آید.

تجزیه خوشه‌ای نه هیبرید ذرت بر اساس شاخص‌های تحمل به خشکی (شکل ۵) آن‌ها را به سه گروه مختلف تفکیک کرد. به‌طوری‌که، هیبریدهای H1 (SC01)، H3 (K47/2-2-) و MO17 (1-4-2-1-1-1× H7 (SC703) و H6 (SC704) در گروه اول قرار گرفتند و متحمل به تنش کم آبی بودند. هیبریدهای H2 (KLM77021/4-1-2-1-2-4-1× K47/3)، H5 (TWC647) و H9 (SC715) در گروه دوم و هیبریدهای H4 (NS640) و H8 (SC720) در گروه سوم واقع شدند. هیبریدهای گروه سوم تحمل کمی به شرایط تنش کم آبی داشتند. میانگین شاخص‌های تحمل به خشکی در سه گروه حاصل از تجزیه خوشه‌ای (جدول ۳) نشان داد که خوشه اول بیشترین مقدار MP، GMP و STI داشت و دارای هیبریدهای متحمل به کم آبی بودند.

چوگان و همکاران (Choukan et al., 2005) با انجام تجزیه خوشه‌ای، ۵۲ لاین ذرت را برحسب ۲۵ صفت، در چهار گروه تقسیم‌بندی کردند. در مطالعه‌ای دیگر با استفاده از تجزیه خوشه‌ای به‌روش وارد (Ward) هیبریدهای مورد مطالعه به پنج دسته تقسیم شدند و خوشه‌های دوم و سوم از نظر عملکرد دانه و صفات مؤثر بر عملکرد (شاخص برداشت، عملکرد بیولوژیک و وزن هزار دانه) از میانگین بالاتری برخوردار بودند (Seyedzavar et al., 2023). محرم‌نژاد و شبیری (Moharramnejad & Shiri, 2020) با ارزیابی ژنوتیپ‌های مختلف ذرت بر اساس صفات عملکردی و فیزیولوژیکی، هیبریدهای ذرت را در دو گروه مختلف تقسیم‌بندی کردند. با انجام تجزیه خوشه‌ای برای هشت هیبرید ذرت با استفاده از صفات زراعی و شاخص‌های تحمل خشکی اظهار کردند که هشت هیبرید ذرت در سه گروه متفاوت قرار گرفتند. به‌طوری‌که هیبریدهای SC703 و SC647 به‌عنوان هیبرید متحمل به

منابع

- Allakonon, M. G. B., Zakari, S., Tovihoudji, P. G., Fatondji, A. S., & Akponikpè, P. I. (2022). Grain yield, actual evapotranspiration and water productivity responses of maize crop to deficit irrigation: A global meta-analysis. *Agricultural Water Management*, 270, 107746. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107746>
- Basafa, M., & Taherian, M. (2016). Analysis of stability and adaptability of forage yield among silage corn hybrids. *Journal of Crop Breeding*, 8, 185-191 (In Persian).
- Beiragi, M. A., Ebrahimi, M., Mostafavi, K., Golbashy, M., & Khorasani, S. K. (2011). A study of morphological basis of corn (*Zea mays* L.) yield under drought stress condition using correlation and path coefficient analysis. *Journal of Cereals and Oilseeds* 2, 32-37. <https://doi.org/10.5897/JCO2020.0212>
- Beyene, Y., Gowda, M., Pérez-Rodríguez, P., Olsen, M., Robbins, K. R., Burgueño, J., Prasanna, B. M., & Crossa, J. (2021). Application of genomic selection at the early stage of breeding pipeline in tropical maize. *Frontiers in Plant Science*, 12, 685488. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.685488>

- Bonea, D. (2020). Grain yield and drought tolerance indices of maize hybrids. *Notulae Scientia Biologicae*, 12, 376-386. <https://doi.org/10.15835/nsb12210683>
- Cairns, J. E., Sonder, K., Zaidi, P., Verhulst, N., Mahuku, G., Babu, R., Nair, S., Das, B., Govaerts, B., & Vinayan, M. (2012). Maize production in a changing climate: impacts, adaptation, and mitigation strategies. *Advances in Agronomy*, 114, 1-58. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-394275-3.00006-7>
- Choukan, R., Hosseinzadeh, A., Ghanadha, M., Taleei, M., & Mohammadi, S. (2005). Classification of maize inbred lines based on morphological traits. *Seed and Plant Journal*, 21, 139-139. <https://doi.org/10.22092/SPIJ.2017.110799> (In Persian).
- Fadhli, N., Farid, M., Effendi, R., AZRAI, M., & ANSHORI, M. F. (2020). Multivariate analysis to determine secondary characters in selecting adaptive hybrid corn lines under drought stress. *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*, 21. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d210826>
- Fernandez, G. C. (1992). Effective selection criteria for assessing plant stress tolerance. In "Proceeding of the International Symposium on Adaptation of Vegetables and other Food Crops in Temperature and Water Stress, Aug. 13-16, Shanhua, Taiwan, 1992", 257-270.
- Khatibi, A., Omrani, S., Omrani, A., Shojaei, S. H., Mousavi, S. M. N., Illés, Á., Bojtor, C., & Nagy, J. (2022). Response of maize hybrids in drought-stress using drought tolerance indices. *Water*, 14, 1012. <https://doi.org/10.3390/w14071012>
- Kumar, A., Singh, V. K., Saran, B., Al-Ansari, N., Singh, V. P., Adhikari, S., Joshi, A., Singh, N. K., & Vishwakarma, D. K. (2022). Development of novel hybrid models for prediction of drought-and stress-tolerance indices in teosinte introgressed maize lines using artificial intelligence techniques. *Sustainability*, 14, 2287. <https://doi.org/10.3390/su14042287>
- Leonel, L. P., & Tonetti, A. L. (2021). Wastewater reuse for crop irrigation: Crop yield, soil and human health implications based on giardiasis epidemiology. *Science of the Total Environment*, 775, 145833. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145833>
- Liu, S., & Qin, F. (2021). Genetic dissection of maize drought tolerance for trait improvement. *Molecular Breeding*, 41, 1-13. <https://doi.org/10.1007/s11032-020-01194-w>
- McMillen, M. S., Mahama, A. A., Sibiya, J., Lübberstedt, T., & Suza, W. P. (2022). Improving drought tolerance in maize: Tools and techniques. *Frontiers in Genetics*, 13, 1001001. <https://doi.org/10.3389/fgene.2022.1001001>
- Messina, C. D., Gho, C., Hammer, G. L., Tang, T., & Cooper, M. (2023). Two decades of harnessing standing genetic variation for physiological traits to improve drought tolerance in maize. *Journal of Experimental Botany*, 74, 4847-4861. <https://doi.org/10.1093/jxb/erad231>
- Moharramnejad, S., & Shiri, M. (2020). Study of genetic diversity in maize genotypes by ear yield and physiological traits. *Journal of Crop Breeding*, 12, 30-40 (In Persian). <https://doi.org/10.52547/jcb.12.35.30>
- Moharramnejad, S., Sofalian, O., Valizadeh, M., Asghari, A., Shiri, M. R., & Ashraf, M. (2019). Response of maize to field drought stress: oxidative defense system, osmolytes' accumulation and photosynthetic pigments. *Pakistan Journal of Botany*, 51, 799-807. [https://doi.org/10.30848/PJB2019-3\(1\)](https://doi.org/10.30848/PJB2019-3(1))
- Osborne, S., Schepers, J. S., Francis, D., & Schlemmer, M. R. (2002). Use of spectral radiance to estimate in-season biomass and grain yield in nitrogen-and water-stressed corn. *Crop science*, 42, 165-171. <https://doi.org/10.2135/cropsci2002.1650>
- Prazeres, C. S., & Coelho, C. M. M. (2020). Osmolyte accumulation and antioxidant metabolism during germination of vigorous maize seeds subjected to water deficit. *Acta Scientiarum Agronomy*, 42. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v42i1.42476>
- Sah, R., Chakraborty, M., Prasad, K., Pandit, M., Tudu, V., Chakravarty, M., Narayan, S., Rana, M., & Moharana, D. (2020). Impact of water deficit stress in maize: Phenology and yield components. *Scientific Reports*, 10, 2944. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-59689-7>
- Santos, Á. d. O., Pinho, R. G. V., Souza, V. F. d., Guimarães, L. J. M., Balestre, M., Pires, L. P. M., Silva, C. P. d. J. C. B., & Biotechnology, A. (2020). Grain yield, anthesis-silking interval and drought tolerance indices of tropical maize hybrids. *Crop Breeding*, 20, e176020110. <https://doi.org/10.1590/1984-70332020v20n1a10>
- Seyedzavar, J., norouzi, M., Aharizad, S., & Moghaddam, M. (2023). Evaluation of water stress tolerance of maize hybrids using tolerance indices. *Journal of Crop Breeding*, 15, 105-114. <https://doi.org/10.52547/jcb.15.45.105> (In Persian)
- Shojaei, S. H., Mostafavi, K., Omrani, A., Illés, Á., Bojtor, C., Omrani, S., Mousavi, S. M. N., & Nagy, J. (2022). Comparison of maize genotypes using drought-tolerance indices and graphical analysis under normal and humidity stress conditions. *Plants*, 11, 942. <https://doi.org/10.3390/plants11070942>
- Stepanovic, S., Rudnick, D., & Kruger, G. (2021). Impact of maize hybrid selection on water productivity under deficit irrigation in semiarid western Nebraska. *Agricultural Water Management*, 244, 106610. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106610>