



University of Guilan
Faculty of Agricultural Sciences

Cereal Research

Vol. 13, No. 4, Winter 2024 (367-384)
doi: 10.22124/CR.2024.26326.1802
pISSN: 2252-0163 eISSN: 2538-6115



RESEARCH PAPER

OPEN ACCESS

The performance of temperate maize testers for screening tropical and subtropical germplasm

Hosein Azizdoost¹, Mohammadreza Shiri^{2*} and Sara Dezhsetan^{3*}

1. Ph. D. Student, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran
2. Research Associate Professor, Seed and Plant Improvement Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran (* Corresponding author: mohammadrezashiri52@gmail.com)
3. Associate Professor, Department of Plant Production & Genetics, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran (* Corresponding author: sdezhsetan@uma.ac.ir)

Comprehensive abstract

Introduction

Low diversity and poor genetic basis of germplasm in temperate regions is a significant challenge in maize breeding. Maize germplasms from tropical and subtropical regions often contain a broader genetic base and show larger diversity than germplasms from temperate regions. Therefore, it seems that foreign germplasms, especially germplasms from tropical and subtropical regions, can be used as a potential solution to strengthen the genetic base of germplasm in temperate regions. However, the efficiency of screening methods to identify superior and suitable sources of foreign germplasm remains a major challenge. The objective of this study was to determine the optimum number of testers and select suitable testers for screening maize lines derived from tropical and subtropical CIMMYT germplasm.

Materials and methods

In this experiment, three testers of temperate regions (MO17, B73, K1264/5-1) were crossed with 25 lines originated from the CIMMYT maize germplasm based on line×tester mating system. A total of 75 crosses along with the control hybrid (SC704) were evaluated in alpha-lattice experimental design in two replications each with four incomplete blocks in two regions (Moghan and Jiroft). Analysis of variance was done based on line×tester method, as well as separation of the effect of crosses into its components using the method suggested by Kempton (1957). GGE-biplot graphical analysis based on the methodology proposed by Fan *et al.* (2010) was also used to estimate the effects of general combining ability (GCA) and specific combining ability (SCA).

Research findings

The results showed that out of the 75 crosses, 32 crosses had higher and significant grain yield compared to the control hybrid SC704. The superiority of the superior cross compared to the control hybrid ranged from 1.46 to 3.77 tons per hectare. These findings highlighted the potential of utilizing tropical and subtropical CIMMYT germplasm to enhance maize yield in temperate regions of Iran. Based on the results, the lines No. 22, 9, 19, 12, 20, 5, 17, 21, 24, 14, 15, 23, and 11 had the highest positive GCA for grain yield, respectively. In general, in terms of grain yield, GCA, and SCA, it is possible to directly use lines No. 4, 5, 9, 11, 12, 19, 22, and 24 extracted from tropical and subtropical CIMMYT germplasm to improve grain yield in temperate regions. Evaluating the efficiency of the temperate maize testers also showed that two testers B73 and MO17 were highly efficient in selecting superior line derived from tropical and subtropical CIMMYT germplasm.



Conclusion

The results of the current study showed that it is possible to use maize germplasms from tropical and subtropical regions of CYMMIT to improve grain yield in temperate regions. Also, one temperate maize tester has the ability to distinguish superior sources (not all of them), although the use of two testers greatly reduces the risk of not choosing (deletion) a superior source.

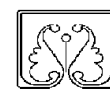
Keywords: General combining ability, Grain yield, Specific combining ability

Received: October 24, 2023

Accepted: January 8, 2024

Cite this article:

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. doi: [10.22124/CR.2024.26326.1802](https://doi.org/10.22124/CR.2024.26326.1802).



کارایی تسترهای ذرت مناطق معتدله در غربال ژرم پلاسم مناطق حاره‌ای و نیمه‌حاره‌ای

حسین عزیزدوست^۱، محمدرضا شیری^{۲*} و سارا دژستان^{۳*}

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

۲- دانشیار پژوهش، مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران (* نویسنده

مسئول: mohammadrezashiri52@gmail.com)

۳- دانشیار، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران (* نویسنده

مسئول: sdezhsetan@uma.ac.ir)

چکیده جامع

مقدمه: تنوع کم و پایه ژنتیکی ضعیف ژرم پلاسم در مناطق معتدل یک چالش مهم در به‌نژادی ذرت است. ژرم پلاسم‌های ذرت نواحی حاره‌ای و نیمه‌حاره‌ای اغلب دارای پایه ژنتیکی وسیع‌تری هستند و تنوع بیش‌تری نسبت به ژرم پلاسم مناطق معتدل دارند. بنابراین، به‌نظر می‌رسد بتوان از ژرم پلاسم‌های خارجی، به‌ویژه ژرم پلاسم‌های مناطق حاره‌ای و نیمه‌حاره‌ای، به‌عنوان یک راه حل بالقوه برای تقویت پایه ژنتیکی ژرم پلاسم در مناطق معتدل استفاده کرد. با این حال، کارایی روش‌های غربال‌گری برای شناسایی منابع برتر و مناسب ژرم پلاسم خارجی همچنان یک چالش بزرگ است. هدف از این مطالعه، تعیین تعداد مناسب تستر و انتخاب تسترهای مناسب برای غربال لاین‌های ذرت استخراجی از ژرم پلاسم مناطق حاره‌ای و نیمه‌حاره‌ای سیمیت بود.

مواد و روش‌ها: در این آزمایش، سه تستر مناطق معتدله (K1264/5-1، B73، MO17) ذرت با ۲۵ لاین انتخابی از ژرم پلاسم ذرت سیمیت بر اساس روش لاین × تستر تلاقی داده شدند. ۷۵ تلاقی حاصله به‌همراه هیبرید شاهد (سینگل کراس ۷۰۴) در قالب طرح آزمایشی آلفا لاتیس در دو تکرار با چهار بلوک ناقص در هر تکرار در دو منطقه (مغان و جیرفت) مورد ارزیابی قرار گرفتند. تجزیه واریانس داده‌ها بر اساس روش لاین × تستر و هم‌چنین تجزیه اثر تلاقی‌ها به اجزای تشکیل دهنده آن با استفاده از روش پیشنهادی کمپتون (Kempton, 1957) انجام شد. برای برآورد اثر ترکیب‌پذیری عمومی (GCA; General Combining Ability) و خصوصی (SCA; Specific Combining Ability) نیز از روش تجزیه گرافیکی GGE-biplot بر اساس پیشنهاد فان و همکاران (Fan *et al.*, 2010) استفاده شد.

یافته‌های تحقیق: نتایج نشان داد که از ۷۵ تلاقی ایجاد شده، ۳۲ تلاقی عملکرد دانه بالاتر و معنی‌دار در مقایسه با هیبرید شاهد سینگل کراس ۷۰۴ داشتند. میزان برتری تلاقی برتر نسبت به هیبرید شاهد بین ۱،۴۶ تا ۳،۷۷ تن در هکتار بود. این نتایج نشان داد که امکان استفاده مستقیم از ژرم پلاسم‌های مناطق حاره‌ای و نیمه‌حاره‌ای سیمیت برای بهبود عملکرد دانه ذرت در شرایط مناطق معتدله ایران وجود دارد. بر اساس نتایج، لاین‌های شماره ۲۲، ۹، ۱۹، ۱۲، ۲۰، ۵، ۱۷، ۲۱، ۲۴، ۱۴، ۱۵، ۲۳ و ۱۱ به‌ترتیب بالاترین GCA مثبت را برای عملکرد دانه داشتند. به‌طور کلی با در نظر گرفتن GCA، SCA و عملکرد دانه، استفاده مستقیم از لاین‌های شماره ۴، ۵، ۹، ۱۱، ۱۲، ۱۹، ۲۲ و ۲۴ استخراجی از ژرم پلاسم‌های ذرت مناطق حاره‌ای و نیمه‌حاره‌ای سیمیت جهت اصلاح عملکرد دانه امکان‌پذیر است. بررسی کارایی تسترهای مناطق معتدله نیز نشان داد که دو

تستر B73 و MO17 قدرت تفکیک بالایی در گزینش لاین‌های برتر از میان لاین‌های استخراجی از ژرم‌پلاسم‌های مناطق حاره‌ای و نیمه‌حاره‌ای سیمیت داشتند.

نتیجه‌گیری: به‌طور کلی، نتایج این مطالعه نشان داد که امکان استفاده از ژرم‌پلاسم‌های مناطق حاره‌ای و نیمه‌حاره‌ای سیمیت در اصلاح عملکرد دانه ذرت برای مناطق معتدله وجود دارد. همچنین یک تستر مناسب مناطق معتدله، توانایی تشخیص منابع برتر (نه همه آن‌ها) را دارد، اما استفاده از دو تستر، خطر عدم انتخاب (حذف) یک منبع برتر را به‌میزان زیادی کاهش می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: ترکیب‌پذیری خصوصی، ترکیب‌پذیری عمومی، عملکرد دانه

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۱۸

نحوه استناد به این مقاله:

عزیزدوست، حسین، شیری، محمدرضا، و دژستان، سارا. (۱۴۰۲). کارایی تسترهای ذرت مناطق معتدله در غربال ژرم‌پلاسم‌های مناطق حاره‌ای و نیمه‌حاره‌ای. *تحقیقات غلات*، ۱۳(۴)، ۳۸۴-۳۶۷. doi: [10.22124/CR.2024.26326.1802](https://doi.org/10.22124/CR.2024.26326.1802)

مقدمه

ذرت (*Zea mays* L.) یک محصول بسیار مهم در سراسر جهان است و کاربردهای متنوعی دارد، به طوری که ۶۶ درصد ذرت تولید شده در سطح جهان به عنوان خوراک دام، ۲۰ درصد به عنوان غذای مستقیم انسان، هشت درصد برای مصارف صنعتی و شش درصد به عنوان بذر یا ضایعات بازیافت می‌شود (Aslam et al., 2015; Doswell, 2019). ذرت دانه‌ای در بیش از ۱۵۹ هزار هکتار از اراضی کشور کشت می‌شود و تولید سالانه آن حدود ۱/۱۴ میلیون تن است (Ministry of Jihad-e-Agriculture, 2023). در حالی که نیاز سالانه کشور به ذرت دانه‌ای حدود ۹/۵ میلیون تن می‌باشد. ضریب خودکفایی ۱۲ درصدی این محصول، ایران را به عنوان یکی از کشورهای عمده وارد کننده ذرت نموده است به طوری که با وارد کردن ۸/۵ میلیون تن دانه ذرت (۴/۷ درصد از کل واردات جهانی ذرت) در سال ۲۰۲۲، ایران در بین کشورهای وارد کننده ذرت جایگاه هشتم را داشته است (National Corn Growers Association, 2023).

صرف نظر از اهمیت ذرت در ایران، بهره‌وری ذرت توسط عوامل متعددی از جمله عوامل غیرزنده (به‌ویژه تنش خشکی و گرمایی) و زنده (مانند آفات و بیماری‌ها) محدود می‌شود. هم‌چنین مشخص شده است که با تغییرات آب و هوایی نیز تشدید می‌شود (Grafton et al., 2015). از آنجایی که تخمین زده می‌شود که جمعیت جهان تا سال ۲۰۵۰ دو برابر شود، همراه با کاهش مستمر زمین‌های مناسب برای کشاورزی (Grafton et al., 2015)، نیاز به توسعه راه‌حل‌های پایداری وجود دارد که می‌تواند منجر به افزایش بهره‌وری ذرت تحت این شرایط اقلیمی و اجتماعی-اقتصادی پیش‌بینی شده شود. سناریوهای اصلاح نباتات به‌طور سنتی به عنوان مقرون به صرفه‌ترین راه برای بهبود سازگاری محصولات با محیط در حال تغییر در نظر گرفته می‌شود. در این راستا، توجه به این نکته مهم است که صرف نظر از چالش‌های فعلی که بهره‌وری ذرت را محدود می‌کند، این گیاه دارای تنوع ژنتیکی عظیمی است که فرصت‌های باورنکردنی برای افزایش ژنتیکی برای سازگاری با شرایط تنش‌ها را ارائه می‌دهد (Campos et al., 2004). بنابراین، این تنوع موجود باید به‌منظور حفاظت و افزایش عملکرد

ذرت تحت سناریوهای پیش‌بینی‌شده ناشی از تغییرات اقلیمی و اجتماعی مهار شود. کارنز و همکاران (Cairns et al., 2013) در بررسی که انجام دادند به این نتیجه رسیدند که تا کنون تنوع ژنتیکی موجود در ذرت بسیار کم مورد استفاده قرار گرفته است. گسترش پایه ژنتیکی ذرت و اصلاح ارقام پرمحصول و متحمل به آب و هوا که با اکولوژی‌های مختلف کشاورزی سازگار باشند تا حد زیادی به پیدا کردن و ترکیب کارآمد و سریع و ترکیب یک آلل و هاپلوتیپ جدید یا مطلوب بستگی دارد (Prasanna, 2012). به‌منظور بهبود تنوع ژنتیکی در ذرت برای افزایش سازگاری با محیط در حال تغییر، بهره‌برداری از مواد خارجی در برنامه‌های به‌نژادی ذرت بسیار کلیدی است (Whitehead et al., 2006).

در مقیاس جهانی، ژرمپلاسم ذرت خارجی را می‌توان به دو دسته اصلی (یعنی معتدل و حاره‌ای) بر اساس شرایط محیطی (به‌ویژه از نظر طول روز) که در آن سازگار شده‌اند تقسیم کرد (Lanes et al., 2014). ژرمپلاسم خارجی می‌تواند منبعی از آلل‌های جدید باشد که می‌تواند وارد برنامه و یا ادغام در مواد سازگار محلی شود تا در برابر تنش‌های زیستی و غیرزیستی مقاومت ایجاد کند (Adebayo et al., 2017; Meseka et al., 2018). عدم سازگاری ژرمپلاسم مناطق حاره‌ای در مناطق معتدله، مشکلات زیادی را در استفاده از این مواد در جهت افزایش پایه ژنتیکی ذرت‌های مورد استفاده در برنامه‌های به‌نژادی ذرت در مناطق معتدله ایجاد کرده است. افزایش بیش از اندازه ارتفاع بوته و بلال، سیستم ریشه‌ای ضعیف، کیفیت پایین ساقه و بنابراین خوابیدگی بوته، تاخیر در ظهور کاکل و حتی عدم ظهور آن و بنابراین عقیمی، از عمده مشکلات کشت ژرمپلاسم مناطق حاره‌ای و نیمه‌حاره‌ای در مناطق معتدله است. مشکل اصلی عدم سازگاری ژرمپلاسم حاره‌ای و نیمه‌حاره‌ای در مناطق معتدله ناشی از طول روز بلند مناطق معتدله می‌باشد (Choukan et al., 2015). با توجه به این مشکلات، گزینش برای بهبود سازگاری این ژرمپلاسم‌ها در شرایط روزهای بلند مناطق معتدله ضروری است. گوسنارد و همکاران (Gouesnard et al., 1996) تلاقی‌های ذرت حاره‌ای با معتدله را در بهبود عملکرد ذرت اروپا به‌کار بردند. در چین نیز ژرمپلاسم ذرت حاره‌ای و

حذف تعداد زیادی از مواد ژنتیکی ضعیف را دارد. فان و همکاران (Fan et al., 2010) ۲۵ لاین استخراجی از ژرم پلاسما مناطق حاره‌ای و نیمه‌حاره‌ای سیمیت را در تلاقی با چهار تستر مناطق معتدله در مناطق معتدل چین، ارزیابی و اعلام کردند که یک تستر توانایی تفکیک لاین‌های برتر را دارد، ولی استفاده از دو تستر باعث انتخاب همه لاین‌های برتر می‌شود.

با وجود اینکه مشخص شده است ژرم پلاسما ذرت حاره‌ای و نیمه‌حاره‌ای تولیدی توسط سیمیت برای تقویت منابع ژرم پلاسما مناطق معتدله مفید و سودمفید است، با این حال در برنامه‌های به‌نژادی و تولید هیبرید ذرت کشور، به پرسش‌هایی از قبیل کدام نوع تستر و چه تعداد تستر مناطق معتدله برای غربال تعداد زیاد لاین‌های استخراجی از ژرم پلاسما مناطق حاره‌ای و نیمه‌حاره‌ای سیمیت مورد نیاز است، پاسخ دقیقی ارائه نشده است. یافتن پاسخ مناسب برای این پرسش‌ها می‌تواند منجر به بهبود کارایی روش‌های غربال‌گری منابع برتر و مناسب از ژرم پلاسما مناطق حاره‌ای شود. بنابراین، این مطالعه به‌منظور انتخاب تستر مناسب از ذرت مناطق معتدله و همچنین تعداد مناسب آن جهت غربال‌گری لاین‌های ذرت استخراجی از ژرم پلاسما مناطق حاره‌ای و نیمه‌حاره‌ای سیمیت انجام گرفت.

مواد و روش‌ها

برای استخراج لاین‌های ذرت سازگار از ژرم پلاسما سیمیت با منشا حاره‌ای و نیمه‌حاره‌ای، از تعداد ۱۲۰ لاین ذرت در حال خلوص در شرایط اقلیمی معتدل کشور (مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر) طی چندین سال با خودگشنی و مدیریت برنامه با روش بلال به‌ردیف، در نهایت تعداد ۲۵ لاین سازگار به شرایط معتدله کشور انتخاب شد (جدول ۱). این لاین‌ها از ویژگی‌های زراعی قابل قبول، زودرسی مناسب، عملکرد مناسب، تیپ بوته، مقاومت به بیماری‌ها در شرایط آلودگی طبیعی مزرعه و سازگاری خوب برخوردار بودند. در مرحله بعد باید قابلیت ترکیب‌پذیری این لاین‌ها در تلاقی با منابع موجود و سازگار مناطق معتدله مشخص شوند. بدین منظور سه تستر مناطق معتدله (MO17, B73, K1264/5-1) از سه گروه هتروتیپ متفاوت (لاین MO17 از گروه لنکستر شورکراپ، لاین B73

نیمه‌حاره‌ای زیادی در برنامه اصلاح ذرت وارد شده و به‌طور وسیعی از نظر سازگاری، ترکیب‌پذیری و پتانسیل ژنتیکی در توسعه پایه ژنتیکی ژرم پلاسما برگزیده چین و گروه‌بندی هتروتیپ مورد مطالعه قرار گرفته است (Liu et al., 2011; Fan et al., 2008; Chen et al., 2003). به‌طور کلی لاین‌های اینبرد ذرت سیمیت دارای درجه بالایی از تنوع ژنتیکی در مقایسه با لاین‌های مناطق معتدله هستند (Liu et al., 2003). در مناطق معتدله و حتی در مناطق حاره‌ای، اکثر برنامه‌های تحقیقاتی بر استفاده از این ژرم پلاسماها و شناسایی منابع برتر آن‌ها متمرکز شده است (Simic et al., 2003; Nelson & Goodman, 2008; Fan et al., 2010; Choukan et al., 2015).

زمانی که تعداد لاین‌های اینبرید خارجی و یا هر ماده ژنتیکی زیاد است. به‌نژادگر ذرت نمی‌تواند از عهده تلاقی‌های دیالال برآید و یا نمی‌تواند از تعداد زیاد تستر برای غربال لاین‌های استخراجی از ژرم پلاسما خارجی استفاده کند. شیری و ابراهیمی (Shiri & Ebrahimi, 2017) در بررسی ترکیب‌پذیری هفت لاین استخراجی از ژرم پلاسما ذرت سیمیت با چهار تستر محلی معتدله همبستگی بسیار معنی‌دار بین عملکرد خانواده‌های ناتنی حاصل از چهار تستر را به‌دست آوردند و نتیجه‌گیری کردند که می‌توان با یک تستر ارزیابی مقدماتی برای تعداد زیاد مواد ژنتیکی انجام داد. شیری (Shiri, 2017) با استفاده از روش لاین × تستر، چهار تستر مناطق معتدله ذرت را با ۱۳ لاین استخراجی از ژرم پلاسما ذرت سیمیت تلاقی داد و با بررسی ۵۲ تلاقی حاصل به‌همراه دو هیبرید شاهد، نتیجه گرفت که امکان استفاده مستقیم از لاین‌های استخراجی از ژرم پلاسما ذرت مناطق حاره‌ای و نیمه‌حاره‌ای سیمیت در اصلاح عملکرد دانه کشور وجود دارد. وی همچنین نتیجه گرفت که به‌کارگیری یک تستر توانایی تفکیک لاین‌های برتر (نه همه آن‌ها) را دارد، هر چند که استفاده از دو تستر به‌طور هم‌زمان خطر عدم انتخاب یک لاین برتر را به‌میزان زیادی کاهش می‌دهد. شیری و همکاران (Shiri et al., 2021) نیز نتایج مشابهی را گزارش کردند.

نیلسون و گودمن (Nelson & Goodman, 2008) با انجام غربال‌گری گسترده مواد ژنتیکی برگزیده از دو گروه هتروتیپ مهم آمریکا، اعلام کردند که یک تستر توانایی

فاصله ۳۵ سانتی‌متر به صورت دستی کاشته شد. پس از تنک کردن در مرحله ۴-۵ برگی (حدود ۱۸ روز بعد از کاشت) دو بوته در هر کپه نگه داشته شد که بر این اساس تراکم کاشت در حدود ۷۴ هزار بوته در هکتار بود. از زمان کاشت تا برداشت کلیه مراقبت‌های زراعی لازم از قبیل آبیاری، مبارزه با علف‌های هرز، کودهی و ... به عمل آمد. برای اندازه‌گیری عملکرد دانه، بلال‌های دو خط بعد از حذف بوته‌های حاشیه برداشت و با ترازوی حساس ۰/۰۰۵/ توزین و سپس عملکرد بلال با درصد چوب بلال و رطوبت ۱۴ درصد تصحیح شد و میزان عملکرد دانه در هکتار (تن در هکتار) مشخص شد.

از گروه ریدیلودنت و لاین K1264/5-1 از گروه منابع ناشناخته داخلی (Choukan *et al.*, 2006) به عنوان تستر بر اساس مدل تلاقی لاین × تستر با ۲۵ لاین استخراجی از ژرم پلاسم ذرت سیمیت تلاقی داده شدند و در نتیجه ۷۵ هیبرید از این تلاقی به دست آمد. سپس این تلاقی‌ها همراه با شاهد (هیبرید سینگل کراس ۷۰۴ با بالاترین سطح زیر کشت در کشور) در قالب طرح آزمایشی آلفا لاتیس در دو تکرار با چهار بلوک ناقص در دو منطقه (مغان و جیرفت) مورد ارزیابی قرار گرفتند. هر کرت آزمایشی شامل دو خط کاشت به طول ۶/۳ متر با فاصله ۷۵ سانتی‌متر بود که جهت اطمینان از سبز شدن، روی هر خط سه بذر در ۱۸ کپه با

جدول ۱- لاین‌های والدینی ذرت استفاده شده در برنامه تلاقی بر اساس روش لاین × تستر

Table 1. Maize parental lines used in the mating program based on line × tester model

No.	Code [†]	Pedigree	No.	Code [†]	Pedigree
1	L1	YS16B-168-7	15	L15	YS16B-158-12-1
2	L2	JH13A-520-161/2	16	L16	YS16B-158-54
3	L3	YS15B-160-49	17	L17	YS16B-158-103-2
4	L4	YS16B-164-37	18	L18	YS16B-160-60
5	L5	JH15A-506-7	19	L19	YS16B-163-9
6	L6	YS16B-154-67	20	L20	YS16B-163-18
7	L7	YS15B-154-30	21	L21	JH16A-508-22
8	L8	JH15A-501-47	22	L22	YS16B-163-23
9	L9	YS16B-154-36	23	L23	YS16B-163-35
10	L10	JH15A-501-50	24	L24	YS16B-163-36
11	L11	JH15A-501-12	25	L25	YS17B-167-51
12	L12	JH15A-501-39	26	T1	K1264/5-1 (tester)
13	L13	JH15A-501-58	27	T2	MO17 (tester)
14	L14	JH15A-501-64	28	T3	B73 (tester)

[†] L, line; T, tester.

GGE بای پلات برای داده‌های لاین × تستر، سطر به عنوان یک "لاین" و ستون به عنوان "تستر" در نظر گرفته می‌شود (Yan & Hunt, 2002). هنگامی که بای پلات GGE برای تجزیه و تحلیل داده‌های لاین × تستر استفاده می‌شود، میانگین عملکرد و پایداری ژنوتیپ‌ها به ترتیب به عنوان GCA و SCA والدین در نظر گرفته می‌شود. بر خلاف تجزیه و تحلیل متداول لاین × تستر که در آن SCA به یک تلاقی مربوط می‌شود، در GGE-biplot، SCA برای لاین‌های والدینی برآورد می‌شود. مدل ریاضی برای تجزیه و

برای تجزیه واریانس داده‌ها به روش لاین × تستر و هم‌چنین تجزیه اثر تلاقی‌ها به اجزای تشکیل دهنده آن، از روش پیشنهادی کمپتون (Kempton, 1957) استفاده شد. برآورد اثر ترکیب‌پذیری عمومی (GCA) و خصوصی (SCA) از طریق تجزیه گرافیکی ژنوتیپ + ژنوتیپ × محیط (GGE-biplot) انجام گرفت. به طور کلی بای پلات‌های ژنوتیپ + ژنوتیپ × محیط برای تجزیه و تحلیل داده‌های دو طرفه استفاده می‌شود که در آن سطرها و ستون‌ها واحدهای آزمایشی مختلف را نشان می‌دهند (Yan & Hunt, 2002). برای تعمیم کاربرد

مقایسه میانگین عملکرد دانه تلاقی‌ها بر اساس میانگین دو محیط نشان داد که تلاقی‌های شماره ۲۲، ۴۲، ۳۷، ۳۴، ۱۱، ۶۹، ۱۹، ۷۲، ۴، ۳۰، ۵۹، ۴۹، ۱۵، ۲۳، ۲۵، ۳۵، ۴۵، ۴۷، ۲۹، ۵۵، ۱۴، ۴۶، ۱۰، ۹، ۷۰، ۳۹، ۲۷، ۷۵، ۱۲، ۷۴، ۲۱ و ۴۰ به ترتیب با ۱۲/۷۴، ۱۲/۱۶، ۱۱/۹۱، ۱۱/۸۷، ۱۱/۶۶، ۱۱/۶۴، ۱۱/۶۲، ۱۱/۵۲، ۱۱/۴۹، ۱۱/۳۹، ۱۱/۳۳، ۱۱/۲۶، ۱۱/۲۵، ۱۱/۱۷، ۱۱/۱۰، ۱۱/۰۷، ۱۱/۰۶، ۱۱/۰۶، ۱۰/۹۷، ۱۰/۹۵، ۱۰/۶۵، ۱۰/۶۷، ۱۰/۶۶، ۱۰/۶۳، ۱۰/۵۹، ۱۰/۵۸، ۱۰/۵۸، ۱۰/۵۵، ۱۰/۵۲، ۱۰/۵۰، ۱۰/۴۳ تن در هکتار، عملکرد دانه بالاتر و معنی‌داری نسبت به هیبرید شاهد سینگل کراس ۷۰۴ (با ۸/۹۷۰ تن در هکتار) داشتند. علاوه بر ۳۲ تلاقی بالا، تعداد ۳۴ تلاقی دیگر نیز عملکرد دانه بالاتر اما غیر معنی‌دار از هیبرید شاهد سینگل کراس ۷۰۴ داشتند (جدول ۳). این نتایج نشان می‌دهد که امکان استفاده از ژرم‌پلاسم مناطق حاره‌ای و نیمه‌حاره‌ای سیمیت برای اصلاح عملکرد دانه ذرت در شرایط مناطق معتدله ایران وجود دارد.

ژرم‌پلاسم ذرت حاره‌ای و نیمه‌حاره‌ای به‌طور گسترده در برنامه به‌نژادی ذرت مناطق معتدله چین به‌منظور استخراج و تولید لاین‌ها و هیبریدهای سازگار وارد شده است (Liu *et al.*, 2003; Fan *et al.*, 2008; Chen *et al.*, 2011). در برنامه‌های تحقیقات ذرت سایر مناطق معتدله نیز مطالعات زیادی روی شناسایی منابع با پتانسیل بالا از این ژرم‌پلاسم‌ها متمرکز شده است (Gouesnard *et al.*, 1996; Simic *et al.*, 2003; Nelson & Goodman, 2008). واریانس‌های مربوط به لاین‌ها و تسترها نشان دهنده واریانس ترکیب‌پذیری عمومی لاین‌ها یا تسترها (GCA) است، در حالی‌که واریانس برهمکنش لاین × تستر، واریانس ترکیب‌پذیری خصوصی (SCA) را نشان می‌دهد. با توجه به واریانس معنی‌دار برای لاین‌ها، تسترها و برهمکنش لاین × تستر (جدول ۲)، اثرات GCA و SCA را می‌توان برای لاین‌ها و تسترها محاسبه کرد. این اثرات با استفاده از روش گرافیکی GGEbiplot برآورد شد.

تحلیل بای‌پلات GGE داده‌های لاین × تستر به خوبی توسط روسوندی و همکاران (Ruswandi *et al.*, 2015) توضیح داده شده است. به‌منظور برآورد مقادیر ترکیب‌پذیری عمومی و خصوصی صفت عملکرد دانه از نمودار مختصات تستر متوسط استفاده شد. بر اساس مختصات تستر متوسط، فاصله افقی هر ژنوتیپ (انتری) از محور مختصات تستر متوسط و در جهت فلش محور افقی (محور قرمز) بیانگر مقدار مثبت قابلیت ترکیب عمومی است (Yan & Hunt, 2002). برای ارزیابی کارایی تسترهای مختلف برای غربالگری ژرم‌پلاسم خارجی و هم‌چنین انتخاب تعداد مناسب تستر برای غربالگری لاین‌های استخراجی از منابع خارجی، علاوه بر روش GGEbiplot، از روش معرفی شده توسط فان و همکاران (Fan *et al.*, 2010) استفاده شد. این رویه به‌روشنی توسط شیری و همکاران (Shiri *et al.*, 2021) توضیح داده شده است. تجزیه آماری داده‌ها با نرم‌افزارهای AGDv5 و GGE-biplot انجام شد.

نتایج و بحث

بر اساس تجزیه واریانس مرکب مدل لاین × تستر، اختلاف معنی‌داری بین تلاقی‌ها از نظر عملکرد دانه وجود داشت. هم‌چنین، اختلاف مشاهده شده در بین تسترها، لاین‌ها و برهمکنش لاین × تستر، تلاقی‌ها × محیط‌ها، لاین × تستر × محیط معنی‌دار بود (جدول ۲). معنی‌دار شدن برهمکنش‌ها نشان می‌دهد که عملکرد لاین‌ها، تسترها و تلاقی‌ها از یک محیط به محیط دیگر ثابت نیست و عملکرد ژنوتیپ‌ها با محیط‌ها همبستگی ندارد. این نوع واکنش‌ها در تحقیقات کشاورزی و زیستی رایج و اجتناب‌ناپذیرتر است (Yan & Kang, 2002). با توجه به نتایج و معنی‌دار شدن برهمکنش لاین‌ها و محیط‌ها پیشنهاد می‌شود ارزیابی عملکرد لاین‌های خارجی در چند محیط یا چند سال و یا هر دو انجام شود. بر اساس تجزیه واریانس مرکب، اختلاف معنی‌داری بین هیبریدها (۷۵ تلاقی به‌همراه شاهد) از نظر عملکرد دانه مشاهده شد (MSh=4.29، MSe=1.08، dfh=75، dfe=150، P-value<0.00).

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس عملکرد دانه ذرت بر اساس روش تجزیه لاین × تستر

Table 2. The results of analysis of variance of maize grain yield based on line × tester method

Source of variation †	df	Mean square
Environment (E)	1	4200.109**
Replication/Environment (R/E)	2	1.67508ns
Crosses (C)	74	4.266719**
Line GCA (LGCA)	24	5.08992**
Tester GCA (TGCA)	2	8.335695**
Line × Tester (SCA)	48	3.690545**
C × E	74	4.750917**
LGCA × E	24	4.543015**
TGCA × E	2	6.371361**
SCA × E	48	4.787349**
Error	135	1.029397

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

† LGCA, general combining ability for lines or line effect; TGCA, general combining ability for testers or tester effect, T × L (SCA), specific combining ability or line and tester interaction.

GCA لاین‌ها تقریباً با تصاویر آن‌ها روی محور ATC-X (محور فلش منفرد؛ جهت نشان دهنده انتهای مثبت) تعیین شد، در حالی که اثر SCA انتری‌ها تقریباً با تصاویر آن‌ها روی ATC-Y (محور پیکان دوگانه) مشخص می‌شود (Yan & Hunt, 2002; Bertoia et al., 2006). در این بررسی، تنوع قابل ملاحظه‌ای برای ترکیب‌پذیری عمومی و خصوصی مشاهده شد که خود دلیلی بر نقش هر دو اثر افزایشی و غیر افزایشی زن‌ها در کنترل عملکرد دانه در ذرت می‌باشد (شکل ۱). بر اساس تصویر لاین‌ها در محور افقی ATC، ۲۲ و ۱۳ به ترتیب بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار GCA را داشتند (شکل ۱- A). رتبه‌بندی لاین‌ها از لحاظ مقدار GCA به ترتیب به صورت ۳ > ۶ > ۲ > ۱۶ > ۳ > ۷ > ۱۸ > ۱ > ۸ > ۱۰ > ۲۵ > ۲۲ > ۹ > ۱۹ > ۱۲ > ۲۰ > ۵ > ۱۷ > ۲۱ > ۲۴ > ۱۴ > ۱۵ > ۲۳ > ۱۱ > ۴ بود. محور عمودی ATC، لاین‌های دارای نمره PCA مثبت را از لاین‌های دارای نمره PCA منفی جدا کرد. انتهای مثبت محور افقی ATC در سمتی از مبدأ بای‌پلات قرار می‌گیرد که تستر متوسط در آن قرار می‌گیرد. بنابراین، لاین‌های شماره ۲۲، ۹، ۱۹، ۱۲، ۲۰، ۵، ۱۷، ۲۱، ۲۴، ۱۴، ۱۵، ۲۳، ۱۱ و ۴ دارای GCA مثبت و لاین‌های شماره ۴، ۲۵، ۱۰، ۱، ۸، ۱۸، ۷، ۳، ۱۶، ۲، ۶ و ۱۳ دارای GCA منفی برای عملکرد دانه بودند (شکل ۱- A). لاین‌هایی که دارای بیش‌ترین مقدار ترکیب‌پذیری عمومی مثبت هستند، زن‌های با اثر افزایشی بیش‌تری برای عملکرد دانه دارند (Choukan, 2008; Shiri et al., 2010; Shiri et al., 2015).

نتایج تجزیه و تحلیل داده‌های لاین × تستر با مدل بای‌پلات نشان داد که ۷۸/۵ درصد از کل تغییرات عملکرد دانه توسط دو مؤلفه اصلی اول (به ترتیب ۴۸/۲ درصد و ۳۰/۳ درصد) توجیه شدند (شکل ۱). در تجزیه و تحلیل داده‌های حاصل از مدل تلاقی لاین × تستر در ذرت با مدل بای‌پلات، شیرری و همکاران (Shiri et al., 2021) نشان دادند که دو مؤلفه اول و دوم ۷۹ درصد از تغییرات داده‌ها را توجیه می‌کند. مومنی و همکاران (Momeni et al., 2020) در مطالعه مشابهی دریافتند که ۸۰/۸ درصد از تغییرات کل داده‌ها توسط دو مؤلفه اول توجیه شد. بر اساس نظریان (Yan, 2001) هر چه درصد سهم دو مؤلفه در تبیین تغییرات کل داده‌ها بیش‌تر باشد، دلیل بر ثبات و پایداری نتایج حاصل است که در این تحقیق، سهم دو مؤلفه اول در تبیین تغییرات کل داده‌ها (۷۸/۵ درصد)، سهم نسبتاً بالایی از تغییرات کل داده‌ها را نشان می‌دهد. تبیین بخش عمده‌ای از واریانس توسط دو مؤلفه اول، دلیلی بر کارایی روش GGE بای‌پلات برای تجزیه و تحلیل تلاقی‌های لاین در تستر در مطالعه حاضر است. یان و هانت (Yan & Hunt, 2002) بر اساس تعریف مختصات تستر متوسط برای لاین‌ها، قدرت ترکیب‌پذیری عمومی و خصوصی را برآورد کردند. تستر متوسط یا میانگین تسترها دارای نمرات PC1 و PC2 برابر با نمرات PC1 و PC2 در همه تسترها می‌باشد. اثرات GCA و SCA لاین‌ها (انتری‌ها) با استفاده از نمای ATC (میانگین مختصات تستر) برای لاین‌ها مورد سنجش قرار گرفت. اثر

جدول ۳- عملکرد دانه و رتبه عملکرد دانه تلاقی حاصله از ۲۵ لاین استخراجی از ژرم پلاسماهای مناطق حاره‌ای و نیمه حاره‌ای سیمیت در تلاقی با سه تستر مناطق معتدله

Table 3. Grain yield and its rank for crosses obtained from 25 lines derived from CIMMYT germplasm crossed with the three temperate maize testers

No.	Cross	Grain yield (t/ha)	Rank	No.	Cross	Grain yield (t/ha)	Rank
1	L1×T1	9.55	57	39	L14×T2	10.59	26
2	L2×T1	9.25	65	40	L15×T2	10.43	32
3	L3×T1	8.26	72	41	L16×T2	10.27	38
4	L4×T1	11.49	9	42	L17×T2	12.16	2
5	L5×T1	9.58	56	43	L18×T2	9.45	62
6	L6×T1	7.97	76	44	L19×T2	10.25	39
7	L7×T1	8.82	68	45	L20×T2	11.06	17
8	L8×T1	10.25	40	46	L21×T2	10.95	22
9	L9×T1	10.66	24	47	L22×T2	11.06	18
10	L10×T1	10.67	23	48	L23×T2	10.34	36
11	L11×T1	11.66	5	49	L24×T2	11.26	12
12	L12×T1	10.55	29	50	L25×T2	8.67	70
13	L13×T1	9.84	49	51	L1×T3	10.10	43
14	L14×T1	10.95	21	52	L2×T3	8.75	69
15	L15×T1	11.25	13	53	L3×T3	10.19	41
16	L16×T1	10.05	45	54	L4×T3	8.15	73
17	L17×T1	9.64	53	55	L5×T3	10.97	20
18	L18×T1	9.91	48	56	L6×T3	9.59	54
19	L19×T1	11.62	7	57	L7×T3	10.42	33
20	L20×T1	10.40	34	58	L8×T3	9.22	66
21	L21×T1	10.50	31	59	L9×T3	11.33	11
22	L22×T1	12.74	1	60	L10×T3	8.01	74
23	L23×T1	11.17	14	61	L11×T3	9.53	59
24	L24×T1	9.59	55	62	L12×T3	9.95	46
25	L25×T1	11.10	15	63	L13×T3	9.70	52
26	L1×T2	9.81	50	64	L14×T3	9.54	58
27	L2×T2	10.58	27	65	L15×T3	9.35	64
28	L3×T2	10.17	42	66	L16×T3	8.48	71
29	L4×T2	10.99	19	67	L17×T3	10.08	44
30	L5×T2	11.39	10	68	L18×T3	9.46	61
31	L6×T2	10.34	37	69	L19×T3	11.64	6
32	L7×T2	9.41	63	70	L20×T3	10.63	25
33	L8×T2	9.91	47	71	L21×T3	10.38	35
34	L9×T2	11.87	4	72	L22×T3	11.52	8
35	L10×T2	11.07	16	73	L23×T3	9.52	60
36	L11×T2	9.75	51	74	L24×T3	10.52	30
37	L12×T2	11.91	3	75	L25×T3	10.58	28
38	L13×T2	7.99	75	76	SC704	8.97	67
†LSD _{5%}		1.4523				1.4523	

طول در محور ATC-Y یا بیشترین فاصله از محور افقی (ATC-X) است که نشان دهنده بالاترین اثرات SCA برای عملکرد دانه است. در حالی که، لاین‌های شماره ۲۲ و ۱۳ کوچک‌ترین اثرات SCA را با داشتن کمترین طول در محور ATC-Y نشان دادند. محور میانگین تسترها در شکل A-۱ معیاری جهت تقسیم‌بندی لاین‌ها به گروه‌های هتروتیک است. لاین‌های هر طرف این خط یک گروه هتروتیک را

برخلاف روش‌های رایج تجزیه لاین در تستر، با استفاده از روش بای پلات می‌توان قابلیت ترکیب خصوصی را به جای تلاقی‌ها، برای هریک از والدین برآورد نمود. قابلیت ترکیب خصوصی (SCA) در روش GGE بای پلات، عبارت از فاصله عمودی هر لاین از محور افقی (محور قرمز) می‌باشد (Yan & Hunt, 2002)، که بیانگر اثرهای غیر افزایشی ژن است (شکل A-۱). لاین‌های شماره ۱۷ و ۱۶ دارای بیشترین

بهترین تستر شناخته می‌شود که نزدیک به میانگین تسترها و متمایل به انتهای مثبت میانگین تسترها قرار گرفته باشد. به عبارت دیگر بهترین تستر باید دارای ترکیب‌پذیری عمومی بالای و ترکیب‌پذیری خصوصی پایینی داشته باشد (Shiri et al., 2021). با توجه به شکل A-1، تستر B73 بالاترین GCA و لاین K1264/5-1 پایین‌ترین GCA را داشتند. از نظر GCA رتبه تسترها به صورت <MO17> B73> MO17> است. هم‌چنین با رویه GGE بای‌پلات بر اساس شکل D-1 نیز می‌توان به راحتی بهترین تستر را انتخاب کرد. بر اساس این شکل، تستری که به محور افقی نزدیک‌تر و طول بردار بیش‌تری داشته باشد، تستر نزدیک به تستر ایده‌آل است و بهتر می‌تواند لاین‌ها را از هم تفکیک دهد. بر این اساس، لاین‌های B73 و MO17 به ترتیب به عنوان بهترین تسترها تعیین شدند.

شیری و همکاران (Shiri et al., 2021) نیز با ارزیابی ۲۵ لاین استخراجی از ژرم پلاسماهای مناطق حاره‌ای و نیمه حاره‌ای سیمیت در تلاقی با چهار تستر مناطق معتدله ایران به این نتیجه رسیدند که ترکیب‌پذیری عمومی تعدادی از لاین‌ها برای عملکرد دانه مثبت و معنی‌دار می‌باشد (Fan et al., 2010)، که با نتایج این قسمت از تحقیق حاضر مطابقت داشت. برای ارزیابی کارایی تسترهای مختلف برای غربالگری ژرم پلاسما خارجی و هم‌چنین انتخاب تعداد مناسب تستر برای غربالگری لاین‌های استخراجی از منابع خارجی علاوه بر روش GGEbiplot، از روش معرفی شده توسط فان و همکاران (Fan et al., 2010) استفاده شد. معمولاً هدف نهایی برای اصلاح ذرت بدست آوردن هیبریدهایی با عملکرد دانه بالا است. در برنامه تلاقی و تولید هیبرید ذرت، غربال لاین‌های مناسب از میان تعداد زیاد لاین‌های استخراجی در انتهای برنامه‌های به‌نژادی ذرت از اهمیت کاربردی فوق‌العاده بالایی برخوردار است. بنابراین یک تستر مناسب باید قادر باشد ضعیف‌ترین و قوی‌ترین لاین‌ها را از هم تفکیک کند.

در این مورد، عملکرد دانه ۷۵ تست کراس با عملکرد دانه هیبرید تجاری برتر داخلی سینگل کراس ۷۰۴، مقایسه شد. با توجه به نتایج مقایسه عملکرد ۳۲ تست کراس عملکرد دانه بالا و معنی‌دار نسبت به شاهد و هم‌چنین ۳۴ تلاقی عملکرد دانه بالا و غیر معنی‌دار نسبت به شاهد داشتند. با وجود اینکه تعداد زیادی از تست کراس عملکرد دانه بالاتری در مقایسه با

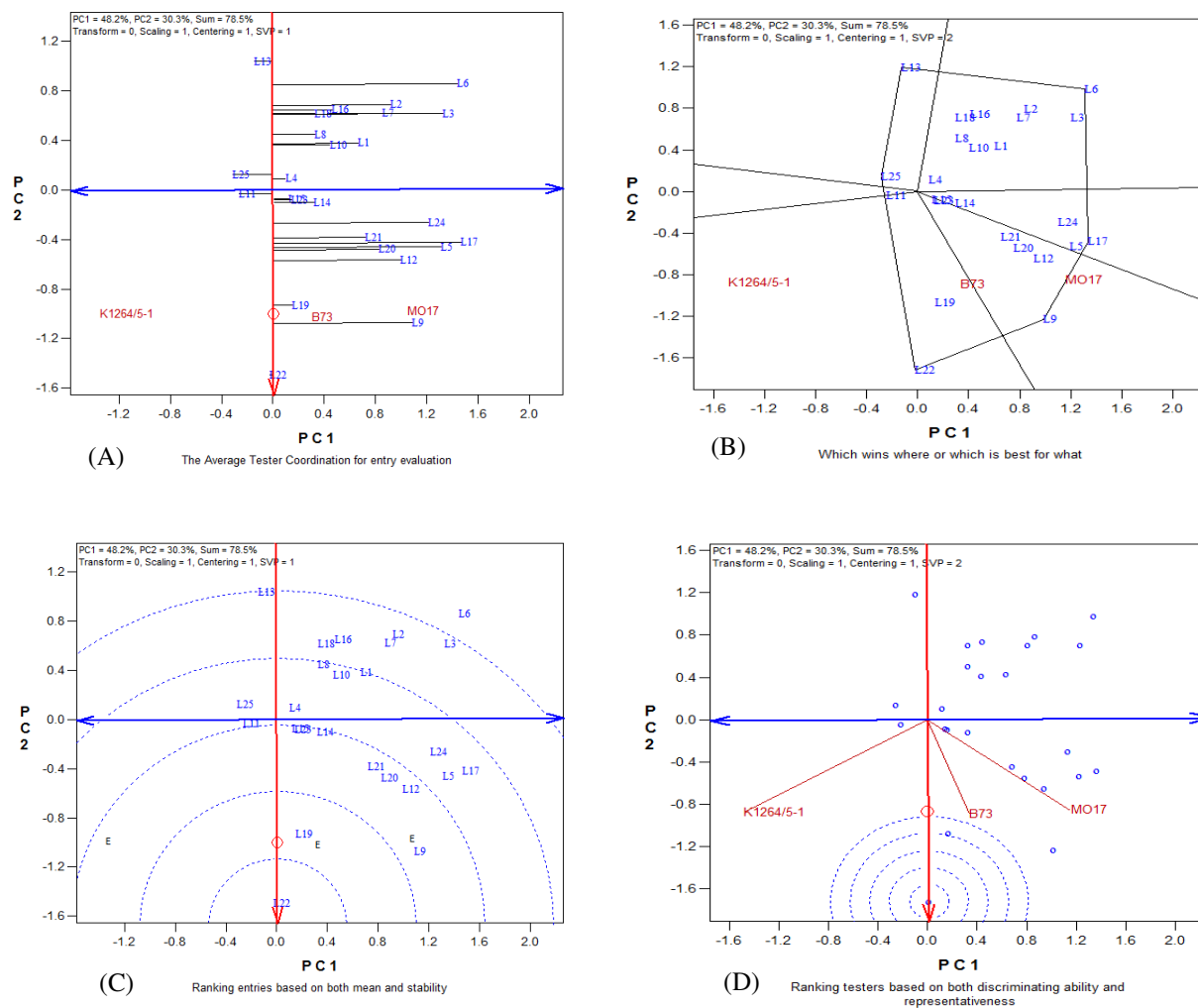
تشکیل می‌دهند. به ترتیب دو گروه هتروتیک وجود خواهد داشت، به طوری که لاین‌های شماره ۲۲، ۹، ۱۹، ۱۲، ۲۰، ۵، ۱۷، ۲۱، ۲۴، ۱۴، ۱۵، ۲۳، ۴، ۱۰، ۱۸، ۱، ۷، ۳، ۱۶، ۲ و ۶ در گروه اول و لاین‌های شماره ۱۳، ۲۵ و ۱۱ در گروه دیگر قرار دارند.

یکی از کاربردهای روش GGE بای‌پلات استفاده از آن به منظور شناسایی بهترین تلاقی‌ها، از طریق نمودار چندضلعی است (Yan & Hunt, 2002). با توجه به شکل B-1، لاین‌های شماره ۲۲، ۹، ۱۷، ۶، ۱۳ و ۲۵ با قرار گرفتن در راس ضلع‌های نمودار چند ضلعی، شش بخش مختلف به وجود آوردند. در میان لاین‌هایی که در هر بخش قرار می‌گیرند، بهترین لاین ترکیب شونده با تستر آن بخش، لاینی است که در راس چند ضلعی قرار گرفته است. تستر MO17 دارای بیش‌ترین تعداد لاین در ناحیه خود بود و بنابراین برای صفت عملکرد دانه می‌تواند والد پدری مناسبی با سایر لاین‌ها باشد و منجر به بروز هتروزیس شود. بر این اساس، لاین شماره ۹ با تستر MO17 و لاین شماره ۲۲ با تسترهای B73 و K1264/5-1 بیش‌ترین میزان ترکیب‌پذیری خصوصی را برای عملکرد دانه داشتند و انتظار می‌رود که تلاقی بین آن‌ها دارای هتروزیس بیش‌تری باشد. قرار گرفتن دو تستر از سه تستر مورد مطالعه در ناحیه لاین شماره ۹ تایید کننده نتایج قبلی بود که بر اساس شکل A-1، این لاین در کنار لاین شماره ۲۲ بالاترین ترکیب‌پذیری عمومی را داشت. علاوه بر این، در ناحیه لاین‌های شماره ۱۷، ۶، ۱۳ و ۲۵ هیچ تستری قرار نگرفت. به عبارت دیگر این لاین‌ها ترکیب‌پذیری خصوصی خوبی با هیچ یک از تسترها نداشتند. ژنوتیپ "ایده‌آل" باید عملکرد دانه بیش‌تر از متوسط در تمام محیط‌های ارزیابی شده نشان دهد. مطابق شکل C-1، ژنوتیپ ایده‌آل با بیش‌ترین طول بردار در PC1 و PC2 بدون فاصله از محور افقی مشخص می‌شود که با فلش در مرکز دایره‌های متحدالمرکز نشان داده شده است. این ژنوتیپ، یک ژنوتیپ فرضی است و به عنوان مرجع برای شناسایی ژنوتیپ‌های ایده‌آل استفاده می‌شود. بر این اساس، لاین‌های شماره ۲۲ و ۱۹ به لاین مرجع ایده‌آل نزدیک‌تر هستند و بنابراین به عنوان بهترین لاین‌ها در این بررسی شناسایی شدند.

بهترین تستر اولاً باید لاین‌ها را بهتر تمیز دهد، ثانیاً باید دارای عملکرد خوبی باشد. بر این اساس ژنوتیپی به عنوان

عبارت از لاین‌های شماره ۴، ۵، ۹، ۱۱، ۱۲، ۱۷، ۱۹، ۲۲ و ۲۴ بودند. این لاین‌ها به عنوان بهترین لاین‌ها که دارای پتانسیل برای گسترش پایه ژنتیکی ذرت و یا برای استفاده مستقیم در هیبرید ذرت تجاری در نظر گرفته شدند.

شاهد داشتند، با این حال با شدت گزینش ۱۵ درصد تعداد ۱۲ تست کراس برتر (تست کراس‌های شماره ۴، ۱۱، ۱۹، ۲۲، ۳۰، ۳۴، ۳۷، ۴۲، ۴۹، ۵۹، ۶۹ و ۷۲) انتخاب شدند. لاین‌های مادری حاره‌ای و نیمه حاره‌ای هیبریدهای برتر



شکل ۱- تجزیه لاین × تستر ۲۵ والد مادری و سه والد پدری ذرت برای عملکرد دانه با استفاده از روش GGE-biplot (A). نمودار مولفه تستر متوسط، (B) نمای چندضلعی بای پلات برای شناسایی بهترین دورگ‌ها، (C) نمودار تستر ایده‌آل، (D) نمودار لاین ایده‌آل.

Fig 1. Line × tester analysis of 25 female and three male parents of maize for grain yield using GGE-biplot method. A) Average tester coordination (GCA and SCA), B) Biplot polygon view to identify the best crosses, C) Biplot for ideal tester, D) Biplot for ideal line.

پایه ژنتیکی ژرم‌پلاسماهای بومی و یا داشتن امکان استفاده مستقیم این لاین‌ها برای تولید هیبرید تجاری در نظر گرفتند. سپس آن‌ها لاین‌های برتر گزینش شده توسط هر یک از تسترها و هم‌چنین گزینش هم‌زمان توسط دو و سه

فان و همکاران (Fan *et al.*, 2010) ابتدا والدین تلاقی‌های برتر و پر پتانسیل که از نظر عملکرد دانه برتر از هیبرید شاهد و یا در سطح هیبرید شاهد بودند را مشخص کردند و این لاین‌ها را به‌عنوان لاین‌های برتر در جهت تقویت

جدول ۵ ارائه شده است. به عنوان نمونه لاین‌های شماره ۲۲، ۱۱، ۱۹، ۴، ۱۵ و ۲۳ در تلاقی با K1264/5-1 در مقایسه با تلاقی سایر لاین‌ها با این تستر بالاترین عملکرد دانه را داشتند و بالاترین رتبه عملکرد دانه در تلاقی مربوط به K1264/5-1 را به خود اختصاص دادند. هم‌چنین بر اساس انتخاب هم‌زمان دو تستر K1264/5-1 و MO17، لاین‌های ۲۲، ۹، ۴، ۱۲، ۱۹ و ۱۷ گزینش شدند. به همین منوال گزینش لاین‌های برتر برای سایر حالات ترکیب تسترها نیز انجام شد. به‌طورکلی با وجود تشابه نسبی بین لاین‌های گزینش شده در هفت حالت، لاین‌های شماره ۲، ۳، ۴، ۵، ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۵، ۱۶، ۱۷، ۱۹، ۲۰، ۲۱، ۲۲، ۲۳، ۲۴ و ۲۴ لاین‌های انتخابی توسط یک یا چند روش بودند (جدول ۵).

تستر را معین کردند. بر این اساس تعداد حالات ممکن با سه تستر برابر با هفت حالت (سه حالت با یک تستر، سه حالت با دو تستر و یک حالت با هر سه تستر) می‌باشد. در این بررسی، لاین‌های برتر به ترتیب ۲۲، ۱۷، ۱۲، ۹، ۱۱، ۱۹، ۴، ۵ و ۲۴ (والد مادری دوازده تلاقی برتر از نظر عملکرد دانه) بودند (جدول ۳). هم‌چنین به‌منظور بررسی کارایی تسترها در گزینش لاین‌های برتر، رتبه عملکرد دانه تلاقی‌ها برای هر یک از تستر مشخص و در جدول ۴ ارائه شد. بر این اساس تعداد شش لاین برتر برای هر یک از تسترها و یا بر اساس رتبه مربوط به میانگین عملکرد دانه ترکیبات مختلف تستر با هر یک از لاین‌ها مشخص شدند. لاین‌های انتخاب شده توسط هر یک از تسترها و یا حالات مختلف ترکیب آن‌ها در

جدول ۴- رتبه عملکرد دانه دورگ‌های حاصل از ۲۵ لاین استخراجی از ژرم پلاسم‌های مناطق حاره‌ای و نیمه‌حاره‌ای سیمیت در تلاقی با سه تستر مناطق معتدله

Table 4. Grain yield ranks of crosses obtained from 25 lines derived from CIMMYT germplasm crossed with the three temperate maize testers

Line/Tester	K1264/5-1	MO17	B73
L1	21	20	11
L2	22	12	22
L3	24	18	10
L4	4	9	24
L5	20	4	4
L6	25	14	15
L7	23	23	8
L8	14	19	21
L9	10	3	3
L10	9	6	25
L11	2	21	17
L12	11	2	13
L13	17	25	14
L14	8	11	16
L15	5	13	20
L16	15	16	23
L17	18	1	12
L18	16	22	19
L19	3	17	1
L20	13	7	5
L21	12	10	9
L22	1	8	2
L23	6	15	18
L24	19	5	7
L25	7	24	6

جدول ۵- شش لاین برتر انتخاب شده توسط هر یک از تسترها و ترکیب‌های مختلف تسترها

Table 5. The superior six lines selected by each tester and by different combinations of testers

Tester [†]	T1	T2	T3	T12	T13	T23	T123
Selected lines	<u>L22</u>	<u>L17</u>	<u>L19</u>	<u>L22</u>	L3	<u>L9</u>	<u>L22</u>
	<u>L11</u>	<u>L12</u>	<u>L22</u>	<u>L9</u>	L2	<u>L22</u>	<u>L9</u>
	<u>L19</u>	<u>L9</u>	<u>L9</u>	<u>L4</u>	<u>L24</u>	<u>L5</u>	<u>L19</u>
	<u>L4</u>	<u>L5</u>	<u>L5</u>	<u>L12</u>	<u>L12</u>	<u>L17</u>	<u>L12</u>
	L15	<u>L24</u>	L20	<u>L19</u>	L21	<u>L19</u>	L20
	L23	L10	L25	<u>L17</u>	L16	<u>L12</u>	<u>L5</u>

[†] T, Tester; T1, K1264/5-1; T2, MO17; T3, B73; T12, two testers (T1 and T2); T13, two testers (T1 and T3); T23, T23, two testers (T2 and T3); T123, three testers (T1, T2 and T3).

داد که چهار لاین شماره ۹، ۱۲، ۱۹ و ۲۴ از میان نه لاین برتر در پنج حالت از هفت حالت انتخاب شدند. بنابراین می‌توان نتیجه‌گیری کرد که یک تستر مناسب توانایی تفکیک لاین‌های برتر (نه همه آن‌ها) را دارد، هر چند که استفاده از دو تستر خطر عدم انتخاب یا حذف یک لاین برتر را به میزان زیادی کاهش می‌دهد. این نتایج در تطابق با یافته‌های فان و همکاران (Fan et al., 2010) و شیری و همکاران (Shiri et al., 2021) بود. به علت وجود تفاوت رتبه عملکرد تلاقی‌های حاصل از تسترها با یکدیگر (جدول ۴)، همبستگی رتبه عملکرد دانه تلاقی‌های داخل تسترها نیز غیر معنی‌دار بود (جدول ۷). این نشان می‌دهد که تسترهای مورد مطالعه در گروه‌بندی لاین‌ها متفاوت عمل کردند و این حاکی از متفاوت بودن گروه هتروتنیکی تسترها می‌باشد (جدول ۷).

به منظور بررسی بیشتر، همبستگی عملکرد دانه برای حالات مختلف ترکیب تسترها (هفت حالت) برآورد و در جدول ۸ ارائه شد. نتایج نشان داد که همبستگی رتبه بین هر یک از تسترها و با ترکیب سه‌تایی تسترها مثبت و بسیار معنی‌دار بود. این یافته‌ها نشان می‌دهند که می‌توان از تعداد کم‌تر تستر مناطق معتدله در غربال‌گری لاین‌های ذرت استخراجی از ژرم‌پلاسما‌های مناطق حاره‌ای و نیمه‌حاره‌ای برای مناطق معتدله استفاده کرد. فان و همکاران (Fan et al., 2010) نیز در غربال‌گری لاین‌های استخراجی از ژرم‌پلاسما‌های مناطق حاره‌ای و نیمه‌حاره‌ای در مناطق معتدل چین به نتایج مشابهی دست یافتند و تاکید کردند که می‌توان فقط از یک تستر به جای چهار تستر استفاده کرد.

کارایی یک تستر یا حالت ترکیبی از تسترها زمانی بالا خواهد بود که توانایی انتخاب همه یا تعداد بیشتری از لاین‌های برتر را داشته باشند. بنابراین برای دستیابی به چنین نتیجه‌گیری مهم، لاین‌های مشابه که در میان لاین‌های گزینش شده با هریک از تسترها و یا حالت ترکیبی تسترها (روش هفت تست کراس) با لاین‌های مادری دوازده تلاقی برتر (لاین‌های شماره ۴، ۵، ۹، ۱۱، ۱۲، ۱۷، ۱۹، ۲۲ و ۲۴) مشخص و نتایج در جدول ۶ ارائه شد. سپس به منظور مقایسه کارایی تسترها، والد مادری شش تست کراس برای هر تستر یا ترکیب تسترها مشخص و با مقایسه لاین‌های انتخابی تسترها با لاین‌های برتر (والد مادری ۱۲ تلاقی برتر) کارایی آن‌ها بررسی شد.

با بررسی دقیق لاین‌های گزینش شده توسط هفت حالت مختلف تست کراس‌ها (جدول ۶)، مشخص شد که در میان شش لاین انتخابی دو تستر B73 و MO17، پنج لاین برتر انتخابی (نه همه لاین‌های برتر) قرار داشت. در صورتی که تستر K1264/5-1 توانست چهار لاین برتر را انتخاب کند. بنابراین دو تستر B73 و MO17، قدرت تفکیک بالایی در گزینش لاین‌های برتر از میان لاین‌های استخراجی از ژرم‌پلاسما‌های مناطق حاره‌ای و نیمه‌حاره‌ای سیمیت دارند و تستر K1264/5-1 قدرت تفکیک نسبتاً خوبی داشت. همچنین نتایج نشان داد که استفاده هم‌زمان از دو تستر B73 و MO17 برای گزینش لاین‌های استخراجی از ژرم‌پلاسما‌های مناطق حاره‌ای و نیمه‌حاره‌ای کارایی بسیار بالایی دارد، زیرا هر شش لاین انتخابی در این حالت در میان لاین‌های برتر قرار داشتند. علاوه بر این، نتایج حاصل نشان

جدول ۶- تعیین لاین‌های برتر از بین لاین‌های انتخاب شده توسط هریک از تسترها و یا ترکیب مختلف تسترها

Table 6. Identifying the superior lines among the lines selected by each tester or different combinations of testers

Superior lines †	T1	T2	T3	T12	T13	T23	T123
L4	S	-	-	S	-	-	-
L5	-	S	S	-	-	S	S
L9	-	S	S	S	-	S	S
L11	S	-	-	-	-	-	-
L12	-	S	-	S	S	S	S
L17	-	S	-	S	-	S	-
L19	S	-	S	S	-	S	S
L22	S	-	S	S	-	S	S
L24	-	S	S	-	S	-	-

† T, Tester; T1, K1264/5-1; T2, MO17; T3, B73; T12, two testers (T1 and T2); T13, two testers (T1 and T3); T23, two testers (T2 and T3); T123, three testers (T1, T2 and T3).

جدول ۷- همبستگی رتبه‌ای اسپیرمن برای رتبه عملکرد دانه تلاقی‌های حاصل از ۲۵ لاین با سه تستر مورد مطالعه در این آزمایش

Table 7. Spearman's rank correlation for grain yield rank of crosses obtained from 25 lines with three testers studied in this experiment

Tester	T1 (K1264/5-1)	T2 (MO17)	T3 (B73)
T1 (K1264/5-1)	1		
T2 (MO17)	0.085	1	
T3 (B73)	-0.013	0.152	1

جدول ۸- ضریب همبستگی پیرسون برای میانگین عملکرد دانه در ترکیب‌های مختلف تسترها

Table 8. Pearson's correlation coefficient for average grain yield in different combinations of testers

Tester	T1	T2	T3	T12	T13	T23	T123
T1	1						
T2	0.102	1					
T3	0.112	0.126	1				
T12	0.778**	0.704**	0.161	1			
T13	-0.216	0.131	0.065	-0.071	1		
T23	0.142	0.754**	0.747**	0.578**	0.130	1	
T123	0.672**	0.622**	0.622**	0.873**	-0.025	0.828**	1

** Significant at 1% probability level.

† T, Tester; T1, K1264/5-1; T2, MO17; T3, B73; T12, two testers (T1 and T2); T13, two testers (T1 and T3); T23, two testers (T2 and T3); T123, three testers (T1, T2 and T3).

نتیجه‌گیری کلی

نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد که امکان استفاده مستقیم از لاین‌های شماره ۴، ۵، ۹، ۱۱، ۱۲، ۱۹، ۲۲ و ۲۴ استخراج شده از ژرم‌پلاسم‌های مناطق حاره‌ای و نیمه‌حاره‌ای سیمیت در اصلاح عملکرد دانه ذرت وجود دارد. بنابراین، ژرم‌پلاسم ذرت مناطق حاره‌ای و نیمه‌حاره‌ای می‌تواند امکان دستیابی به منابع برتر و سازگارتر را تسهیل کند. علاوه بر این، غربال‌گری لاین‌های استخراجی از ژرم‌پلاسم‌های مناطق حاره‌ای و نیمه‌حاره‌ای سیمیت با تست‌های معتدله ذرت کشور امکان‌پذیر است. در این مطالعه، دو تستر B73 و MO17 قدرت تفکیک بالایی در گزینش لاین‌های برتر از میان لاین‌های استخراجی از ژرم‌پلاسم‌های مناطق حاره‌ای و نیمه‌حاره‌ای سیمیت داشتند. علاوه بر این، نتایج نشان داد که یک تستر مناسب، توانایی تفکیک لاین‌های برتر (نه همه آن‌ها) را دارد، اگرچه استفاده از دو تستر خطر عدم انتخاب یا حذف یک لاین برتر را به میزان زیادی کاهش خواهد داد.

تضاد منافع

نویسنده (گان) تایید می‌کنند که این تحقیق در غیاب هرگونه روابط تجاری یا مالی که می‌تواند به‌عنوان تضاد منافع بالقوه تعبیر شود، انجام شده است.

رعایت اخلاق در نشر

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

اجازه انتشار مقاله

نویسنده (گان) 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

- Adebayo, A. M., Menkir, A., Blay, E., Gracen, V., & Danquah, E. (2017). Combining ability and heterosis of elite drought-tolerant maize inbred lines evaluated in diverse environments of lowland tropics. *Euphytica*, 213, 1-12. doi: [10.1007/s10681-017-1840-5](https://doi.org/10.1007/s10681-017-1840-5).
- Aslam, M., Maqbool, M. A., & Cengiz, R. (2015). Drought Stress in Maize (*Zea mays* L.). Effects, Resistance Mechanisms, Global Achievements and Biological Strategies for Improvement. Springer Cham, Switzerland. doi: [10.1007/978-3-319-25442-5](https://doi.org/10.1007/978-3-319-25442-5).
- Bertoia, L., Lopez, C., & Burak, R. (2006). Biplot analysis of forage combining ability in maize landraces. *Crop Science*, 46, 1346-1353. [10.2135/cropsci2005.09-0336](https://doi.org/10.2135/cropsci2005.09-0336).
- Cairns, J. E., Hellin, J., Sonder, K., Araus, J. L., Macrobert, J. F., Thierfelder, C., & Prasanna, B. M. (2013). Adapting maize production to climate change in sub-Saharan Africa. *Food Security*, 5, 345-360. doi: [10.1007/s12571-013-0256-x](https://doi.org/10.1007/s12571-013-0256-x).
- Campos, H., Cooper, M., Habben, J. E., Edmeades, G. O., & Schussler, J. R. (2004). Improving drought tolerance in maize: A view from industry. *Field Crops Research*, 90, 19-34. doi: [10.1016/j.fcr.2004.07.003](https://doi.org/10.1016/j.fcr.2004.07.003).
- Chen, H. M., Wang, Y. F., Yao, W. H., Luo, L. M., Li, J. L., Xu, C. X., Fan, X. M., & Gho, H. C. (2011). Utilization potential of the temperate maize inbreds integrated with tropical germplasm. *ACTA Agronomica Sinica*, 37(10), 1785-1793 doi: [10.3724/SP.J.1006.2011.01785](https://doi.org/10.3724/SP.J.1006.2011.01785).
- Choukan, R. (2008). Methods of Genetical Analysis of Quantitative Traits in Plant Breeding. Publication of Seed & Plant Improvement Institute, Karaj, Iran. 270 p. [In Persian].
- Choukan, R., Estakhr, A., Afarinesh, A., Afsharmanesh, Gh. R., Shiri, M. R., Mosavat, A., & Farghei, Sh. (2015). Combining ability of maize lines derived from CIMMYT germplasm in crossing with temperate lines. *Iranian Journal of Agricultural Science*, 16(4), 334-345. [In Persian] dori: [20.1001.1.15625540.1393.16.4.6.7](https://doi.org/20.1001.1.15625540.1393.16.4.6.7).

- Choukan, R., Hossainzadeh, A., Ghannadha, M. R., Warburton, M. L., Talei, A. R., & Mohammadi, S. A. (2006). Use of SSR data to determine relationships and potential heterotic groupings within medium to late maturing Iranian maize inbred lines. *Field Crops Research*, 95(2-3), 212-222. doi: [10.1016/j.fcr.2005.02.011](https://doi.org/10.1016/j.fcr.2005.02.011).
- Doswell, C. (2019). *Maize in the Third World*. CRC Press. Boca Raton, FL, USA.
- Fan, X. M., Chen, H. M., Tan, J., Xu, C. X., Zhang, Y. M., Huang, Y. X., & Kang, M. S. (2008). A new maize heterotic pattern between temperate and tropical germplasms. *Agronomy Journal*, 100, 917-923. doi: [10.2134/agronj2007.0298](https://doi.org/10.2134/agronj2007.0298).
- Fan, X. M., Zhang, Y. D., Liu, L., Chen, H. M., Yao, W. H., Kang, M., & Yang, J. Y. (2010). Screening tropical germplasm by temperate inbred testers. *Maydica*, 55, 55-63.
- Gouesnard, B., Sanou, J., Panouille, A., Bourion, V., & Boyat, A. (1996). Evaluation of agronomic traits and analysis of exotic germplasm polymorphism in adapted exotic maize crosses. *Theoretical & Applied Genetics*, 92, 368-374. doi: [10.1007/BF00223681](https://doi.org/10.1007/BF00223681).
- Grafton, Q. R., Williams, J., & Jiang, Q. (2015). Food and water gaps to 2050: Preliminary results from the global food and water system (gfws) platform. *Food Security*, 7, 209-210. doi: [10.1007/s12571-015-0439-8](https://doi.org/10.1007/s12571-015-0439-8).
- Kempton, P. (1957). *An Introduction to Genetic Statistics*. John Wiley and Sons, Inc., New York. 545 p.
- Lanes, E. C. M., Viana, J. M. S., Paes, G. P., Paula, M. F. B., & Maia, C. (2014). Population structure and genetic diversity of maize inbreds derived from tropical hybrids. *Genetics & Molecular Research*, 13(3), 7365-7376. doi: [10.4238/2014.September.12.2](https://doi.org/10.4238/2014.September.12.2).
- Liu, K. J., Goodman, M. M., Muse, S., Smith, J. S., Buckner, E., & Doebley, J. (2003). Genetic structure and diversity among maize inbred lines as inferred from DNA microsatellites. *Genetics*, 165, 2117-2128. doi: [10.1093/genetics/165.4.2117](https://doi.org/10.1093/genetics/165.4.2117).
- Meseka, S., Williams, W. P., Warburton, M. L., Brown, R. L., Augusto, J., Ortega-Beltran, A., Bandyopadhyay, R., & Menki, A. (2018). Heterotic affinity and combining ability of exotic maize inbred lines for resistance to aflatoxin accumulation. *Euphytica*, 214, 184. doi: [10.1007/s10681-018-2254-8](https://doi.org/10.1007/s10681-018-2254-8).
- Ministry of Jihad-e-Agriculture. (2023). Statistics report of 2021-2022 years. Statistics and Information Office, Ministry of Jihad-e-Agriculture, Tehran, Iran. [In Persian].
- Momeni, H., Shiri, M., Hervan, E. M., & Khosroshahli, M. (2020). The usefulness of GGE biplot methodology for line×tester data of maize inbred lines. *Bragantia*, 79, 537-545. doi: [10.1590/1678-4499.20200130](https://doi.org/10.1590/1678-4499.20200130).
- National Corn Growers Association. (2023). World of corn 2023. Retrieved December 4, 2023, from <https://ncga.com/world-of-corn-iframe/pdf/WOC-2023.pdf>.
- Nelson, P. T., & Goodman, M. M. (2008). Evaluation of elite exotic maize inbreds for use in temperate breeding. *Crop Science*, 48, 85-92. doi: [10.2135/cropsci2007.05.0287](https://doi.org/10.2135/cropsci2007.05.0287).
- Prasanna, B. M. (2012). Diversity in global maize germplasm: Characterization and utilization. *Journal of Biosciences*, 37, 843-855. doi: [10.1007/s12038-012-9227-1](https://doi.org/10.1007/s12038-012-9227-1).
- Ruswandi, D., Suprianta, J., Waluyo, B., Makkulawu, A. T., Suryandi, E., Chindy, Z. U., & Ruswandi, S. (2015). GGE biplot analysis for combining ability of grain yield and early maturity in maize mutant in Indonesia. *Asian Journal of Crop Science*, 7, 160-173. doi: [10.3923/ajcs.2015](https://doi.org/10.3923/ajcs.2015).
- Shiri, M. (2017). The performance of temperate maize testers for screening of tropical and subtropical germplasm. *Journal of Crop Breeding*, 9(23), 85-94. [In Persian]. doi: [10.29252/jcb.9.23.85](https://doi.org/10.29252/jcb.9.23.85).
- 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](https://doi.org/10.22124/c.2017.2431).
- Shiri, M., Aliyev, R. T., & Choukan, R. (2010). Water stress effects on combining ability and gene action of yield and genetic properties of drought tolerance indices in maize. *Research Journal of Environmental Science*, 4(1), 75-84. doi: [10.3923/rjes.2010.75.84](https://doi.org/10.3923/rjes.2010.75.84).
- Shiri, M., Choukan, R., & Aliyev, R. T. (2015). Drought stress effects on gene action and combining ability of maize inbred lines. *Seed & Plant Journal*, 31(3), 421-440 [In Persian]. doi: [10.22092/SPIJ.2017.111268](https://doi.org/10.22092/SPIJ.2017.111268).

- Shiri, M., Choukan, R., Estakhr, A., Fareghi, S., & Afarinesh, A. (2021). Temperate tester's efficiency in the screening of tropical and subtropical maize germplasm. *Cereal Research Communications*, 49, 639-647. doi: [10.1007/s42976-021-00141-5](https://doi.org/10.1007/s42976-021-00141-5).
- Simic, D., Presterl, T., Seitz, G., & Geeiger, H. H. (2003). Comparing methods for integrating exotic germplasm into European forage maize breeding programs. *Crop Science*, 43(6), 1952-1959. doi: [10.2135/cropsci2003.1952](https://doi.org/10.2135/cropsci2003.1952).
- Whitehead, F. C., Caton, H. G., Hallauer, A. R., Vasal, S., & Cordova, H. (2006). Incorporation of elite subtropical and tropical maize germplasm into elite temperate germplasm. *Maydica*, 51(1), pp. 43-56.
- Yan, W. (2001). GGEbiplot- A windows application for graphical analysis of multi-environment trial data and othertypes of two-way data. *Agronomy Journal*, 93(5), 1111-1118. doi: [10.2134/agronj2001.9351111x](https://doi.org/10.2134/agronj2001.9351111x).
- Yan, W., & Hunt, L. A. (2002). Biplot analysis of diallel data. *Crop Science*, 42(1), 21-30. doi: [10.2135/cropsci2002.0021](https://doi.org/10.2135/cropsci2002.0021).
- Yan, W., & Kang, M. S. (2002). GGE Biplot Analysis: A Graphical Tool for Breeders, Geneticists, and Agronomists. CRC Press, Boca Raton, FL, 605 p.