University of Guilan
Faculty of Agricultural Sciences

Cereal Research
Vol. 15, No. 3, Autumn 2025 (303-317)
doi: 10.22124/CR.2025.31331.1875
pISSN: 2252-0163 eISSN: 2538-6115

RESEARCH PAPER OPEN ACCESS

Evaluation of tolerance indices and general and specific combining ability of maize (*Zea mays* L.) parents and hybrids under heat stress conditions

Shiva Rajabghale[1], Zahra Khodarahmpour[2*], Aziz Afarinesh[3] and Mohammad Motamedi[4]

1. Ph.D. Student, Department of Genetics and Plant Breeding, Ahvaz Compus, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran
2. Associate Professor, Department of Plant Production and Genetics, Shoushtar Compus, Islamic Azad University, Shoushtar, Iran (* Corresponding author: zahra.khodarahmpour@iau.ac.ir)
3. Research Assistant Professor, Safiabad Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Dezful, Iran
4. Assistant Professor, Department of Plant Production and Genetics, Shoushtar Compus, Islamic Azad University, Shoushtar, Iran

Comprehensive abstract

Introduction

Heat stress is a serious threat to food security and agricultural production. Stress tolerance indices are one of the most widly used methods for selecting stress tolerant genotypes among researchers. Furthermore, the diallel crosses method has also been introduced as one of the desirable genetic designs for selecting suitable parental lines and genotypes to obtain superior hybrids. Evaluating genotypes for combining ability in early generations is an essential step in producing desirable hybrids. The aim of this study was to estimate stress tolerance indices as well as the general combining ability (GCA) and specific combining ability (SCA) of genotypes in order to determine superior heat stress tolerant lines and hybrids.

Materials and methods

The plant materials of this experiment were six lines and 15 hybrids resulting from their one-way diallele crosses (21 treatments) that were evaluated in two independent experiments, including early (July 15, heat stress conditions) and recommended (August 15, non-stress conditions) sowing dates in a randomized complete block design with three replications. The experiment was carried out at the Safiabad Agricultural Research and Education Center, Dezful, Khuzestan province, Iran, in the summer of 2019. The measured traits in this study included number of days to maturity, grain yield and yield components. To assess heat tolerance in the studied lines and hybrids, stress tolerance and sensitivity indices and principal component analysis (PCA) were used. GCA of lines and SCA of hybrids were also estimated based on grain yield and yield components under non-stress and heat stress conditions using the first model of the second method of Griffing. All statistical and genetic analyses were performed using Minitab version 16 and Diallel-SAS softwares.

Research findings

The results showed that five indices including mean productivity (MP), geometric mean productivity (GMP), stress tolerance index (STI), harmonic mean (HA) and tolerance index (TOL) had a positive and significant correlation with grain yield in both normal and heat stress conditions. Therefore, these indices are introduced as the best indices for selecting heat-tolerant genotypes. Considering the results of these indices as well as the results of principal component analysis and biplot diagram, three lines C3-95-3, C3-95-9 and C3-95-10, and three hybrids C3-95-3×C3-95-9, C3-95-3×C3-95-10 and C3-95-9×C3-95-10 were identified as heat tolerant genotypes. The effects of SCA for grain yield, days to maturity, number of rows and number of grains per row in two hybrids

C3-95-3×C3-95-9 and C3-95-3×C3-95-10 under both non-stress and heat stress conditions were positive and significant. According to the results of this experiment, the three parental lines C3-95-10, C3-95-9 and C3-95-3, in addition to being tolerant to heat stress and better performance than other lines under heat stress conditions, had the ability to transfer these characteristics to hybrids.

Conclusion

The results of this study showed that stress indices can be effectively used to screen heat-tolerant genotypes. The selected lines can be used as potential sources for production of heat tolerant genotypes in breeding programs. Considering the significant effects of SCA for grain yield, number of grains per row and number of days to maturity, and the low GCA/SCA ratio, the role of non-additive effects of genes in controlling these traits was more important than additive effects. Since the cross superiority due to low breeding value can not be reliable in the selection process, therefore, heterosis due to non-additive and dominance effects of genes can be used to control the relevant traits and hope to produce suitable hybrids.

Keywords: Biplot, Griffing's diallel, Heterosis, Principal component analysis

Received: August 5, 2025 Accepted: October 1, 2025

Cite this article:

Rajabghale, S., Khodarahmpour, Z., Afarinesh, A., & Motamedi, M. (2025). Evaluation of tolerance indices and general and specific combining ability of maize (*Zea mays* L.) parents and hybrids under heat stress conditions. *Cereal Research*, *15*(3), 303-317. doi: 10.22124/CR.2025.31331.1875.

تحقیقات غلات
دوره پانزدهم، شماره سوم، پاییز ۱۴۰۴ (۳۱۷-۳۰۳)
doi: 10.22124/CR.2025.31331.1875

مقاله پژوهشی
دسترسی آزاد

ارزیابی شاخص‌های تحمل و ترکیب‌پذیری عمومی و خصوصی والدین و هیبریدهای ذرت (*Zea mays* L.) تحت شرایط تنش گرما

شیوا رجب‌قلعه[۱]، زهرا خدارحم‌پور[۲*]، عزیز آفرینش[۳] و محمد معتمدی[۴]

۱- دانشجوی دکتری، گروه ژنتیک و بهنژادی، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران
۲- دانشیار، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، واحد شوشتر، دانشگاه آزاد اسلامی، شوشتر، ایران (* نویسنده مسئول: zahra.khodarahmpour@iau.ac.ir)
۳- استادیار پژوهش، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی صفی‌آباد، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، دزفول، ایران
۴- استادیار، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، واحد شوشتر، دانشگاه آزاد اسلامی، شوشتر، ایران

چکیده جامع

مقدمه: تنش گرما تهدیدی جدی برای امنیت غذایی و تولیدات کشاورزی است. شاخص‌های تحمل به تنش، از جمله پرکاربردترین روش‌های انتخاب ژنوتیپ‌های متحمل به تنش در بین پژوهش‌گران هستند. افزون بر این، روش تلاقی‌های دای‌آلل نیز به‌عنوان یکی از طرح‌های ژنتیکی مطلوب برای انتخاب لاین‌ها و ژنوتیپ‌های والدینی مناسب به‌منظور دستیابی به هیبریدهای برتر معرفی شده است. ارزیابی ژنوتیپ‌ها از نظر قابلیت ترکیب‌پذیری در نسل‌های اولیه از گام‌های اساسی در تولید هیبریدهای مطلوب است. هدف از این مطالعه، ارزیابی شاخص‌های تحمل به تنش و تخمین ترکیب‌پذیری عمومی (GCA; General Combining Ability) و خصوصی (SCA; Specific Combining Ability) ژنوتیپ‌ها به‌منظور تعیین لاین‌ها و هیبریدهای برتر و متحمل به تنش گرما بود.

مواد و روش‌ها: مواد گیاهی این آزمایش، شش لاین و ۱۵ هیبرید حاصل از تلاقی‌های دای‌آلل یک‌طرفه آن‌ها (در مجموع ۲۱ تیمار) بود که در دو آزمایش مستقل، شامل تاریخ کاشت زود (۱۵ تیرماه، شرایط تنش گرمایی) و تاریخ کاشت توصیه‌شده (۱۵ مردادماه، شرایط بدون تنش) در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار مورد ارزیابی قرار گرفتند. آزمایش در مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی صفی‌آباد (دزفول، استان خوزستان)، در تابستان سال ۱۳۹۸ انجام شد. صفات اندازه‌گیری شده در این آزمایش شامل تعداد روز تا رسیدگی، عملکرد و اجزای عملکرد دانه بود. برای ارزیابی تحمل به گرما در لاین‌ها و هیبریدهای مورد مطالعه، از شاخص‌های تحمل و حساسیت به تنش و تجزیه به مولفه‌های اصلی (PCA) استفاده شد. ترکیب‌پذیری عمومی لاین‌ها و خصوصی هیبریدها نیز بر اساس عملکرد و اجزای عملکرد در شرایط بدون تنش و تنش گرما با استفاده از مدل اول روش دوم گریفینگ برآورد شد. کلیه تجزیه‌های آماری و ژنتیکی با استفاده از نرم‌افزارهای Minitab نسخه ۱۶ و Diallel-SAS انجام شد.

یافته‌های تحقیق: نتایج نشان داد که پنج شاخص میانگین بهره‌وری (MP)، میانگین هندسی بهره‌وری (GMP)، شاخص تحمل به تنش (STI)، میانگین هارمونیک (HA) و شاخص تحمل (TOL) همبستگی مثبت و معنی‌داری با عملکرد دانه در

هر دو شرایط بدون تنش و تنش گرما داشتند. از این‌رو، این شاخص‌ها به‌عنوان بهترین شاخص‌ها جهت گزینش ژنوتیپ‌های متحمل به گرما معرفی می‌شوند. با در نظر گرفتن نتایج حاصل از این شاخص‌ها و همچنین نتایج تجزیه به مولفه‌های اصلی و نمودار بای‌پلات، سه لاین C3-95-3، C3-95-9 و C3-95-10 و سه هیبرید C3-95-3×C3-95-9، C3-95-3×C3-95-10 و C3-95-9×C3-95-10 به‌عنوان ژنوتیپ‌های متحمل به تنش گرما شناسایی شدند. آثار SCA برای صفات عملکرد دانه، تعداد روز تا رسیدگی، تعداد ردیف دانه و تعداد دانه در ردیف در هیبریدهای C3-95-3×C3-95-9 و C3-95-3×C3-95-10 در هر دو شرایط بدون تنش و تنش گرما مثبت و معنی‌دار بود. با توجه به نتایج این آزمایش، لاین‌های C3-95-10، C3-95-9 و C3-95-3 علاوه بر تحمل به تنش گرما و عملکرد بهتر نسبت به سایر لاین‌ها در شرایط تنش گرما، توانایی انتقال این ویژگی‌ها به هیبریدها را نیز دارا بودند.

نتیجه‌گیری: نتایج این مطالعه نشان داد که از شاخص‌های تنش می‌توان به‌طور موثری برای غربال ژنوتیپ‌های متحمل به گرما استفاده کرد. لاین‌های منتخب می‌توانند به‌عنوان منابع بالقوه به‌منظور تولید ژنوتیپ‌های متحمل به تنش گرما در برنامه‌های اصلاحی مورد استفاده قرار گیرند. با توجه به معنی‌دار بودن آثار SCA برای صفات عملکرد دانه، تعداد دانه در ردیف و تعداد روز تا رسیدگی و نسبت پایین GCA/SCA نقش آثار غیرافزایشی ژن‌ها در کنترل این صفات مهم‌تر از آثار افزایشی بود. از آنجایی که برتری تلاقی به‌دلیل ارزش اصلاحی پایین، نمی‌تواند در مسیر گزینش قابل اطمینان باشد، بنابراین می‌توان از هتروزیس به‌واسطه آثار غیرافزایشی و غالبیت ژن‌ها در کنترل صفات مربوطه استفاده کرد و به تولید هیبریدهای مناسب امیدوار بود.

واژه‌های کلیدی: بای‌پلات، تجزیه به مولفه‌های اصلی، تلاقی‌های دای‌آلل، هتروزیس

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۰۹

نحوه استناد به این مقاله:

رجب‌قلعه، شیوا، خدارحم‌پور، زهرا، آفرینش، عزیز، و معتمدی، محمد. (۱۴۰۴). ارزیابی شاخص‌های تحمل و ترکیب‌پذیری عمومی و خصوصی والدین و هیبریدهای ذرت (*Zea mays* L.) تحت شرایط تنش گرما. *تحقیقات غلات*، *۱۵*(۳)، ۳۱۷-۳۰۳.
doi: 10.22124/CR.2025.31331.1875

مقدمه

امروزه، تنش گرما که بیش‌تر در مناطق گرم و خشک مشاهده می‌شود، یکی از بزرگ‌ترین چالش‌ها و نگرانی‌های تولید ذرت دانه‌ای است. گیاه ذرت به تنش گرما و دماهای بالا در مرحله گلدهی بسیار حساس است و دماهای بالا سبب عقیمی دانه گرده و به‌موازات آن، کاهش عملکرد دانه می‌شود (Azizi & Rahimi Moghaddam, 2020). اصلاح رقم‌های متحمل به گرما همیشه به‌عنوان یکی از اهداف ضروری در اصلاح پایدار گیاهان مدنظر بوده است (Abou-Elwafa & Amein, 2016).

شاخص‌های انتخاب عمدتاً بر اساس عملکرد ژنوتیپ‌ها تحت هر دو شرایط بدون تنش و تنش پیشنهاد شده‌اند (Rosielle & Hamblin, 1981). از جمله این شاخص‌ها می‌توان به شاخص‌های تحمل (TOL; Tolerance Index)، شاخص تحمل به تنش (STI; Stress Tolerance Index)، متوسط بهره‌وری (MP; Mean Productivity)، میانگین هارمونیک (HM; Harmonic Mean) و میانگین هندسی بهره‌وری (GMP; Geometric Mean Productivity) اشاره کرد. فرناندز (Fernandez, 1992) بیان داشت که مناسب‌ترین معیار انتخاب برای تنش از میان شاخص‌های تحمل، معیاری است که قادر به تشخیص گروه A (عملکرد بالا در شرایط تنش و نرمال) از سایر گروه‌ها باشد. در این راستا، شاخص تحمل به تنش (STI) را برای شناسایی رقم‌های گروه A ارایه کرد. مقدار بالای این شاخص برای یک ژنوتیپ نمایان‌گر تحمل به تنش بهتر و عملکرد بالقوه بیش‌تر آن ژنوتیپ است. شاخص دیگر میانگین هندسی بهره‌وری (GMP) است که قادر به تشخیص ژنوتیپ‌های گروه A از C (عملکرد بالا در شرایط تنش) می‌باشد. فیشر و مورر (Fischer & Maurer, 1978) شاخص حساسیت به تنش (SSI; Stress Susceptibility Index) را معرفی کردند. مقادیر کم شاخص SSI، تغییرات کم عملکرد را در شرایط تنش نسبت به شرایط بدون تنش نشان می‌دهد و در واقع بیانگر پایداری بیش‌تر ژنوتیپ است.

رحمان و همکاران (Rahman *et al*., 2022) با ارزیابی تحمل نه هیبرید ذرت در سه فصل در دو شرایط بدون تنش و تنش گرما گزارش کردند که شاخص‌های STI، MP، GMP و HA همبستگی مثبت و معنی‌دار با عملکرد دانه در هر دو شرایط نرمال و تنش دمای بالا داشتند. آن‌ها با استفاده از نمودار بای‌پلات، هیبریدهای متحمل به تنش گرما را شناسایی کردند. در آزمایش دیگری در پاکستان که برای شناسایی لاین‌های ذرت متحمل به گرما انجام شد، ۳۲ لاین تحت شرایط بدون تنش و تنش گرما مورد ارزیابی قرار گرفتند (Longmei *et al*., 2023). نتایج نشان داد که عملکرد دانه در شرایط بدون تنش دارای ارتباط مثبت و معنی‌دار با شاخص‌های TOL، MP، GMP و STI بود، در حالی‌که در شرایط تنش، ارتباط منفی و معنی‌دار با دو شاخص TOL و SSI و مثبت و معنی‌دار با سه شاخص MP، GMP و STI داشت. آن‌ها بر اساس داده‌های دو ساله و با استفاده از شاخص‌های MP، GMP و STI دو لاین را به‌عنوان متحمل‌ترین لاین‌ها به تنش گرما شناسایی کردند.

افزایش بهره‌وری ذرت با استفاده از منابع ژنتیکی جهت معرفی هیبریدهای با عملکرد کمی و کیفی مطلوب به‌منظور دستیابی به امنیت غذایی حائز اهمیت است (Hosseini *et al*., 2021). ارزیابی ترکیب‌پذیری لاین‌ها در نسل‌های اولیه از گام‌های اساسی در تولید هیبریدهای مطلوب به‌شمار می‌رود (Erfani Moghadam *et al*., 2023). ژرم‌پلاسم موجود ذرت باید از نظر عملکرد و سایر صفات تحت شرایط تنش بررسی شود تا ژنوتیپ‌های متحمل به‌عنوان منابع مطلوب برای توسعه هیبریدهای برتر مورد استفاده قرار گیرند (Riache *et al*., 2021). روش تلاقی‌های دای‌آلل یکی از ابزارهای مهم برای آگاهی از نحوه ترکیب‌پذیری و پیشرفت ژنتیکی در انتخاب صفات موثر بر عملکرد دانه و مقدمه برنامه‌های به‌نژادی است (Rahimi, 2019). شیری و ابراهیمی (Shiri & Ebrahimi, 2017) با مطالعه و ارز یابی ترکیب پذیری لا ین های ژرم‌پلا سم حاره‌ای و نی مه‌حاره‌ای سیمیت به نقش هر دو اثرات افزایشی و غیرافزایشی ژن ها در کن ترل عمل کرد دا نه و سایر صفات ا شاره کرد ند. ا جم و همکاران (Onejeme *et al*., 2020) با تلاقی دای‌آ لل چ هار لاین خالص ذرت گزارش کرد ند که ا ثرات ترکیب پذیری عمومی لاین‌ها برای همه صفات مورد مطال عه دارای م قادیر مثبت و منفی معنی‌دار بود، به‌طوری که لاین های با م قادیر ترکیب پذیری من فی و مع نی‌دار، ا ثر افزای شی کاه نده و لاین‌های با ترکیب‌پذیری مثبت و مع نی‌دار ، ا ثرات افزای شی افزاینده این صفات را می‌توانند به ن تاج خود انت قال ده ند و بنابراین با در نظر گرفتن رابطه این صفات با عمل کرد دا نه، می‌توان از آن ها ج هت به بود عمل کرد دا نه در برنا مه های

اصلاحی استفاده کرد. سویادی و همکاران (Suyadi *et al.* 2021) نیز با استفاده از تلاقی‌های دای‌آلل، میانگین مربعات ترکیب پذیری خصوصی عملکرد دانه را در ذرت معمولی‌دار گزارش کردند.

هدف از این مطالعه، ارزیابی شاخص‌های تحمل به تنش و تخمین ترکیب‌پذیری عمومی و خصوصی ژنوتیپ‌ها به‌منظور تعیین لاین‌ها و هیبریدهای برتر و متحمل به تنش گرما بود.

مواد و روش‌ها

مواد گیاهی این مطالعه، شش لاین و ۱۵ هیبرید ذرت حاصل از تلاقی‌های دای‌آلل یک‌طرفه آن‌ها (جدول ۱) بود که در تابستان سال ۱۳۹۸ در مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی صفی‌آباد دزفول ارزیابی شدند. این مرکز با ارتفاع ۸۲ متر از سطح دریا در عرض جغرافیایی ۳۲ درجه و ۲۲ دقیقه شمالی و طول ۴۸ درجه و ۲۳ دقیقه شرقی در جنوب غرب کشور و در ۱۸ کیلومتری دزفول واقع شده است. لاین‌های مورد مطالعه (اصلاح شده در مرکز تحقیقات کشاورزی صفی‌آباد)، از بین ۴۰ لاین ارزیابی شده در دو شرایط نرمال و تنش گرما طی دو سال انتخاب شدند.

لاین‌ها و هیبریدهای مورد مطالعه (۲۱ ژنوتیپ) در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در دو آزمایش مستقل، شامل تاریخ کاشت زودهنگام (۱۵ تیرماه، شرایط تنش) و تاریخ کاشت توصیه‌شده (۱۵ مردادماه، شرایط بدون تنش) کشت شدند. متوسط حداقل و حداکثر دمای مطلق هوای محل اجرای آزمایش در زمان گرده‌افشانی در تاریخ کاشت زود (شرایط تنش) به‌ترتیب ۲۹ و ۴۵ درجه سلسیوس و در تاریخ کاشت توصیه‌شده (شرایط بدون تنش) به‌ترتیب ۲۴ و ۳۸ درجه سلسیوس بود. بنابراین، گیاهان در تاریخ کاشت زودهنگام در مرحله گرده‌افشانی و لقاح تحت تاثیر تنش گرمایی قرار گرفتند. هر واحد آزمایشی شامل پنج خط کاشت به‌طول سه متر با فاصله بوته ۱۸ سانتی‌متر بود. عملیات زراعی در تمام مراحل کاشت، داشت و برداشت بر اساس توصیه‌های مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی انجام شد. تعداد روز تا رسیدگی با مشاهده رسیدگی دانه‌ها در ۵۰ درصد بوته‌های هر کرت ثبت شد. برای صفات مورفولوژیک (اجزای عملکرد)، میانگین ده بوته تصادفی از هر کرت اندازه‌گیری و ثبت شد. تعداد ردیف دانه و تعداد دانه در ردیف بر اساس میانگین ۱۰ بلال تصادفی و وزن هزار دانه بر حسب گرم در رطوبت ۱۴ درصد تعیین شد. برای تعیین عملکرد دانه و عملکرد زیستی (مجموع عملکرد دانه و کاه و کلش)، یک متر از اطراف کرت‌ها به‌عنوان حاشیه در زمان رسیدگی فیزیولوژیک دانه‌ها حذف و بوته‌های باقیمانده برداشت و توزین شدند. شاخص برداشت نیز از نسبت عملکرد دانه به عملکرد زیستی بر حسب درصد محاسبه شد. برای ارزیابی میزان تحمل لاین‌ها و هیبریدها به تنش گرما، شاخص‌های تحمل و حساسیت به تنش بر اساس روابط ارائه شده در جدول ۲ با استفاده از نرم‌افزار Minitab نسخه ۱۶ محاسبه شدند.

تجزیه دای‌آلل بر اساس مدل اول روش دوم گریفینگ (Griffing, 1956) تحت مدل خطی عمومی (رابطه ۱) با استفاده از بسته آماری Diallel-SAS (Zhang & Kang, 1997) نرم‌افزار SAS (SAS Institute, 2002) برآورد شد:

$$X_{ijkl} = \mu + \beta_i + g_j + g_k + s_{jk} + e_{ijkl} \qquad (1)$$

که در آن، X_{ijkl} عملکرد مشاهده شده، μ میانگین کل، βi اثر بلوک iام، g_j و g_k اثر ترکیب‌پذیری عمومی والدهای jام و kام، s_{jk} اثر ترکیب‌پذیری خصوصی تلاقی $j\times k$ و e_{ijkl} خطای آزمایش است.

جدول ۱- لاین‌های والدینی و هیبریدهای ذرت مطالعه شده در این آزمایش

Table 1. Maize parental lines and hybrids studied in this experiment

Code	Parent and hybrid	Code	Hybrid	Code	Hybrid
1	C3-95-3	13	C3-95-3×C3-95-10	26	C3-95-9×C6-95-5
2	C3-95-9	14	C3-95-3×C5-95-4	34	C3-95-10×C5-95-4
3	C3-95-10	15	C3-95-3×C5-95-12	35	C3-95-10×C5-95-12
4	C5-95-4	16	C3-95-3×C6-95-5	36	C3-95-10×C6-95-5
5	C5-95-12	23	C3-95-9×C3-95-10	45	C5-95-4×C5-95-12
6	C6-95-5	24	C3-95-9×C5-95-4	46	C5-95-4×C6-95-5
12	C3-95-3×C3-95-9	25	C3-95-9×C5-95-12	56	C5-95-12×C6-95-5

جدول ۲- شاخص‌های تحمل و حساسیت به تنش و فرمول‌های محاسبه آن‌ها

Table 2. Tolerance indices and their calculation formulas

Index	Formula †	Reference
Tolerance index	$TOL = Yp - Ys$	Rosielle & Hamblin (1981)
Stress susceptibility index	$SSI = \frac{1-\frac{Ys}{Yp}}{SI}$, $SI = 1-\frac{\overline{Ys}}{\overline{Yp}}$	Fisher & Maurer (1978)
Mean productivity	$MP = \frac{Yp+Ys}{2}$	Rosielle & Hamblin (1981)
Stress tolerance index	$STI = \frac{Yp.Ys}{(\overline{Yp})^2}$	Fernandez (1992)
Geometric mean productivity	$GMP = \sqrt{(Ys)(Yp)}$	Fernandez (1992)
Harmonic mean	$HM = \frac{2(Yp.Ys)}{(Yp+Ys)}$	Schneider *et al*. (1997)

† Yp and Ys are grain yield of each genotype under normal and stress conditions and $\overline{Yp}$ and $\overline{Ys}$ are average grain yield of all genotypes under normal and stress conditions, respectively.

نتایج و بحث

شاخص‌های تحمل و حساسیت به تنش

نتایج این آزمایش نشان داد که لاین‌های C3-95-3، C3-95-9 و C3-95-10 به‌همراه هیبریدهای C3-95-3× C3-95-9، C3-95-3×C3-95-10و C3-95-9×C3-95-10 که بالاترین میزان عملکرد را در هر دو شرایط بدون تنش و تنش گرما داشتند، دارای بالاترین مقادیر MP، GMP و HA نیز بودند و در مقابل، لاین‌های C5-95-4، C5-95-12 و C6-95-5 به‌همراه هیبریدهای C5-95-4×C5-95-5، C5-95-4×C6-95-12 و C5-95-12×C6-95-5 که در هر دو شرایط دارای کم‌ترین میزان عملکرد دانه بودند، به‌لحاظ این شاخص‌ها نیز کم‌ترین مقادیر را داشتند (جدول ۳).

شاخص میانگین بهره‌وری (MP) فقط در صورتی با عملکرد در شرایط تنش مرتبط است که شدت تنش کم و عملکرد در شرایط تنش سهم بالایی را در این شاخص داشته باشد. روزیل و هامبلین (Rosielle & Hamblin., 1981) اظهار داشتند که چون MP متوسط تولید در شرایط نرمال و تنش است، ممکن است با عملکرد در این شرایط مرتبط باشد. فرناندز (Fernandez., 1992) به این مطلب اشاره کرد که اگر اختلاف نسبی عملکرد در شرایط نرمال و تنش زیاد باشد، شاخص MP دارای اریبی به‌سمت گزینش بر مبنای عملکرد در شرایط نرمال خواهد بود. از نظر شاخص تحمل به تنش (STI)، لاین C5-95-12 به‌همراه هیبریدهای C3-95-3×C3-95-9، C3-95-3×C3-95-10و C3-95-9× C3-95-10 دارای بالاترین مقدار بودند. از آنجایی‌که مقدار بالای STI در تعیین لاین‌های متحمل به تنش مورد نظر است، بنابراین ژنوتیپ‌های انتخاب شده دارای وضعیت بهتری در مقایسه با سایر ژنوتیپ‌ها بودند. دو لاین C5-95-4 و C6-95-5 به‌همراه هیبریدهای C5-95-4×C5-95-12، C5-95-4×C6-95-5 و C5-95-12×C6-95-5 که دارای عملکرد پایین در هر دو شرایط بودند، کم‌ترین میزان STI را نیز نشان دادند (جدول ۳). بر خلاف شاخص‌های بالا، از نظر شاخص تحمل (TOL)، مقادیر بالا بیانگر حساسیت بیش‌تر ژنوتیپ مورد نظر به تنش می‌باشد و مقدار کم‌تر این شاخص برای به‌نژادگر مطلوب‌تر است. بنابراین، لاین‌های C5-95-4، C5-95-12 و C6-95-5 و هیبرید C3-95-9×C5-95-12 که از نظر شاخص تحمل دارای کم‌ترین مقدار بودند را می‌توان به‌عنوان ژنوتیپ‌های متحمل به گرما در نظر گرفت. از نظر حساسیت به تنش (SSI) نیز لاین C6-95-5 و هیبریدهای C3-95-3×C5-95-12 و C3-95-3×C6-95-5 بیش‌ترین میزان SSI را داشتند و ژنوتیپ‌های حساس به گرما بودند و در مقابل، لاین‌های C3-95-9 و C3-95-10 و هیبریدهای C3-95-3×C3-95-9، C5-95-4×C3-95-9 و C5-95-12×C3-95-9 کم‌ترین مقادیر SSI را نشان دادند و به‌عنوان ژنوتیپ‌های متحمل به تنش گرما در نظر گرفته شدند (جدول ۳).

جدول ۳- شاخص‌های تحمل به گرما در والدین و هیبریدهای ذرت

Table 6- Tolerance indices to heat in corn parents and hybrids

Parent & hybrid	Yp	Ys	MP	GMP	HA	TOL	SSI	STI
C3-95-3	4.20	2.20	3.20	3.04	2.89	2.00	1.13	0.21
C3-95-9	3.97	2.40	3.18	3.09	2.99	1.57	0.94	0.22
C3-95-10	3.60	2.20	2.90	2.81	2.73	1.40	0.93	0.18
C5-95-4	1.30	0.67	0.98	0.93	0.88	0.63	1.16	0.02
C5-95-12	1.30	0.70	1.00	0.95	0.91	0.60	1.10	0.67
C6-95-5	1.40	0.57	0.98	0.89	0.81	0.83	1.42	0.02
C3-95-3× C3-95-9	9.70	6.20	7.95	7.75	7.56	3.50	0.86	1.38
C3-95-3× C3-95-10	8.70	5.30	7.00	6.79	6.59	3.40	0.93	1.06
C3-95-3× C5-95-4	7.80	4.80	6.30	6.12	5.94	3.00	0.92	0.86
C3-95-3× C5-95-12	8.10	4.20	6.15	5.83	5.53	3.90	1.15	0.78
C3-95-3× C6-95-5	8.70	4.50	6.60	6.26	5.93	4.20	1.15	0.90
C3-95-9× C3-95-10	9.10	5.20	7.15	6.88	6.62	3.90	1.02	1.09
C3-95-9× C5-95-4	7.60	4.90	6.25	6.1	5.96	2.70	0.85	0.85
C3-95-9× C5-95-12	7.50	5.10	6.30	6.18	6.07	2.40	0.76	0.88
C3-95-9×C6-95-5	8.40	5.00	6.70	6.48	6.27	3.40	0.96	0.96
C3-95-10× C5-95-4	7.90	4.30	6.10	5.83	5.57	3.60	1.08	0.78
C3-95-10×C5-95-12	8.50	4.70	6.60	6.32	6.05	3.80	1.06	0.92
C3-95-10× C6-95-5	8.03	4.70	6.37	6.14	5.93	3.33	0.99	0.87
C5-95-4×C5-95-12	7.10	4.30	5.70	5.53	5.36	2.80	0.94	0.70
C5-95-4×C6-95-5	6.90	3.70	5.30	5.05	4.82	3.20	1.10	0.59
C5-95-12× C6-95-5	7.00	4.20	5.60	5.42	5.25	2.80	0.95	0.67

Yp, grain yield in normal conditions; Ys, grain yield in heat stress conditions; MP, mean productivity; GMP, geometric mean productivity; HA, Harmonic mean; TOL, tolerance index; SSI, stress susceptibility index; STI, stress susceptibility index.

بررسی ضرایب همبستگی نشان داد که شاخص‌های MP، GMP، HA، STI و TOL همبستگی مثبت و معنی‌داری با عملکرد دانه در هر دو شرایط بدون تنش و تنش گرما نشان دادند، در حالی‌که همبستگی بین SSI و عملکرد دانه در هر دو شرایط بدون تنش و تنش گرما منفی و معنی‌دار بود (نتایج ارائه نشده است). قمی و همکاران (Ghomi *et al*., 2022) با ارزیابی ۱۲۰ ژنوتیپ جو در دو شرایط بدون تنش و تنش گرما نشان دادند که شاخص‌های YI، STI، GMP و MP دارای بالاترین همبستگی مثبت و معنی‌دار با عملکرد دانه در هر دو شرایط بودند. رحمان و همکاران (Rahman *et al*., 2022) با ارزیابی تحمل نه هیبرید ذرت در سه فصل تحت دو شرایط بدون تنش و تنش گرما گزارش کردند که شاخص‌های STI، MP، GMP و HA همبستگی مثبت و معنی‌داری با عملکرد دانه در هر دو شرایط بدون تنش و تنش دمای بالا داشتند. در آزمایش دیگری در پاکستان، ۳۲ لاین ذرت تحت شرایط بدون تنش و تنش گرما مورد ارزیابی قرار گرفتند (Longmei *et al*., 2023). نتایج همبستگی‌ها نشان داد که تحت شرایط تنش گرما، ارتباط بین عملکرد دانه با شاخص‌های TOL و SSI منفی و معنی‌دار و با شاخص‌های MP، GMP و STI مثبت و معنی‌دار بود، در حالی‌که تحت شرایط بدون تنش، ارتباط مثبت و معنی‌داری بین عملکرد دانه با شاخص‌های MP، GMP، TOL و STI مشاهده شد.

به‌منظور گروه‌بندی ژنوتیپ‌ها و شناسایی لاین‌ها و هیبریدهای متحمل به گرما، از روش تجزیه به مولفه‌های اصلی بر اساس داده‌های حاصل از شاخص‌ها و عملکرد در دو شرایط بدون تنش و تنش گرما استفاده شد. نتایج نشان داد که دو مولفه اصلی اول و دوم به‌ترتیب ۸۸/۵ و ۱۰/۵ درصد و در مجموع ۹۹/۰ درصد از کل تغییرات موجود در داده‌ها را توصیف کردند (جدول ۴). به‌همین جهت نمودار بای‌پلات بر اساس دو مولفه اصلی اول و دوم رسم شد (شکل ۱). با توجه به این‌که دو مولفه مستقل از هم می‌باشند، از این‌رو هر یک از آن‌ها جنبه متفاوتی از اطلاعات را توصیف می‌کنند. نتایج نشان داد که مؤلفه اصلی اول همبستگی مثبت و بالایی با شاخص‌های MP، GMP، HA، STI و TOL داشت. از آنجایی‌که مقادیر بالای تمامی این شاخص‌ها به‌جز TOL

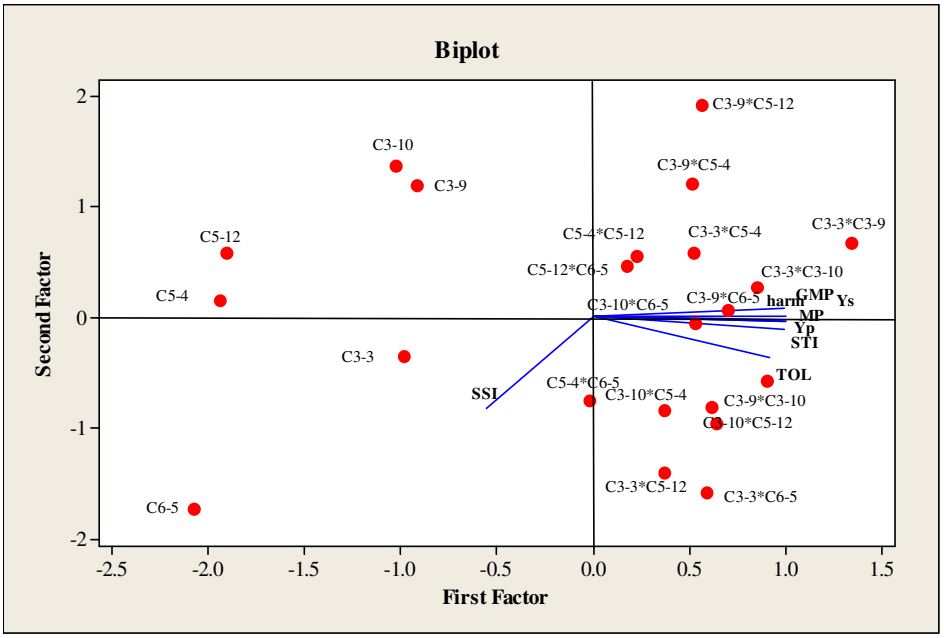
مطلوب است، بنابراین استفاده از مقادیر مثبت و بیش‌تر مؤلفه اول منجر به گزینش ژنوتیپ‌هایی می‌شود که دارای عملکرد بالا در هر دو شرایط بدون تنش و تنش گرما بودند. بر این اساس، مولفه اول را می‌توان مؤلفه پتانسیل عملکرد و متحمل به تنش گرما نام‌گذاری کرد. در مقابل، مؤلفه اصلی دوم دارای همبستگی منفی و بالا با شاخص SSI بود و از طرف دیگر، مقادیر کم‌تر شاخص SSI بیانگر پایداری است. از این‌رو، گزینش بر مبنای مقادیر بالاتر مؤلفه دوم نیز موجب گزینش ژنوتیپ‌های متحمل به گرما خواهد شد. به این ترتیب، قسمت مطلوب بای‌پلات ناحیه اول (قسمت بالا و سمت راست با مقادیر مثبت برای هر دو مولفه) است. بررسی بای‌پلات نشان داد که هیبریدهای C3-95-3×C3-95-9، C3-95-3×C3-95-10، C3-95-3×C5-95-4، C3-95-9× C5-95-4، C3-95-9×C5-95-12، C5-95-4×C5-95-12 و C5-95-12×C6-95-5 در این ناحیه قرار دارند (شکل ۱). رحمان و همکاران (Rahman *et al.*, 2022) با ارزیابی نه هیبرید ذرت در دو شرایط بدون تنش و تنش گرما طی سه فصل، از روش بای‌پلات استفاده و دو هیبرید YH-5507 و YH-5427 را به‌عنوان متحمل‌ترین هیبریدها به گرما معرفی کردند، در حالی‌که سه هیبرید YH-5532، P-1543 و NK-8711 در شرایط تنش دمای بالا در مقایسه با دمای معمولی عملکرد ضعیفی نشان دادند. لانگمی و همکاران (Longmei *et al.*, 2023) نیز برای شناسایی لاین‌های متحمل به گرما در ذرت، ۳۲ لاین را تحت دو شرایط دمای معمولی و تنش دمای بالا طی دو سال مورد ارزیابی قرار دادند و با استفاده از شاخص‌های MP، GMP و STI، لاین‌های DH_4_23 و DH_4_47 را به‌عنوان متحمل‌ترین لاین‌ها به گرما شناسایی کردند.

جدول ۴- مقادیر ویژه و بردارهای ویژه برای شاخص‌های تحمل و حساسیت به گرما در والدین و هیبریدهای ذرت

Table 4. Eigen values and eigen vectors for indices of sensitivity and tolerance to heat in corn parents and hybrids

Principal component	Y_P	Y_S	MP	GMP	HA	TOL	SSI	STI	Eigen value	Variance (%)	Cumulative variance (%)
First	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.91	-0.55	0.98	7.08	88.50	88.50
Second	-0.11	0.07	-0.04	-0.02	0.01	-0.37	-0.83	-0.04	1.84	10.50	99.00

Yp, grain yield in normal conditions; Ys, grain yield in heat stress conditions; MP, mean productivity; GMP, geometric mean productivity; HA, Harmonic mean; TOL, tolerance index; SSI, stress susceptibility index; STI, stress susceptibility index.



شکل ۱- نمایش بای‌پلات والدین و هیبریدهای ذرت بر اساس اولین و دومین مولفه اصلی حاصل از شاخص‌های تحمل و حساسیت به گرما

Figure 1. Biplot diagram of maize parents and hybrids based on first and second principal components from tolerance and sensitivity indices to heat stress

ترکیب‌پذیری عمومی و خصوصی

نتایج حاصل از تجزیه واریانس دای‌آلل به‌روش دوم گریفینگ نشان داد که اثرات ترکیب‌پذیری عمومی (GCA) برای صفات عملکرد دانه، شاخص برداشت و تعداد ردیف دانه در بلال در هر دو شرایط بدون تنش و تنش گرما و برای وزن هزار دانه در شرایط تنش گرما از نظر آماری معنی‌دار بود. در مقابل برای اثرات ترکیب‌پذیری خصوصی (SCA) هیبریدها، تفاوت آماری معنی‌داری برای تمامی صفات در هر دو شرایط بدون تنش و تنش گرما (به‌جز تعداد دانه در ردیف در شرایط تنش) مشاهده شد (جدول ۵). این نتایج بیانگر نقش هر دو نوع اثرات افزایشی و غیرافزایشی ژن‌ها در کنترل این صفات در هر دو شرایط بدون تنش و تنش گرما می‌باشد. از طرف دیگر، نسبت GCA/SCA برای صفات عملکرد دانه، تعداد دانه در ردیف و تعداد روز تا رسیدگی در هر دو شرایط بدون تنش و تنش گرما پایین بود که اهمیت بیش‌تر اثرات غیرافزایشی نسبت به افزایشی ژن‌ها را در کنترل این صفات نشان داد (جدول ۵). نتایج مطالعه خدارحم‌پور و چوکان (Khodarahmpour & Choukan, 2011) در تجزیه ژنتیکی تحمل به گرما در ذرت، نسبت پایین GCA/SCA را برای عملکرد دانه در شرایط نرمال و تعداد دانه در ردیف در هر دو شرایط نرمال و تنش نشان داد که حاکی از سهم بیش‌تر اثرات غیرافزایشی است، در حالی‌که برای عملکرد دانه در شرایط گرما و وزن هزار دانه در هر دو شرایط نرمال و تنش، این نسبت بالا و بیانگر سهم بیش‌تر اثرات افزایشی ژن‌ها بود. در بررسی نحوه کنترل ژنتیکی صفات مختلف از جمله عملکرد دانه در ذرت، واتو و همکاران (Wattoo *et al*., 2014) سهم بیش‌تر اثرات افزایشی ژن‌ها و کریم و همکاران (Karim *et al*., 2018) سهم بیش‌تر اثرات غیرافزایشی ژن‌ها را در کنترل اکثر صفات گزارش کردند، در حالی‌که اسماعیل و همکاران (Ismail *et al*., 2019)، نقش هر دو نوع اثرات افزایشی و غیرافزایشی را در کنترل بیش‌تر صفات ذرت مهم عنوان کردند. نتایج مطالعه حاضر با گزارش‌های رحیمی (Rahimi, 2019) و رحمان و همکاران (Rohman *et al*., 2019) که نسبت GCA/SCA پایینی را برای صفات عملکرد دانه، وزن هزار دانه و تعداد دانه در ردیف به‌دست آوردند، مطابقت داشت. در مقابل، آنتونی جان و همکاران (Antony John *et al*., 2024) نسبت واریانس افزایشی به غالبیت را به‌جز تعداد ردیف دانه در بلال که بزرگ‌تر از یک به‌دست آوردند، برای سایر صفات از جمله عملکرد دانه نزدیک به صفر گزارش کردند که نشان‌دهنده نقش بیش‌تر عمل غیرافزایشی ژن‌ها در کنترل ژنتیکی این صفات است. از جمله دلایل این تفاوت‌ها در نتایج آزمایش‌های مختلف را می‌توان به تفاوت در والدین مورد مطالعه و شرایط محیطی اجرای آزمایش نسبت داد.

مقدار ترکیب‌پذیری عمومی (GCA) و خصوصی (SCA) لاین‌ها (والدها) و هیبریدهای حاصل از تلاقی آن‌ها در جدول ۶ ارائه شده است. نتایج نشان داد که لاین‌های متحمل به گرما دارای اثرات GCA مثبت و لاین‌های حساس به گرما دارای اثرات GCA منفی برای صفات مورد مطالعه بودند. لاین‌های C3-95-9 و C3-95-3 (هر دو متحمل به گرما) اثرات GCA مثبت و معنی‌دار برای صفات عملکرد دانه، شاخص برداشت و تعداد ردیف دانه در بلال در هر دو شرایط بدون تنش و تنش گرما و لاین‌های C5-95-4، C5-95-12 و C6-95-5 (حساس به گرما) اثرات GCA منفی و معنی‌دار برای صفات عملکرد دانه و شاخص برداشت در هر دو شرایط بدون تنش و تنش نشان دادند. این نتایج بیانگر کنترل این صفات توسط اثر افزایشی ژن‌ها است، به این معنی که والدین مذکور پتانسیل انتقال اثرات افزایشی کاهنده یا افزاینده این صفات را به نتاج خود دارند. بنابراین، از این لاین‌ها با در نظر گرفتن رابطه صفات مربوطه با عملکرد دانه، می‌توان به‌منظور بهبود عملکرد دانه در برنامه‌های به‌نژادی استفاده کرد.

دامنه تغییرات GCA برای عملکرد دانه در شرایط تنش گرما بین ۰/۴۲- تا ۰/۵۸ و در شرایط بدون تنش بین ۰/۷۲- تا ۰/۷۱ بود (جدول ۶). تمامی والدها، به‌جز C3-95-10، در هر دو شرایط بدون تنش و تنش گرما دارای GCA مثبت یا منفی معنی‌دار بودند. بنابراین، تنوع بسیار زیادی بین لاین‌ها از نظر GCA مشاهده شد که نشان‌دهنده امکان افزایش عملکرد دانه از طریق تهیه هیبریدهای متنوع با بهره‌گیری از اثرات افزایشی ژن‌ها و گزینش در نسل‌های بعدی است. از طرف دیگر، سه لاین C5-95-4، C5-95-12 و C6-95-5 که حساس به گرما بودند و کم‌ترین میزان عملکرد دانه را در هر دو شرایط بدون تنش و تنش گرما تولید کردند، GCA منفی و معنی‌داری در هر دو شرایط داشتند و بنابراین دارای اثر افزایشی کاهنده برای عملکرد در تلاقی‌های خود بودند. عزیزدوست و همکاران (Azizdoost *et al*., 2023) نیز تنوع قابل توجه و معنی‌داری در ترکیب‌پذیری عمومی و

خصوصی لاین‌ها و هیبریدهای ذرت مشاهده کردند و آن را دلیلی بر نقش هر دو نوع اثرات افزایشی و غیرافزایشی ژن‌ها در کنترل عملکرد دانه در ذرت دانستند.

بررسی ترکیب‌پذیری خصوصی (SCA) هیبریدهای مربوطه نشان داد که هیبرید C3-95-10×C3-95-9 برای صفات عملکرد دانه و تعداد ردیف دانه در بلال در هر دو شرایط بدون تنش و تنش گرما SCA مثبت و معنی‌داری را نشان داد. این هیبرید از عملکرد دانه مطلوبی نیز برخوردار بود. اثرات SCA نشان‌دهنده انحراف غالبیت و انحراف اثر متقابل است. بنابراین، در صورتی‌که SCA دلیل اصلی برتری یک تلاقی باشد، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که این تلاقی ارزش اصلاحی پایینی دارد و برتری آن احتمالاً نمی‌تواند در مسیر گزینش قابل اطمینان باشد و بهتر است از هتروزیس به‌واسطه اثرات غیرافزایشی و غالبیت ژن‌ها در کنترل صفات مربوطه می‌توان استفاده کرد و به تولید هیبریدهای مناسب امیدوار بود. ابوعلی و همکاران (Abuali *et al*., 2012) عنوان کردند که اغلب تلاقی‌های برتر، حاصل تلاقی والدین با GCA قوی × ضعیف، قوی × قوی و قوی × متوسط هستند. آن‌ها پیشنهاد کردند که برای دست‌یابی به یک هیبرید با ترکیب‌پذیری خصوصی مطلوب لازم است حداقل یکی از والدین دارای ترکیب‌پذیری عمومی مطلوب باشد. در مطالعه حاضر نیز دو والد C3-95-3 و C3-95-9 که متحمل به گرما و از اثرات GCA مطلوب و معنی‌داری برای اغلب صفات برخوردار بودند، هیبریدهای قوی تولید کردند (جدول ۶). به عبارت دیگر، تلاقی بین والدهای قوی×قوی یا قوی×متوسط برای این صفات منجر به تولید هیبرید قوی شد و والدها این صفت را به نتاج خود منتقل کردند. برای صفت عملکرد دانه، در شرایط بدون تنش تمامی تلاقی‌ها و در شرایط تنش گرما یازده تلاقی از پانزده تلاقی حاصله SCA مثبت و معنی‌داری داشتند (جدول ۶)، که بیانگر تنوع زیاد این صفت و اثرات غیرافزایشی ژن‌ها در کنترل آن است. رحمان و همکاران (Rahman *et al*., 2013) نیز تنوع بالایی در تلاقی‌های ذرت مشاهده و عنوان کردند که ۴۸/۸۹ درصد از تلاقی‌های حاصل SCA مطلوبی برای عملکرد دانه داشتند.

در شرایط تنش گرما، هیبرید C3-95-9×C3-95-3 با ۶/۲ تن در هکتار، بیش‌ترین عملکرد دانه را به‌خود اختصاص داد. والدین مشارکت‌کننده در این تلاقی (والدهای C3-95-3 و C3-95-9) دارای GCA مثبت و معنی‌دار در هر دو شرایط بودند. GCA معنی‌دار والدین و SCA معنی‌دار هیبریدها به‌ترتیب بیانگر نقش ژن‌های افزایشی و غیرافزایشی و نسبت پایین GCA/SCA (جدول ۵)، بیانگر سهم بیش‌تر ژن‌های غیرافزایشی در کنترل این صفت است. بیش‌ترین وزن هزار دانه در شرایط بدون تنش (۳۸۷/۳ گرم) به هیبرید C3-95-9×C3-95-3 تعلق داشت (در جدول ارائه نشد)، و این هیبرید دارای SCA مثبت و معنی‌داری نیز بود (جدول ۶). لذا می‌توان از پتانسیل SCA مثبت این هیبرید برای افزایش وزن هزار دانه با بهره‌گیری از اثرات غیرافزایشی و هتروزیس استفاده کرد. برای این صفت، تنها والد C3-95-9 در شرایط بدون تنش دارای GCA مطلوب و قوی بود. به‌عبارت دیگر، یک والد ترکیب‌شونده خوبی بوده و این هیبرید حاصل تلاقی لاین‌های با GCA قوی × متوسط بود (جدول ۶). بیش‌ترین وزن هزار دانه در شرایط تنش گرما در هیبریدهای C3-95-9×C3-95-3، C3-95-10×C3-95-9 و C3-95-10×C3-95-3 مشاهده شد که هیچ‌کدام SCA معنی‌داری نداشتند. گاهی به‌دنبال اثرات متقابل خاص در هیبریدهایی با والدین ضعیف×ضعیف، ترکیبات برتری نسبت به والدین قوی×قوی و قوی×ضعیف به‌دست می‌آید که دلیل برتری این ترکیبات می‌تواند اثرات بالای غیرافزایشی ژن‌ها باشد. ابوعلی و همکاران (Abuali *et al*., 2012) دلیل تولید هیبریدهای برتر با حضور ترکیب‌شونده‌های والدینی ضعیف (ضعیف × ضعیف) را حاصل عمل فوق‌غالبیت یا اپیستازی ژن‌های کنترل‌کننده صفت عنوان کردند.

برای صفت شاخص برداشت در هر دو شرایط بدون تنش و تنش گرما، اثرات SCA مثبت و معنی‌دار در هیبریدهای C5-95-4×C5-95-12، C5-95-4×C6-95-5 و همچنین C5-95-12×C6-95-5 مشاهده شد (جدول ۶). والدهای مشارکت‌کننده در این هیبریدها GCA منفی و معنی‌دار داشتند، در حالی‌که هیبریدهای مذکور دارای SCA مثبت و معنی‌دار بودند. معمولاً ترکیب‌شونده‌های قوی × ضعیف و متوسط × ضعیف دارای ترکیبات برتر هستند و ترکیبات حاصل از آن‌ها دارای اثر متقابل آلل‌های مثبت از یک والد ترکیب‌شونده قوی یا متوسط با آلل‌های منفی از والد ترکیب‌شونده ضعیف می‌باشند. SCA مثبت و معنی‌دار برای صفات مهم ذرت توسط ایکبال و همکاران (Iqbal *et al*., 2007) نیز گزارش شده است.

جدول ۵- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) ترکیب‌پذیری عمومی و خصوصی به‌روش دوم گریفینگ در شرایط بدون تنش و تنش گرما

Table 5. Analysis of variance (mean squares) of general and specific combining ability by second method of Griffing in non-stress and heat stress conditions

Source of variation	df	Grain yield		Harvest index		Days to maturity		No. of rows		No. of grains per row		1000-grain weight	
		Stress	Normal	Stress	Normal	Stress	Normal	Stress	Normal	Stress	Normal	Stress	Normal
GCA	5	1.56**	3.49**	241.3**	172.3**	23.9 ^{ns}	13.2 ^{ns}	9.8*	8.75*	21.3 ^{ns}	30.4 ^{ns}	3285*	4961 ^{ns}
SCA	15	3.2**	8.57**	8.57**	47.8*	33.7*	19.5*	6.25*	6.76*	27.2 ^{ns}	35.5*	3300*	5543*
Error	20	0.39	0.68	0.68	14.6	10.2	6.3	2.5	2.4	16.6	16.6	1172.4	2043
GCA/SCA	-	0.49	0.41	0.41	5.05	0.71	0.67	1.56	1.29	0.85	0.85	1.42	0.89

^{ns}, * and ** Not-significant and significant at 5% and 1% probability levels, respectively.

جدول ۶- ترکیب‌پذیری عمومی و خصوصی والدها و هیبریدها با استفاده از روش دوم گریفینگ تحت شرایط بدون تنش و تنش گرما

Table 6. General and specific combining ability of parents and hybrids using second method of Griffing under non-stress and heat stress conditions

Line/Hybrid	Grain yield		Harvest index		Days to maturity		No. of rows		No. of grains per row		1000-grain weight	
	Stress	Normal	Stress	Normal	Stress	Normal	Stress	Normal	Stress	Normal	Stress	Normal
C3-95-3	0.35*	0.73**	4.2**	4.8**	2.45*	0.2 ^{ns}	1.2**	1.6**	0.9 ^{ns}	1.6 ^{ns}	14.6 ^{ns}	16.2 ^{ns}
C3-95-9	0.58**	0.58**	5.1**	4.6**	0.7 ^{ns}	-0.4 ^{ns}	0.8*	0.6*	1.7**	2.6**	13.4 ^{ns}	35.2**
C3-95-10	0.25 ^{ns}	0.48**	5.7**	3.0**	1.2 ^{ns}	-0.6 ^{ns}	0.9*	0.3 ^{ns}	0.2 ^{ns}	-1.1 ^{ns}	25.9**	5.8 ^{ns}
C5-95-4	-0.41**	-071**	-4.7**	-2.6**	-1.2 ^{ns}	-1.1 ^{ns}	-0.4 ^{ns}	-0.4 ^{ns}	-0.8 ^{ns}	-0.8 ^{ns}	-14.3 ^{ns}	-33.1**
C5-95-12	-0.34*	-0.60**	-4.45**	-5.3**	-2.1*	-0.5 ^{ns}	-0.9**	-1.1**	-1.1 ^{ns}	0.6 ^{ns}	-19.6*	-21.4**
C6-95-5	-0.42**	-0.47**	-5.73**	-4.5**	-1.1 ^{ns}	2.5**	-1.5**	-0.9**	-1.0 ^{ns}	-2.9**	-20.2**	2.7 ^{ns}
C3-95-3× C3-95-9	1.5**	1.9**	3.6 ^{ns}	5.1 ^{ns}	7.4**	6.7**	4.4**	4.3**	4.9**	5.7**	24.4 ^{ns}	59.4*
C3-95-3× C3-95-10	0.9*	0.9**	3.1 ^{ns}	4.9**	8.5**	5.9**	2.8**	2.6**	11.5**	8.6**	31.9 ^{ns}	75.1**
C3-95-3× C5-95-4	1.1**	1.2**	-1.2 ^{ns}	5.9**	-2.8 ^{ns}	0.4 ^{ns}	4.1**	0.6 ^{ns}	0.5 ^{ns}	0.7 ^{ns}	7.8 ^{ns}	40.5 ^{ns}
C3-95-3× C5-95-12	0.4 ^{ns}	1.5**	2.8 ^{ns}	-2.1 ^{ns}	-3.2 ^{ns}	2.3 ^{ns}	-0.7 ^{ns}	-0.6 ^{ns}	-0.9 ^{ns}	2.4 ^{ns}	4.1 ^{ns}	35.6 ^{ns}
C3-95-3× C6-95-5	0.8*	1.9**	-1.4 ^{ns}	-2.9 ^{ns}	-1.8 ^{ns}	-3.4 ^{ns}	-2.2 ^{ns}	-1.2 ^{ns}	2.4 ^{ns}	1.1 ^{ns}	24.6 ^{ns}	46.8*
C3-95-9× C3-95-10	0.6 ^{ns}	1.6**	0.6 ^{ns}	1.6 ^{ns}	12.9 ^{ns}	-3.6 ^{ns}	2.2*	3.6**	2.0 ^{ns}	7.7**	6.5 ^{ns}	42.6 ^{ns}
C3-95-9× C5-95-4	0.9*	1.2**	3.7 ^{ns}	-1.7 ^{ns}	-0.4 ^{ns}	1.5 ^{ns}	0.9 ^{ns}	-0.4 ^{ns}	-0.2 ^{ns}	-3.2 ^{ns}	3.3 ^{ns}	1.4 ^{ns}
C3-95-9× C5-95-12	1.1**	1.0**	2.7 ^{ns}	-0.4 ^{ns}	-1.4 ^{ns}	-0.8 ^{ns}	-0.3 ^{ns}	-0.9 ^{ns}	-1.9 ^{ns}	8.3**	41.9 ^{ns}	42.9 ^{ns}
C3-95-9×C6-95-5	1.0**	1.8**	2.9 ^{ns}	0.8 ^{ns}	-5.4 ^{ns}	-0.9 ^{ns}	-0.4 ^{ns}	0.2 ^{ns}	2.7 ^{ns}	4.5 ^{ns}	45.9*	-12.3 ^{ns}
C3-95-10× C5-95-4	0.7 ^{ns}	1.6**	3.3 ^{ns}	0.3 ^{ns}	-3.2 ^{ns}	0.3 ^{ns}	-0.4 ^{ns}	1.3 ^{ns}	3.5 ^{ns}	1.4 ^{ns}	7.5 ^{ns}	77.7**
C3-95-10×C5-95-12	0.9*	2.1**	-1.1 ^{ns}	0.2 ^{ns}	-1.6 ^{ns}	5.1*	-0.5 ^{ns}	-0.6 ^{ns}	-3.5 ^{ns}	-3.7 ^{ns}	52.8*	6.6 ^{ns}
C3-95-10× C6-95-5	1.1**	1.5**	1.9 ^{ns}	0.2 ^{ns}	-0.9 ^{ns}	-4.6*	-0.3 ^{ns}	-1.5 ^{ns}	-3.2 ^{ns}	3.1 ^{ns}	40.2 ^{ns}	67.3**
C5-95-4×C5-95-12	1.2**	1.9**	5.1*	8.2**	1.4 ^{ns}	-0.4 ^{ns}	-1.2 ^{ns}	1.4 ^{ns}	-5.4**	-1.4 ^{ns}	39.1 ^{ns}	5.2 ^{ns}
C5-95-4×C6-95-5	0.7 ^{ns}	1.6**	13.1**	5.4**	2.5 ^{ns}	-2.1 ^{ns}	-0.7 ^{ns}	-2.8**	1.5 ^{ns}	-0.3 ^{ns}	32.2 ^{ns}	26.0 ^{ns}
C5-95-12× C6-95-5	1.2**	1.6**	6.9**	9.2**	0.1 ^{ns}	0.1 ^{ns}	-0.1 ^{ns}	-0.7 ^{ns}	-1.5 ^{ns}	-2.9 ^{ns}	58.8**	27.7 ^{ns}
SCA (SE)	0.39	0.3	2.39	1.63	1.37	1.99	0.99	0.80	2.34	2.36	21.46	23.3

^{ns}, * and ** Not-significant and significant at 5% and 1% probability levels, respectively.

نتیجه‌گیری کلی

انتخاب ژنوتیپ‌ها بر مبنای شاخص‌های مختلف تحمل و حساسیت به تنش منجر به انتخاب ژنوتیپ‌های متفاوتی می‌شود. به‌طور کلی، شاخص‌هایی که با عملکرد در هر دو شرایط بدون تنش و تنش همبستگی بالایی داشته باشند، به‌عنوان بهترین شاخص‌ها محسوب می‌شوند. نتایج این مطالعه نشان داد که شاخص‌های تحمل و حساسیت به تنش به‌طور موثری می‌توانند برای غربال ژنوتیپ‌های متحمل به گرما در ذرت استفاده شوند. در این مطالعه، شاخص‌های MP، GMP، HA، STI و TOL به‌عنوان بهترین شاخص‌ها تعیین شدند. نتایج حاصل از بهترین شاخص‌ها، تجزیه به مولفه‌های اصلی و بای‌پلات منجر به انتخاب ژنوتیپ‌های متفاوتی شد، اما به‌طور مشترک سه لاین C3-95-3، C3-95-9 و C3-95-10 و همچنین سه هیبرید C3-95-3×C3-95-9، C3-95-3×C3-95-10 و C3-95-9×C3-95-10 در همه روش‌ها به‌عنوان لاین‌ها و هیبریدهای برتر و متحمل به گرما شناسایی شدند. همچنین، وجود تنوع بین ژنوتیپ‌ها برای GCA و SCA نشان داد که امکان گزینش ژنوتیپ‌های برتر جهت افزایش عملکرد دانه در هر دو شرایط بدون تنش و تنش گرما وجود دارد. از سوی دیگر، معنی‌داربودن SCA برای صفات عملکرد دانه، تعداد دانه در ردیف و روز تا رسیدگی و نیز نسبت پایین GCA/SCA، نقش بیش‌تر اثرات غیرافزایشی ژن‌ها را در کنترل این صفات نشان داد. بنابراین، ابتدا می‌توان با انتخاب ژنوتیپ‌های برتر از اثرات افزایشی ژن‌ها و در ادامه با تلاقی ژنوتیپ‌های برتر از اثرات غیرافزایشی ژن‌ها و پدیده هتروزیس استفاده کرد. در مجموع، نتایج این مطالعه نشان داد که سه لاین C3-95-3، C3-95-9 و C3-95-10 علاوه بر تولید عملکرد بیش‌تر نسبت به سایر لاین‌ها تحت شرایط تنش گرما، توانایی انتقال این ویژگی به هیبریدها را نیز داشتند و بنابراین می‌توان از آن‌ها به‌عنوان منابع بالقوه برای بهبود تحمل به تنش گرما در برنامه‌های به‌نژادی ذرت استفاده کرد.

سپاسگزاری

بدین وسیله از پرسنل مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی صفی‌آباد دزفول تشکر و قدردانی می‌شود.

تضاد منافع

نویسندگان تایید می‌کنند که این تحقیق در غیاب هر گونه روابط تجاری یا مالی که می‌تواند به‌عنوان تضاد منافع بالقوه تعبیر شود، انجام شده است.

رعایت اخلاق در نشر

نویسندگان اعلام می‌کنند که در نگارش این مقاله به‌طور کامل از اخلاق نشر از جمله سرقت ادبی، سوء رفتار، جعل داده‌ها و انتشار دوگانه، پیروی کرده‌اند. همچنین، این مقاله حاصل یک کار تحقیقاتی اصیل بوده و تا کنون به‌طور کامل به هیچ زبانی و در هیچ نشریه یا همایشی چاپ و منتشر نشده است و هیچ اقدامی نیز برای انتشار آن در هیچ نشریه یا همایشی صورت نگرفته و نخواهد گرفت.

اجازه انتشار مقاله

نویسندگان با چاپ این مقاله به‌صورت دسترسی باز موافقت کرده و کلیه حقوق استفاده از محتوا، جدول‌ها، شکل‌ها، تصویرها و غیره را به ناشر واگذار می‌کنند.

References

Abou-Elwafa, S. F., & Amein, K. A. (2016). Genetic diversity and potential high temperature tolerance in barley (*Hordeum vulgare* L.). *World Journal of Agricultural Research*, *4*(1), 1-8. doi: 10.12691/wjar-4-1-1.

Abuali, A. I., Abdelmulla, A. A., Khallafala, M. M., Adris, A. E., & Osman, A. M. (2012). Combining ability and heterosis for yield and yield components in maize (*Zea mays* L.). *Australian Journal of Basic & Applied Sciences*, *6*(10), 36-41.

Antony John, B., Kachapur R. M., Naidu, G., Talekar, S. C., Rashid, Z., Vivek, B. S., Patne, N., Salakinkop, S. R., & Gu, P. (2024). Maternal effects, reciprocal differences and combining ability study for yield and its component traits in maize (*Zea mays* L.) through modi-fied diallel analysis. *Peer Journal*, 12, e17600. doi: 10.7717/peerj.17600.

Azizdoost, H., Shiri, M. R., & Dezhsetan, S. (2024). The performance of temperate maize testers for screening tropical and subtropical germplasm. *Cereal Research*, *13*(4), 367-384. [In Persian]. doi: 10.22124/cr.2024.26326.1802.

Azizi, K., & Rahimi-Moghaddam, S. (2020). Simulating the risk of heat stress on grain maize production under arid and semi arid conditions. *Environmental Sciences*, *18*(3), 85-106. [In Persian]. doi: 10.29252/envs.18.3.85.

Erfani Moghadam, Z., Fotovat, R., Mohseni Fard, E., & Rodriguez, V. (2023). Genetic analysis of grain yield and related traits in maize (*Zea mays* L.) using graphical diallel analysis. *Cereal Research*, *13*(2), 129-143. [In Persian]. doi: 10.22124/cr.2023.24880.1774.

Fernandez, G. C. J. (1992). Effective selection criteria for assessing plant stress tolerance. Proceedings of the International Symposium on Adaptation of Vegetables and Other Food Crops in Temperature and Water Stress. 13-16 Aug., Shanhua, Taiwan. pp. 275-270. doi: 10.22001/wvc.72511.

Fischer, R. A., & Maurer, R. (1978). Drought resistance in spring wheat cultivars. I. Grain yield responses. *Australian Journal of Agricultural Research*, *29*(5), 897-912. doi: 10.1071/AR9780897.

Griffing, B. (1956). Concept of general and specific combining ability in relation to diallel crossing systems. *Australian Journal of Biological Sciences*, *9*(4), 463-493. doi: 10.1071/BI9560463.

Ghomi, Kh., Rabiei, B., Sabouri, H., & Gholamali Puralamdari, E. (2023). Evaluation of late season heat in barely genotypes using some susceptibility and tolerance indices. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, *15*(4), 1091-1108. [In Persian]. doi: 10.22077/escs.2021.4207.1993.

Hosseini, S. M. S., Mostafavi, K., Shiri, M., Mohammadi, A., & Miri, S. M. (2021). Genetically analysis of grain yield and some agro-morphological characteristics of selected early maturity maize lines using diallel analysis. *Cereal Research*, *11*(3), 269-280. [In Persian]. doi: 10.22124/cr.2021.20851.1694.

Iqbal, A. M., Nehvi, F. A., Wani, S. A., Qadir, R., & Zahoor, A. D. (2007). Combining ability analysis for yield and yield related traits in maize. *International Journal of Plant Breeding & Genetics*, *1*(2), 101-105. doi: 10.3923/ijpbg.2007.101.105.

Ismail, M. A., El-Hosary, A., El-Badawy, M., & Abdallah, T. A. E. (2019). Diallel analysis for yield and component traits in maize (*Zea mays* L.) under infestation and non-infestation with pink stem borer. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, *89*(11), 1953-1958. doi: 10.56093/ijas.v89i11.95351.

Karim, A., Ahmed, S., Akhi, A., Talukder, M., & Mujahidi, T. (2018). Combining ability and heterosis study in maize (*Zea mays* L.) hybrids at different environments in Bangladesh. *Bangladesh Journal of Agricultural Research*, *43*, 125-134. doi: 10.3329/bjar.v43i1.36186.

Khodarahmpour, Z., & Choukan, R. (2011). Genetic variation of maize (*Zea mays* L.) inbred lines in heat stress condition. *Seed & Plant Improvement Journal*, *27*(4), 539-554. [In Persian]. doi: 10.22092/spij.2017.111081.

Longmei, N., Gill, G. K., Kumar, R., & Zaidi, P. H. (2023). Selection indices for identifying heat tolerant of maize (*Zea mays* L.). *Indian Journal of Agricultural Sciences*, *93*(1), 46-50. doi: 10.56093/ijas.v93i1.108617.

Onejeme, F. C., Okporie, E. O., & Eze, C. E. (2020). Combining ability and heterosis in diallel analysis of maize (*Zea mays* L.) lines. *International Annals of Science*, *9*(1), 188-200. doi: 10.21467/ias.9.1.188-200.

Rahimi, M. (2019). Genetic analysis of grain yield and its components of maize in lines and F_2 progenies using diallel analysis by Hayman's graphical approach. *Cereal Research*, *9*(2), 169-177. [In Persian]. doi: 10.22124/c.2019.13798.1505.

Rahman, H., Arifuddin, Z., Shah, S. M., Shah, A., Iqbal, M., & Khalil, I. H. (2013). Evaluation of maize in test cross combinations, flowering and morphological traits. *Pakistan Journal of Botany*, *42*(3), 1619-1627.

Rahman, S. U., Yousaf, M. I., Hussain, M., Hussain, K., Hussain, S., Bhatti, M. H., Hussain, D., Ghani, A., Razaq, A., Akram, I., Ibrar, M. S., Ahmad, S. A., Kohli, A., & Siddiq, M. A. (2022). Evaluation of local and ultinational maize hybrids for tolerance against high temperature using stress tolerance indices. *Pakistan Journal of Agricultural Research*, *35*(1), 36-46. doi: 10.17582/journal.pjar/2022/35.1.36.46.

Riache, M. M., Revilla, P., Oula Maafi, O., Malvar, R. A., & Djemel, A. (2021). Combining ability and heterosis of Algerian saharan maize populations (*Zea mays* L.) for tolerance to no-nitrogen fertilization and drought. *Agronomy*, *11*(3), 492-509. doi: 10.3390/agronomy11030492.

Rohman M. M., Islam, M. R., Naznin, T., Omy, S. H., Begum, S., Alam, S. S., Amiruzzaman, M., & Hasanuzzaman, M. (2019). Maize production under salinity and drought conditions: Oxidative stress regulation by antioxidant defense and glyoxalase systems. In: Hasanuzzaman, M., Hakim, K. R., Nahar, K., & Alharby, H. F. (Eds.). Plant Abiotic Stress Tolerance. Springer, Cham. pp. 1-34. doi: 10.1007/978-3-030-06118-0_1.

Rosielle, A. A., & Hamblin, J. (1981). Theoretical aspects of selection for yield in stress and non-stress environments. *Crop Science*, *21*(6), 943-946. doi: 10.2135/cropsci1981.0011183X002100060033x.

SAS Institute. (2002). SAS user's guide: Statistics Analysis System for Windows. Ver. 9. SAS Institute, Carry, NC.

Schneider, K. A., Rosales-Serna, R., Ibarra-Perez, F., Cazares-Enriquez, B., Acosta-Gallegos, J. A., Ramirez-Vallejo, P., Wassimi, N., & Kelly, J. D. (1997). Improving common bean performance under drought stress. *Crop Science*, *37*(1), 43-50. doi: 10.2135/cropsci1997.0011183X003700010007x.

Shiri, M., & Ebrahimi, L. (2017). The selection of maize lines derived from CIMMYT germplasm through combining ability with temperate testers. *Cereal Research*, *7*(1), 101-114. [In Persian]. doi: 10.22124/c.2017.2431.

Suyadi, S., Saptadi, D., & Sugiharto, A.N. (2021). Combining ability of Indonesian tropical maize in two different seasons. *AGRIVITA Journal of Agricultural Science*, *43*(2), 347-357. doi: 10.17503/agrivita.v43i2.2915.

Wattoo, F.M., Saleem, M., & Sajjad, M. (2014). Identification of potential F_1 hybrids in maize responsive to water deficient condition. *American Journal of Plant Sciences*, *5*(5), 1945-1955. doi: 10.4236/ajps.2014.513208.

Zhang, Y., & Kang, M. S. (1997). DIALLEL-SAS: A SAS program for Griffing's diallel analyses. *Agronomy Journal*, *89*(2), 176-182. doi: 10.2134/agronj1997.00021962008900020005x.