Razi University

Cereal Biotechnology and Biochemistry

Online ISSN: 2783-5170

Homepage: https://cbb.razi.ac.ir

The Study of Genetic Characteristics of Agrophysiological Traits and Antioxidant Defense System in Maize Hybrid (SC01) belongedto Medium Maturity Group

Yeganeh Shafiei[1], Mohammad Mohsenzadeh Golfazani[1] ✉, Sajjad Moharramnejad[2], Habibullah Samizadeh Lahiji[1] & Farzad Banaei Asl [3]

[1] Department of Agricultural Biotechnology, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran.

[2] Research Assistant Professor, Agricultural and Horticultural Science Research Department, Agricultural and Natural Resources Research and Training Center of Ardabil Province (Moghan), Iran.

[3] Biotechnology Research Department, Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Tehran, Tehran, Iran.

✉ Corresponding author. E-mail: mohsenzadeh.mohamad@guilan.ac.ir

ABSTRACT

Introduction: Given the increasing demand for food due to population growth, besides the limited availability of arable land, the role of increasing production through plant breeding is evident. Maize is one of the key agricultural products in the world, a primary food source for humans and animals, and also used for biomass and bio-product production. Referring to the increased vigor of hybrids compared to their parents' heterosis can help to increase crop yields. Maize hybrids produced by crossing two or more pure lines have higher yields than pure maize. Therefore, the present study aimed to estimate heterosis and evaluate the coefficient of phenotypic and genetic variations and heritability in maize hybrids.

Materials and methods: The plant materials included the maternal parent (MS02), the paternal parent (TS01), and the SC01 offspring evaluated during the 2023 growing season at the Agricultural and Natural Resources Research and Education Center of Ardabil Province (Moghan) in a randomized complete block design with four replications. Agrophysiological traits included plant height, grain yield, pigment content, stomatal conductance, and chlorophyll fluorescence, antioxidant defense system traits included proline, polyphenols, malondialdehyde, hydrogen peroxide, soluble protein, and antioxidant enzymes, including superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POX), and catalase (CAT). Analysis of variance (ANOVA) was performed to estimate the coefficients of phenotypic and genetic variations, general heritability, and heterosis based on the mean of parents and the superior parent.

Results: The analysis of variance showed significant differences among the genotypes (MS02×TS01; SC01) in terms of the studied traits. The difference between genotypes was significant for all agro-physiological traits and antioxidant defense systems except for chlorophyll a, Fm, Fv and Fv/Fm. According to the results, among the studied traits, chlorophyll fluorescence (Fm) and hydrogen peroxide content had the highest mean values, error variance, genetic variance, and phenotypic variance compared to the other traits. Moreover, the CAT enzyme had the highest error variance, genetic variance, phenotypic variance, genetic diversity coefficient, and phenotypic diversity coefficient among the antioxidant enzymes. These results indicate that heterosis could significantly improve the morphological traits of F1 hybrid maize (SC01). Furthermore, high genotypic variance for most traits shows a high potential for improving these traits through plant breeding. The range of heterosis variations (relative to the mean of parents) among the evaluated traits was between -0.04 and 95.19, indicating the diversity of heterosis levels among the evaluated traits in the SC01 hybrid.

Conclusion: Given the observed diversity in the present study, indicating the presence of alleles with dominance effects in agro-physiological traits and traits related to the antioxidant defense system, as well as the desirable diversity and heritability in agro-physiological traits and antioxidant defense systems, there are differences between the maternal and paternal lines of the SC01 hybrid. It seems that using agro-physiological traits and antioxidant defense systems may be useful in determining the best crosses to maximize heterosis in maize. The observed heterosis provides an opportunity to develop new hybrids with better performance and quality. Selecting genotypes with desirable alleles and suitable parents with high genetic diversity is an effective strategy for hybrid maize breeding that may result in increased grain yield and improved photosynthetic efficiency.

Keywords: Antioxidant Enzymes, Analysis of Variance (ANOVA), Physiological Traits, Morphological Traits, Heritability, Heterosis.

Article Type: Research Article

Article history: Received: 18 Dec 2023, **Revised:** 29 Jan 2024, **Accepted:** 19 Feb 2024, **Published online:** 27 Mar 2024

Cite this article: Shafiei, Y., Mohsenzadeh Golfazani, M., Moharramnejad, S., Samizadeh Lahiji, H. & Banaei Asl, F. (2024). The Study of Genetic Characteristics of Agrophysiological Traits and Antioxidant Defense System in Maize Hybrid (SC01) belongedto Medium Maturity Group. *Cereal Biotechnology and Biochemistry*, *3*(1), 15-36. DOI: 10.22126/cbb.2024.10864.1075

© The Author(s).

10.22126/cbb.2024.10864.1075

Publisher: Razi University

بیوتکنولوژی و بیوشیمی غلات
شاپا الکترونیکی: ۵۱۷۰-۲۷۸۳
Homepage: https://cbb.razi.ac.ir

بررسی ویژگی‌های ژنتیکی صفات آگروفیزیولوژیکی و سیستم دفاع آنتی اکسیدان هیبرید ذرت (SC01) از گروه متوسطرس

یگانه شفیعی[۱]، محمد محسن زاده گلفزانی[۱]✉، سجاد محرم نژاد[۲]، حبیب اله سمیع زاده لاهیجی[۱] و فرزاد بنائی اصل [۳]

[۱] گروه بیوتکنولوژی کشاورزی، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.
[۲] استادیار پژوهش، بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اردبیل (مغان)، ایران.
[۳] استادیار بخش تحقیقات زیست‌فناوری، موسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران.
✉نویسنده مسئول. رایانامه: mohsenzadeh.mohamad@guilan.ac.ir

چکیده

مقدمه: با توجه به نیاز روزافزون به مواد غذایی به لحاظ افزایش جمعیت و محدود بودن زمین‌های قابل کشت، نقش افزایش تولید از طریق اصلاح‌نباتات بدیهی است. ذرت یکی از مهم‌ترین محصولات کشاورزی در جهان است. این محصول یکی از منابع اصلی غذا برای انسان‌ها و حیوانات است و همچنین برای تولید زیست‌توده و محصولات زیستی استفاده می‌شود. هتروزیس، که به افزایش بنیه هیبرید نسبت به والدین اطلاق می‌شود، می‌تواند به افزایش تولید محصول کمک کند. هیبریدهای ذرت، که از تلاقی دو یا چند لاین خالص ایجاد می‌شوند، عملکرد بالاتری نسبت به ذرت‌های خالص دارند. بنابراین، مطالعه حاضر با هدف برآورد هتروزیس و ارزیابی ضریب تغییرات فنوتیپی، ژنتیکی و برآورد وراثت‌پذیری در هیبریدهای ذرت اجرا گردید.

مواد و روش‌ها: مواد گیاهی شامل والد مادری (MS02)، والد پدری (TS01) و نتاج SC01 که طی سال زراعی ۱۴۰۲ در مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اردبیل (مغان) در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی در چهار تکرار مورد ارزیابی مزرعه‌ای قرار گرفتند. صفات آگروفیزیولوژیکی شامل ارتفاع بوته، عملکرد دانه، میزان رنگ‌دانه، هدایت روزنه‌ای و فلورسانس کلروفیل و صفات سیستم دفاع آنتی اکسیدان شامل پرولین، پلی فنول، مالون دی آلدئید، پراکسید هیدروژن و پروتئین محلول و آنزیم‌های آنتی اکسیدان شامل سوپراکسید دیسموتاز (SOD)، پراکسیداز (POX) و کاتالاز (CAT) بودند. از تجزیه واریانس برای برآورد ضریب تغییرات فنوتیپی، ضریب تغییرات ژنتیکی و وراثت‌پذیری عمومی استفاده گردید و هتروزیس بر اساس میانگین والدین و والد برتر محاسبه شد.

یافته‌ها: نتایج تجزیه واریانس تفاوت معنی‌داری میان ژنوتیپ‌ها (MS02× TS01; SC01) از لحاظ صفات مورد بررسی نشان داد. تفاوت ژنوتیپ‌ها برای تمام صفات آگروفیزیولوژی و سیستم دفاع آنتی‌اکسیدان به جز کلروفیل a، F_m، F_v و F_v/F_m معنی‌دار بود. نتایج نشان داد که از بین صفات مورد مطالعه فلورسانس کلروفیل F_m و میزان پراکسیدهیدروژن دارای بیشترین مقادیر میانگین، واریانس خطا، واریانس ژنتیکی و واریانس فنوتیپی در مقایسه با سایر صفات مورد مطالعه بودند. آنزیم CAT نیز از بین آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان دارای بیشترین مقادیر واریانس خطا، واریانس ژنتیکی، واریانس فنوتیپی، ضریب تنوع ژنتیکی و فنوتیپی در مقایسه با سایر صفات مورد مطالعه بود. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که هتروزیس می‌تواند به‌طور قابل توجهی صفات مورفولوژیکی هیبرید F_1 (SC01) را بهبود ببخشد. همچنین، واریانس ژنوتیپی بالا برای اکثر صفات نشان‌دهنده پتانسیل بالای بهبود این صفات از طریق اصلاح نبات است. دامنه تغییرات هتروزیس نسبت به میانگین والدین بین صفات مورد ارزیابی بین ۰/۰۴- تا ۹۵/۱۹ بود که نشان از تنوع میزان هتروزیس در بین صفات مورد ارزیابی در هیبرید SC01 داشت.

نتیجه‌گیری: با توجه به تنوع مشاهده شده در این پژوهش که نشان‌دهنده وجود آلل‌های با اثر غالبیت در صفات آگروفیزیولوژیکی و صفات مربوط به سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی است و همچنین، وجود تنوع و وراثت‌پذیری مطلوب در صفات آگروفیزیولوژیکی و سیستم دفاع آنتی اکسیدان، نشان از اختلاف بین لاین‌های مادری و پدری هیبرید SC01 است. چنین به‌نظر می‌رسد که استفاده از صفات آگروفیزیولوژیکی و سیستم دفاع آنتی اکسیدان می‌تواند در تعیین برترین تلاقی جهت بهره‌مندی حداکثری از هتروزیس در ذرت مفید باشد. هتروزیس مشاهده شده فرصتی برای توسعه هیبریدهای جدید با عملکرد و کیفیت بهتر فراهم می‌کند. انتخاب ژنوتیپ‌های با آلل‌های مطلوب و والدین مناسب با تنوع ژنتیکی بالا، استراتژی موثری برای اصلاح ذرت هیبرید به شمار می‌آید و می‌تواند به افزایش عملکرد دانه و بهبود کارایی فتوسنتز منجر شود.

واژه‌های کلیدی: بیان ژن، تنش، کاربرد روی، مالون دی آلدهید.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

نوع مقاله: دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۲۷ **اصلاح:** ۱۴۰۲/۱۱/۰۹ **پذیرش:** ۱۴۰۲/۱۱/۳۰، **انتشار آنلاین:** ۱۴۰۳/۰۱/۰۸

استناد: شفیعی، ی.، محسن زاده گلفزانی، م.، محرم نژاد، س.، سمیع زاده لاهیجی، ح. و بنائی اصل، ف. (۱۴۰۳). بررسی ویژگی‌های ژنتیکی صفات آگروفیزیولوژیکی و سیستم دفاع آنتی اکسیدان هیبرید ذرت (SC01) از گروه متوسطرس. *بیوتکنولوژی و بیوشیمی غلات*، ۳(۱)، ۱۵-۳۶. DOI: 10.22126/cbb.2024.10864.1075

ناشر: دانشگاه رازی

© نویسندگان.

مقدمه

افزایش جمعیت جهان نیاز به دو برابر مواد غذایی تا سال ۲۰۵۰ را به همراه دارد (Adhikari *et al*., 2020)، در حالی که زمین‌های قابل کشت محدود هستند. به همین دلیل، افزایش تولید از طریق اصلاح نباتات و روش‌های نوین ضروری است (Ray *et al*., 2013).بهره‌برداری از هتروزیس، به‌عنوان یک روش مؤثر برای افزایش عملکرد ذرت، مطرح شده است و می‌تواند به تأمین پایدار غذایی کمک کند (Akel *et al*., 2019; Boeven *et al*., 2016). با وجود تلاش‌ها، موفقیت کمی در تجاری‌سازی هیبریدهای غلات خودگشن به‌دست آمده است (Longin *et al*., 2012). ذرت یکی از مهم‌ترین محصولات کشاورزی با ویژگی‌هایی همچون عملکرد بالا، مقاومت به آفات و بیماری‌ها است. ژنتیک ذرت نقش مهمی در تعیین این ویژگی‌ها دارد و پیشرفت‌های ژنتیکی اخیر به توسعه هیبریدهای با ویژگی‌های مطلوب منجر شده است. این هیبریدها از ترکیب دو ذرت دانه‌ای خالص با ژن‌های منحصر به فرد به‌وجود می‌آیند و از پتانسیل بالایی برای تولید محصولات کشاورزی مقاوم به بیماری‌ها و با عملکرد بالا برخوردار هستند، که می‌توانند به بهبود امنیت غذایی و پایداری کشاورزی کمک کنند (Prasad *et al*., 2017).

هتروزیس، پدیده‌ای طبیعی است که وابسته به تنوع ژنتیکی بوده و به افزایش بنیه هیبرید نسبت به والدین آن‌ها اطلاق می‌شود (Berlan., 2021; Longin *et al*., 2012). هتروزیس در گیاهان بسیار متداول و به‌ویژه در گیاهان دگرگشن بسیار بالا است و بسته به نوع گیاه زراعی، افزایش عملکرد در دامنه‌ای بین ۱۰ تا ۵۰ درصد در گیاهان خودگشن را موجب می‌شود (Adhikari *et al*., 2020; Marlee *et al*., 2021). در حال حاضر، تعدادی از گیاهان زراعی، سبزیجات و گل‌ها ارقام تجاری هیبرید رایج‌ترین نوع ارقام مورد کشت هستند (Birchler *et al*., 2003).یکی از عمده مناطق تولید بذر هیبرید ذرت کشور ایران، منطقه مغان با سطح زیر کشت حدود ۴ هزار هکتار که بیش از ۸۰ درصد بذر هیبرید ذرت را تولید می‌کند و استان کرمانشاه نیز در رده دوم قرار دارد (Anonymous, 2023). شروع تحقیقات ذرت در ایران از سال ۱۳۴۹ با تولید بذر هیبرید و از سال ۱۳۵۰ با وارد کردن والدین ۱۰ هیبرید برگزیده دابل‌کراس از کشور یوگسلاوی در سطح ۲۰ هکتار در کرج آغاز شد. عملکرد بذر هیبرید تولیدی بین ۰/۴۴۴ تا ۱/۱۰۵ تن در هکتار بوده است. در سال ۱۳۵۰، مجدداً والدین هشت هیبرید از ایستگاه تحقیقات زمون‌پل یوگسلاوی وارد و در سطح چهار هکتار در کرج و دشت ناز ساری کشت و بررسی شد (Rostami & Mohammadi, 2020).هتروزیس در درجه اول تحت تأثیر تنوع ژنتیکی والدین قرار دارد (Miller *et al*., 2021; Zhang & Li, 2019). سال‌های اخیر با در دسترس قرار گرفتن ابزارهای ژنومی جزئیات بیشتری از ارتباط هتروزیس، اختلاف بین والدین و هیبریدها به‌دست آمده است (Birchler *et al*., 2003; Schnable & Springer, 2013). استفاده گسترده از

هیبریدهای ذرت همراه با بهبود عملیات زراعی توانسته است عملکرد ذرت را طی ۵ دهه از سال ۱۹۳۰ به ۳ برابر افزایش دهد که در مورد هیچ محصول زراعی چنین اتفاقی رخ نداده است (Ahmadi *et al*., 2009). سهم اصلاح نباتات در این افزایش ۶۰ درصد برآورد شده است. اولین بار شول[1] در سال ۱۹۰۸ پیشنهاد تولید لاین‌های اینبرد را از طریق خودگشنی به مدت ۷-۶ نسل و سپس تلاقی اینبرد لاین‌ها به منظور تعیین بهترین هیبرید یا ترکیب ارایه داد (Shull, 1908). پذیرش ذرت هیبرید مانند هر تئوری یا نظریه دیگری بسیار کند بود، زیرا تولید بذر هیبرید بدلیل قدرت پایین بوته‌ها و عملکرد کم بذر والدین اینبرد غیراقتصادی بود. جونز[2] در سال ۱۹۲۲ پیشنهاد استفاده از دابل کراس‌ها را مطرح کرد، بطوریکه والدین هیبرید نیز خود سینگل کراس بودند. کشت این بذور به سرعت گسترش یافت و تا اوایل دهه ۱۹۴۰ اغلب ذرت کشت شده در آمریکا هیبرید بود (Jones, 1922). از اوایل دهه ۱۹۵۰ دو مسئله عمده اتفاق افتاد. ۱: افزایش کود مصرفی (بویژه کود ازته) ۲: افزایش تراکم بوته در واحد سطح. لذا دوباره اقبال عمومی به سمت سینگل کراس‌ها[3] گرایش یافت چون علاوه بر عملکرد بالاتر از یکنواختی بیشتری هم برخوردار بودند. امروزه تقریباً تمامی بذر هیبرید مورد استفاده در کشورهای پیشرفته سینگل کراس و مقداری نیز دابل کراس[4] و تری وی کراس[5] هستند. روند سریع افزایش سطح زیر کشت ذرت دانه‌ای در کشور ضرورتاً باعث افزایش سطح و میزان تولید بذر هیبرید شد بطوریکه تولید بذر از ۲۰۰۰ تن در سال ۱۳۷۲ به ۱۲۰۰۰ تن در سال ۱۴۰۱ بالغ گردید (Ahmadi *et al*., 2009).

یکی از مهم‌ترین اقدامات پیش از شروع برنامه اصلاحی اطلاع از وراثت‌پذیری[6] و تنوع ژنتیکی[7] صفات مورد بررسی می‌باشد.(Conti., 1985) تنوع ژنتیکی از اهمیت زیادی در پیشرفت اهداف به‌نژادی گیاهانی نظیر ذرت برخوردار است (Briggle., 1963). ضریب تغییرات ژنوتیپی[8] و فنوتیپی[9] در روشن‌تر شدن درک درست از تنوع موجود در مواد ژنتیکی مورد بررسی کمک می‌کنند. وراثت‌پذیری بالا معیاری برای انتخاب ژنوتیپ‌ها در نسل‌های اولیه فراهم می کند (Nizamani *et al*., 2020). موسوی و همکارن (۲۰۱۸) در مطالعه خود بیان داشتند که صفات مورد مطالعه آن‌ها دارای وراثت‌پذیری و تنوع ژنتیکی بالایی بوده است (Mousavi *et al*., 2018).

این پژوهش با هدف برآورد درصد هتروزیس، ضریب تغییرات فنوتیپی، ژنتیکی و وراثت‌پذیری هیبرید F_1 (SC01)، که حاصل تلاقی والد مادری (MS02) با والد پدری (TS01) تحت شرایط مزرعه بر اساس صفات

[1] Shull
[2] Jones
[3] Single Cross
[4] Double Cross
[5] Three Way Cross
[6] Heritability
[7] Genetic variability
[8] Genotypic coefficient of variation
[9] Phenotypic coefficient of variation

آگروفیزیولوژیکی و سیستم دفاع آنتی اکسیدان انجام گرفت.

مواد و روش‌ها

مواد گیاهی و شرایط رشد

پژوهش حاضر طی سال زراعی ۱۴۰۲ در مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اردبیل (مغان) واقع در شمالی‌ترین نقطه استان اردبیل (بین ۳۴ درجه و ۹۲ دقیقه عرض شمالی و ۹۴ درجه و ۳۲ دقیقه طول شرقی و ارتفاع ۹۹ تا ۹۲ متر از سطح دریای آزاد) با بافت خاکی لومی رسی انجام گرفت. مواد گیاهی مورد ارزیابی شامل والد مادری (MS02)، والد پدری (TS01) و نتاج SC01 ذرت از شرکت زیست فناوران بذر سهند تهیه شد. آزمایش در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با چهار تکرار انجام گرفت. هر کرت آزمایشی شامل چهار خط به فاصله ۷۵ سانتی‌متر و به طول ۵/۶ متر و فاصله بین بوته ۱۸ سانتی‌متر با تراکم حدود ۷۴۰۰۰ بوته در هکتار بود. برای اطمینان از سبز شدن بذور در هر کپه به صورت دستی سه بذر کاشته شد و پس از تنک کردن در مرحله سه تا چهار برگی فقط تک بوته مناسب در هر کپه نگهداری شد.

اندازه‌گیری صفات آگروفیزیولوژیکی

برای اندازه‌گیری ارتفاع بوته‌ها، در زمان رسیدگی فیزیولوژیکی، بوته‌ها به‌طور تصادفی انتخاب و بر حسب سانتی‌متر اندازه‌گیری شدند. عملکرد دانه از دو خط وسطی بعد از حذف دو بوته ابتدا و انتها به‌عنوان میانگین کرت‌ها اندازه‌گیری و با ترازوی دقیق وزن‌گیری شد. اندازه‌گیری کلروفیل a، کلروفیل b و کاروتنوئید با استفاده از روش پیشنهادی هاربون انجام شد (Harborn,1984). رنگدانه‌ها از ۱ گرم بافت برگ با استفاده از استون ۸۰ درصد استخراج شدند و میزان جذب در طول موج‌های ۶۶۳، ۶۴۶ و ۴۷۰ نانومتر قرائت گردید. برای اندازه‌گیری هدایت روزنه‌ای از روش پیشنهادی توسط رامیرز-واله خو و کلی استفاده شد (Ramirez-Vallejo & Kelly, 1998). از جوان‌ترین برگ‌های کاملاً توسعه یافته در هر کرت سه برگ انتخاب و هدایت روزنه در دو طرف برگ‌ها با پرومتر اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری کلروفیل فلورسانس، برگ‌های کاملاً توسعه یافته از ۴ برگ انتهایی گیاه ذرت در سال زراعی ۱۴۰۲ جمع‌آوری و با فلورومتر قابل حمل اندازه‌گیری شدند. قبل از اندازه‌گیری، گیاهان به مدت ۳۰ دقیقه در شرایط تاریک سازگار شدند. اندازه‌گیری‌ها در ناحیه میانی سطح بالایی برگ‌های کاملاً توسعه یافته انجام شد و برای هر نمونه، سه اندازه‌گیری از سه لاین مختلف گیاه ثبت شد تا شاخص Fv/Fm از دستگاه قرائت شود (Foley *et al.*, 2011).

اندازه‌گیری صفات سیستم دفاع آنتی اکسیدان

برای اندازه‌گیری صفات مورد مطالعه، از برگ‌های دوم و سوم (از بالا) استخراج به‌صورت دسته جمعی به‌عمل آمد و موارد زیر به‌عنوان ترکیبات اسمولیتی و بیوشیمیایی مورد اندازه‌گیری قرار گرفتند. اندازه‌گیری صفات فیزیولوژیکی در مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اردبیل انجام شد.

برای تعیین میزان پلی‌فنول کل نمونه‌های تازه برگ هیبریدهای ذرت از روش پیشنهادی محرم نژاد و همکاران (۲۰۱۵) با طول موج ۷۵۰ نانومتر توسط دستگاه اسپکتروفتومتر استفاده شد. میزان مالون دی‌آلدئید برگهای هیبرید ذرت بر اساس روش پیشنهادی محرم نژاد و همکاران (۲۰۱۹) با طول موجهای ۵۳۲ و ۶۰۰ نانومتر توسط دستگاه اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری شد. به منظور تخمین میزان هیدروژن پراکسید نمونه‌های تازه برگی هضم شده به همراه تری‌کلرواستیک اسید در دور ۱۲۰۰۰ به مدت ۱۵ دقیقه سانتریفوژ گردید. سپس کمپلکس واکنش حاوی محلولرو شناور، بافر فسفات و یدید پتاسیم تهیه شده و میزان جذب نمونه‌های هیبریدهای ذرت در هر دو شرایط عادی و تنش کم آبی در طول موج ۳۹۰ نانومتر با استفاده از اسپکتروفتومتر قرائت شد (Moharramnejad *et al*., 2019). برای اندازه‌گیری میزان پرولین از با استفاده از روش پیشنهادی محرم نژاد و همکاران (۲۰۱۹) استفاده شد. میزان جذب نمونه‌های استخراج شده (فاز رنگی) در طول موج ۵۲۰ نانومتر توسط دستگاه اسپکتروفتومتر ثبت گردید. با استفاده از محلول‌های استاندارد و رابطه رگرسیونی بین غلظت و مقدار جذب در ۵۲۰ نانومتر، غلظت پرولین محلول مربوط به هر نمونه بر حسب میکرومولار در لیتر در ۰/۲ گرم وزن تر برگ برآورد شد. میزان پروتئین در نمونه‌ها با استفاده از روش پیشنهادی محرم نژاد و همکاران (۲۰۱۹) تعیین شد. برای این منظور یک میلی لیتر از محلول برادفورد به همراه ۱۰۰ میکرولیتر عصاره آنزیمی پس از مخلوط شدن کامل، در دستگاه اسپکتروفتومتر قرار داده شد و جذب در طول‌موج ۵۹۰ نانومتر ثبت گردید. غلظت پروتئین بر حسب میلی گرم بر گرم بافت تازه با کمک منحنی استاندارد محاسبه شد (Moharramnejad *et al*., 2019).

استخراج و رنگ‌آمیزی آنزیم پراکسیداز (POX) و کاتالاز (CAT) و سوپراکسید دیسموتاز(SOD)

نمونه‌های برگی تازه در بافر استخراج (تریس ۵۰ میلی‌مولار، پنج درصد ساکاروز، ۵۰ میلی‌مولار اسکوربیک اسید، ۲۰ میلی‌مولار سدیم متابی‌سولفیت و دو درصد پلی‌اتیلن‌گلیکول) با اسیدیته برابر ۷/۵ حاوی ۰/۱ درصد ۲- مرکاپتو اتانول با نسبت وزنی یک از برگ و یک از بافر استخراج، به‌خوبی هموژنیزه و سپس محلول حاصل به‌مدت ۱۰ دقیقه در ۱۰۰۰۰ دور و دمای چهار درجه سانتی‌گراد سانتریفوژ شد. عصاره آنزیمی با قطعات بریده شده کاغذ واتمن شماره ۴۲ و مناسب با ابعاد چاهک، جذب و در ژل پلی‌آکریلامید هشت درصد با ابعاد ۱۵×۱۲×۰/۶ سانتی‌متر بارگذاری شد. برای رنگ آمیزی آنزیم پراکسیداز و کاتالاز و سوپراکسید دیسموتاز از روش پیشنهادی محرم نژاد و همکاران (۲۰۱۹) استفاده شد (Moharramnejad *et al*., 2019).

اندازه‌گیری هتروزیس:

برآورد هتروزیس در هیبریدهای مورد مطالعه از طریق هتروزیس براساس میانگین والدین (MPH) و هتروزیس براساس والد برتر (BPH) مطابق رابطه‌های زیر محاسبه شد (Malik *et al*., 1981).

رابطه ۱) $$BPH = \frac{F_1 - HP}{HP} \times 100$$

رابطه ۲) $$MPH = \frac{F_1 - MP}{MP} \times 100$$

والد برتر در هر تلاقی، والدی در نظر گرفتـه شـد که بیش‌ترین میانگین صـفت را نشـان داد و در مـورد صفاتی که کاهش آن‌ها هدف اصلاح‌گـران مـی‌باشـد، والدی که میانگین کـم‌تـری از صـفت را دارا بـود بـه عنوان والد برتر در نظر گرفتـه شد. پس از انجام تجزیه واریانس برآورد ضریب تغییـرات فنوتیپی، ضریب تغییـرات ژنتیکـی و وراثـت پـذیری عمومی با استفاده از رابطه‌های زیر برآورد شد (Farshadfar, 2010).

رابطه ۳) $$\sigma_g^2 = \frac{MS_g - MS_\varepsilon}{r}$$

رابطه ۴) $$\sigma_\varepsilon^2 = MS_\varepsilon$$

رابطه ۵) $$\sigma_p^2 = \sigma_g^2 + \frac{\sigma_\varepsilon^2}{r}$$

رابطه ۶) $$h^2 = \frac{\sigma_g^2}{\sigma_p^2} \times 100$$

رابطه ۷) $$PVC = \frac{\sqrt{\sigma_p^2}}{\bar{X}} \times 100$$

رابطه ۸) $$GCV = \frac{\sqrt{\sigma_g^2}}{\bar{X}} \times 100$$

در روابط بالا σ_ε^2 واریاس اشـتباه آزمایشـی، σ_g^2 واریـــانس ژنـــوتیپی، σ_p^2 واریـــانس فنـــوتیپی، h^2 وراثت‌پذیری عمومی، MS_ε مجموع مربعـات اشـتباه آزمایشی، MS_g مجموع مربعات ژنوتیـپ‌هـا ،r تعـداد تکرار در آزمایش،GCV ضـریب تغییـرات ژنتیکـی و PCV ضریب تغییرات فنوتیپی می‌باشد که بر اسـاس امید ریاضی منـابع تغییـرات محاسـبه شـد.

تجزیه‌های آماری و نرم‌افزارها

برای کمی سازی داده‌های آنزیم‌های آنتی اکسیدان روی ژل پلی آکریلامید هشت درصد از نرم افزار MCDI استفاده شد. فرض‌های نرمال بودن داده‌ها با روش کولموگروف-اسمیرنوف، یکنواختی واریانس‌ها با آزمون لون برای کلیه داده‌ها بررسی شدند. داده‌های حاصل توسط نرم افزار Excel ثبت و سپس تمام تجزیه‌های ژنتیکی و آماری توسط نرم‌افزارهای آماری SPSS و SAS انجام شد.

نتایج و بحث

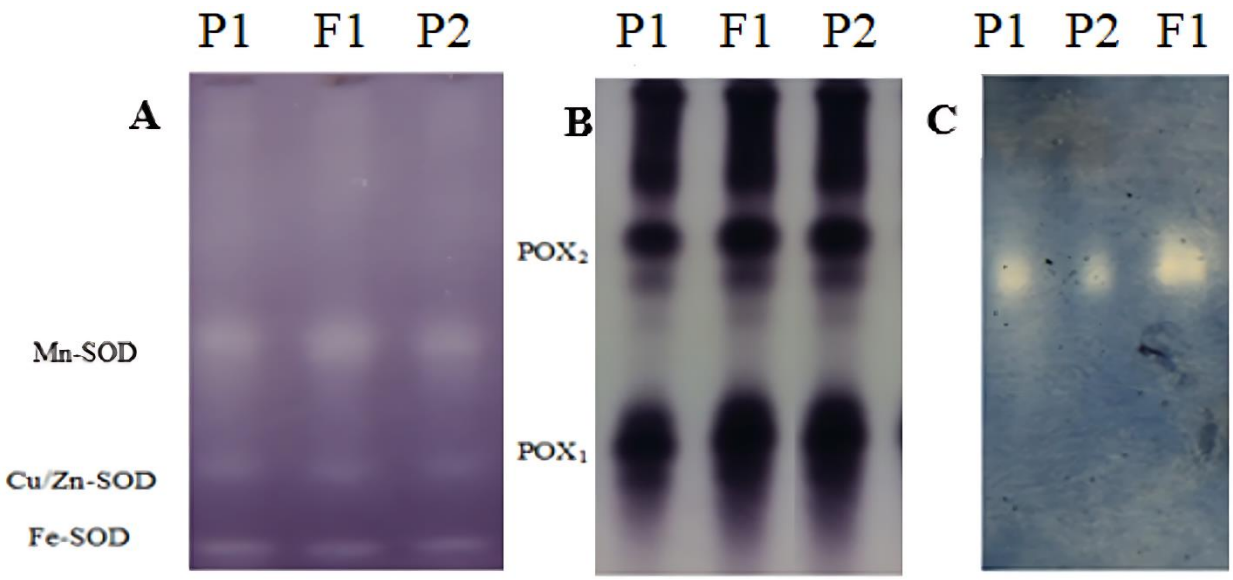
نتایج تجزیه واریانس (جدول ۱) صفات ارتفاع بوته و عملکرد دانه نشان داد که اثر ژنوتیپ، در سطح یک درصد معنی‌دار بود. از طرفی معنی دار شدن اثر ژنوتیپ نشان از وجود تنوع ژنتیکی در صفات مورفوروژیکی دارد به نحوی که انتخاب ژنوتیپ مناسب می‌تواند بر صفات مورفولوژی ذرت و در نهایت عملکرد آن موثر باشد. این تنوع می‌تواند برای اصلاح نباتات و به منظور بهبود صفات مورد نظر مانند عملکرد دانه مورد استفاده قرار گیرد.

نتایج تجزیه واریانس صفات فیزیولوژیک نشان داد که اثر ژنوتیپ بر روی تمام صفات فیزیولوژیک به جز کلروفیل a، F_m، F_v و F_v/F_m معنی‌دار بوده و تنوع ژنتیکی قابل توجهی برای صفات فیزیولوژیکی مورد مطالعه وجود دارد (جدول ۱). این تنوع ژنتیکی می‌تواند برای بهبود صفات

فیزیولوژی ذرت هیبرید از طریق اصلاح نباتات مورد استفاده قرار گیرد.

طبق الگوی باندی آنزیم‌های آنتی اکسیدان روی ژل پلی آکریلامید هشت درصد به‌ترتیب سه، دو و یک ایزوفروم برای SOD، POX و CAT مشاهده گردید (شکل ۱). نتایج تجزیه واریانس صفات آنتی‌اکسیدانی مورد مطالعه در ذرت هیبرید نشان داد که اثر ژنوتیپ بر تمام صفات آنتی اکسیدان در سطح یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۱). این نشان می‌دهد که تنوع ژنتیکی بین ژنوتیپ‌های مختلف ذرت هیبرید در سطح فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی وجود دارد. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که ژنوتیپ نقش مهمی در تعیین سطح فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در ذرت هیبرید دارد. شناسایی ژنوتیپ‌های با سطح فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی بالا می‌تواند به اصلاح نژاد ذرت با ظرفیت آنتی‌اکسیدانی بالاتر منجر شود (Mafakheri *et al*., 2022; García *et al*., 2023; Patel *et al*., 2022; Wang *et al*., 2021). آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی نقش مهمی در دفاع گیاهان در برابر تنش‌های محیطی مانند خشکی، گرما، شوری و آفات دارند. بنابراین، انتخاب ژنوتیپ‌های ذرت هیبرید با سطوح بالاتر آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی می‌تواند به افزایش مقاومت این گیاهان در برابر تنش‌های محیطی و در نهایت افزایش عملکرد و کیفیت محصول کمک کند.

جدول ۲ نشان می‌دهد که از بین صفات مورد مطالعه صفت فلورسانس کلروفیل F_m، با مقادیر ۱۳۲۶/۶۶۷، ۲۶۵/۳۶۰، ۱۲۶۲۲/۲۲، ۶۳۸۶۵/۸۹ به ترتیب دارای بیشترین مقادیر میانگین، واریانس خطا، واریانس ژنتیکی و واریانس فنوتیپی در مقایسه با سایر صفات مورد مطالعه بودند. با توجه به اینکه واریانس فنوتیپی نشان‌دهنده تنوع کل صفات در جمعیت می‌باشد، مقادیر بالای واریانس ژنتیکی نشان از این واقعیت دارد که سهم زیادی از تنوع فنوتیپی مربوط به تنوع ژنتیکی می‌باشد و در مقابل مقادیر پایین واریانس خطا نشان می‌دهد که عوامل محیطی اثر کمی بر صفات دارند. در این پژوهش، صفات کلروفیل a، کلروفیل b، کاروتنوئید، هدایت روزنه‌ای و F_v/F_m دارای واریانس خطای پایینی هستند. از بین صفات مورد مطالعه صفت هدایت روزنه‌ای با مقدار ۲۴/۰۰۰۷ و ۲۵۷/۹۶۸ به ترتیب دارای بیشترین مقادیر ضریب تنوع ژنتیکی و فنوتیپی در مقایسه با سایر صفات مورد مطالعه بودند.



شکل ۱- الگوی باندی آنزیم سوپراکسید دیسموتاز (A)، پراکسیداز (B) و کاتالاز (CAT) در والدین و نتایج آنها در ذرت

Figure 1- Band pattern of superoxide dismutase (A), peroxidase (B) and catalase (CAT) enzymes in parents and their results in maize

طبق جدول ۲ از بین صفات مورد مطالعه صفت پراکسید هیدروژن، با مقادیر ۱۱۱/۱۰، ۳۴/۴۱۲، ۱۵۶۲/۶۱۳، ۱۵۷۲/۹۹۵ به ترتیب دارای بیشترین مقادیر میانگین، واریانس خطا، واریانس ژنتیکی و واریانس فنوتیپی در مقایسه با سایر صفات مورد مطالعه بودند. واریانس فنوتیپی بالا نشان می‌دهد که تنوع زیادی در بین ژنوتیپ‌های مختلف برای این صفت وجود دارد. واریانس ژنتیکی بالا نشان می‌دهد که بخش زیادی از این تنوع به دلیل تفاوت‌های ژنتیکی بین ژنوتیپ‌ها است. واریانس خطا نسبتاً کم است، که نشان می‌دهد دقت آزمایش بالا است. از بین صفات مورد مطالعه صفت پروتئین با مقادیر ۷۲۹/۳۲۹ و ۱۴۶۴/۴۲ به ترتیب دارای بیشترین مقادیر ضریب تنوع ژنتیکی و فنوتیپی در مقایسه با سایر صفات مورد مطالعه بودند. در تمام صفات مورد بررسی ضریب تغییرات فنوتیپی از ضریب تغییرات ژنتیکی بیشتر بود که نشان‌دهنده تاثیر عوامل محیطی بر بیان صفات است. وراثت‌پذیری عمومی برای صفات مالون دی آلدئید، پراکسید هیدروژن، پلی فنول، پروتئین و پرولین به ترتیب ۹۹/۷۵۳، ۹۹/۳۴، ۹۹/۳۱۵، ۴۹/۲۷۵-، ۹۵/۹۹۴ درصد مشاهده شد (جدول ۲). وراثت‌پذیری عمومی بالا نشان می‌دهد که اثر ژنتیکی قوی بر صفت مالون دی آلدئید[10] وجود دارد. دار و همکاران (۲۰۱۸) به بررسی وراثت‌پذیری صفات مختلف مرتبط با تنش خشکی در ذرت، از جمله مالون دی آلدئید، پرداخته است. این مطالعه نشان داد که صفت مالون دی آلدئید وراثت‌پذیری بالایی دارد و می‌تواند به عنوان یک معیار برای انتخاب ارقام ذرت مقاوم به خشکی استفاده شود. نتایج این مطالعه با نتایج سایر

[10] Malondialdehyde (MDA)

مطالعاتی که بر روی وراثت‌پذیری صفت مالون دی آلدئید در ذرت انجام شده است، همخوانی دارد (Dar *et al.*, 2018). به طور کلی، مطالعات نشان می‌دهند که وراثت‌پذیری صفت مالون دی آلدئید در ذرت بالا است، اما این وراثت‌پذیری تحت تأثیر اثرات محیطی نیز قرار می‌گیرد. وراثت‌پذیری عمومی منفی نشان می‌دهد که همبستگی منفی بین ژن‌های مختلف برای صفت پروتئین وجود دارد (Smith & Jones, 2018). همچنین وراثت‌پذیری عمومی پایین این صفت به این معنی می‌باشد که تنوع این صفت بیشتر تحت تأثیر عوامل محیطی است. به طور کلی، صفات فیزیولوژیکی در ذرت هیبرید دارای وراثت‌پذیری بالایی هستند، به این معنی که تنوع صفات در درجه اول توسط ژنتیک تعیین می‌شود. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که صفات فیزیولوژیکی مورد مطالعه به طور قابل توجهی تحت تأثیر ژنتیک هستند. این یافته‌ها برای برنامه‌های اصلاح نژاد ذرت هیبرید مفید هستند، زیرا نشان می‌دهند که می‌توان از طریق انتخاب ژنتیکی برای بهبود این صفات استفاده کرد. طبق جدول ۲ از بین صفات مورد مطالعه صفت Mn-SOD، با مقدار ۱۰۸۴/۴۷ دارای بیشترین مقدار میانگین در مقایسه با سایر صفات مورد مطالعه بود. از بین صفات مورد مطالعه صفت کاتالاز با مقدار ۱۵۹/۴۷۳، ۳۳۴۹۸/۷۱، ۳۳۸۱۲/۹۲، ۴۷/۵۸۴، ۸۷۹۰/۹۴۸ به ترتیب دارای بیشترین مقادیر واریانس خطا، واریانس ژنتیکی، واریانس فنوتیپی، ضریب تنوع ژنتیکی و فنوتیپی در مقایسه با سایر صفات مورد مطالعه بودند. واریانس فنوتیپی بالا نشان می‌دهد که تنوع زیادی در سطوح فعالیت آنتی‌اکسیدانی بین ژنوتیپ‌های مختلف وجود دارد. همچنین واریانس ژنتیکی بالا برای صفت CAT نشان می‌دهد که سطوح فعالیت آنتی‌اکسیدانی توسط ژن‌ها به طور قابل توجهی کنترل می‌شود. در تمام صفات مورد بررسی ضریب تغییرات فنوتیپی از ضریب تغییرات ژنتیکی بیشتر بود که نشان‌دهنده تاثیر عوامل محیطی بر بیان صفات است. میانگین نشان دهنده سطح متوسط فعالیت آنتی‌اکسیدانی در بین ژنوتیپ‌های مختلف ذرت هیبرید است. میانگین بالا برای صفات Fe-SOD، Cu/Zn-SOD، Mn-SOD، POXI، POX2 و CAT نشان می‌دهد که ذرت هیبرید به طور کلی دارای فعالیت آنتی‌اکسیدانی بالایی است. وراثت‌پذیری بالا (بیشتر از ۹۰٪) برای صفات Fe-SOD، Cu/Zn-SOD، Mn-SOD، POX1، POX2 و CAT نشان می‌دهد که این صفات تحت کنترل ژنتیکی بالایی هستند و انتخاب ژنوتیپ‌های با سطوح بالای فعالیت آنتی‌اکسیدانی می‌تواند موثر باشد. وراثت‌پذیری عمومی نشان‌دهنده درصد واریانس فنوتیپی صفات است که به دلیل تفاوت‌های ژنتیکی بین ژنوتیپ‌های مختلف ذرت هیبرید است. نتایج این جدول نشان می‌دهد که صفات آنتی‌اکسیدانی در ذرت تحت کنترل ژنتیکی قوی هستند. تنوع زیادی در صفات آنتی‌اکسیدانی بین ژنوتیپ‌های ذرت وجود دارد. میانگین مقادیر صفات آنتی‌اکسیدانی در بین ژنوتیپ‌های ذرت متفاوت است. ضریب تنوع ژنتیکی نشان می‌دهد که

پتانسیل زیادی برای بهبود صفات آنتی‌اکسیدانی در ذرت از طریق اصلاح نژاد وجود دارد.

در بررسی میزان هتروزیس در هیبرید F1 ذرت برای صفات مورفولوژیکی در بیشتر صفات به ویژه در ارتفاع بوته و عملکرد دانه، هتروزیس مثبت و قابل توجهی نسبت به والد برتر مشاهده شد. هتروزیس بالا در صفت ارتفاع بوته نسبت به والد برتر (BPH) نسبت به میانگین والدین (MPH) نشان دهنده افزایش ارتفاع بوته در هیبرید F1 نسبت به والدین است. هتروزیس بالا در صفت عملکرد دانه نسبت به BPH و نسبت به MPH نشان دهنده افزایش قابل توجه عملکرد دانه در هیبرید F_1 است (جدول ۲). نتایج این تحقیق با یافته‌های سایر محققین در مورد هتروزیس در ذرت همخوانی دارد Munaro *et al*., 2011; Raj & Singh, 2019; Kumar & Kumar, 2020). به طور کلی، هتروزیس در صفات مورفولوژی ذرت، به ویژه در صفات مرتبط با عملکرد، به طور گسترده گزارش شده است (Zhang *et al*., 2023; Yang *et al*., 2022; Liu *et al*., 2021). هتروزیس یک پدیده ژنتیکی است که در آن، عملکرد هیبرید F_1 از میانگین عملکرد والدین بیشتر است. این پدیده می‌تواند به دلیل اثرات غالبیت، اثرات افزایشی و یا ترکیبی از هر دو باشد (Zhang *et al*., 2023). نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که هتروزیس می‌تواند به طور قابل توجهی صفات مورفولوژی مختلف را در ذرت هیبرید F_1 بهبود بخشد. این امر می‌تواند به افزایش عملکرد دانه و بهبود کارایی فتوسنتز در این گیاهان منجر شود. انتخاب والدین مناسب با تنوع ژنتیکی بالا، نقشی کلیدی در دستیابی به هتروزیس مطلوب در هیبریدهای ذرت ایفا می‌کند.

جدول ۱- تجزیه واریانس صفات آگروفیزیولوژیکی و آنتی اکسیدانی والد و هیبرید ذرت

Table 1- Variance analysis of agrophysiological and antioxidant traits of parent and hybrid maize

		میانگین مربعات Mean Squares												فلورسانس کلروفیل Chlorophyll fluorescence	
منابع تغییر S.O.V	درجات آزادی df	مالون دی آلدئید MDA	پراکسید هیدروژن H_2O_2	پلی فنول Polyphenol	پروتئین Protein	پرولین Proline	کلروفیل *a* Chlorophyll a	کلروفیل *b* Chlorophyll b	کاروتنوئید Carotenoids	هدایت روزنه‌ای Stomatal conduction	حداقل فلورسانس F_o	حداکثر فلورسانس تاریکی F_m	فلورسانس متغیر F_v	ظرفیت فتوشیمیایی فتوسیستم II F_v/F_m
بلوک Block	3	0.021 ns	17.973 ns	0.004 ns	4.444ns	3.134 ns	0.0005ns	0.001ns	0.0003 ns	4.300ns	28.000ns	90066.3ns	87250.11ns	0.003ns
ژنوتیپ Genotype	2	1455.74**	4698.23**	0.089**	0.002**	77.334**	0.0001 ns	0.033**	0.029**	0.006**	4020.3**	89110.3 ns	55297.44 ns	0.000 ns
خطا Error	6	1.198	10.382	0.002	4.444	1.061	0.0007	0.001	0.0001	0.0002	57.333	51243.667	49145.278	0.002
ضریب تغییرات (درصد) CV (%)		3.24	2.90	10.68	4.89	1.48	5.33	6.47	3.50	8.15	2.52	17.06	21.57	5.49
میانگین Mean		33.68	111.10	0.38	0.14	69.66	0.514	0.534	0.341	0.186	299.33	1326.66	1027.44	0.768

ns، * و **: به ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد

ns, * and **: non-significant and significant at the five and one percent probability levels, respectively

ادامه جدول ۱- تجزیه واریانس صفات آگروفیزیولوژیکی و آنتی اکسیدانی والد و هیبرید ذرت

Continuation of Table 1- Variance analysis of agrophysiological and antioxidant traits of parent and hybrid maize

منابع تغییر S.O.V	درجات آزادی df	میانگین مربعات Mean Squares							
		ارتفاع بوته Plant height	عملکرد دانه Grain yield	Fe-SOD	Cu/Zn-SOD	Mn-SOD	POX1	POX2	CAT
بلوک Block	3	19.363^{ns}	0.128^{ns}	1546.831^{ns}	1934.821^{ns}	449.262^{ns}	7.481^{ns}	354.631^{ns}	288.323^{ns}
ژنوتیپ Genotype	2	5405.003**	35.678**	65796.82**	43435.951**	54193.37**	8227.714**	14867.36**	100810.333**
خطا Error	6	30.567	0.129	983.664	872.523	66.439	11.788	99.214	314.207
ضریب تغییرات (درصد) CV (%)		2.70	5.02	3.67	3.22	0.75	1.67	4.07	4.61
میانگین Mean		204.33	7.15	855.64	917.62	1084.47	205.24	244.46	384.63

ns، * و **: به ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد

ns, * and **: non-significant and significant at the five and one percent probability levels, respectively

در بررسی میزان هتروزیس (درصد) در هیبرید F1 ذرت برای صفات فیزیولوژیکی مختلف، نسبت به BPH و MPH، در بیشتر صفات، هتروزیس مثبت و قابل توجهی نسبت به BPH مشاهده شد. میزان هتروزیس نسبت به BPH مثبت و قابل توجهی در صفات مختلف، به ویژه در کلروفیل b و هدایت روزنه‌ای مشاهده شد. در صفت هدایت روزنه‌ای هتروزیس نسبت به BPH بالا و نسبت به MPH نشان دهنده افزایش تبادل گاز دی اکسید کربن و بخار آب در هیبرید F_1 بود که می‌تواند به افزایش فتوسنتز و عملکرد دانه کمک کند (Zhang *et al.*, 2022). هتروزیس بالا در صفت کلروفیل b نسبت به BPH و نسبت به MPH نشان دهنده افزایش محتوای کلروفیل b در هیبرید F_1 است. هتروزیس پایین در صفت F_v/F_m نشان دهنده کارایی فتوشیمیایی مرکز واکنش فتوسنتزی نوع II است. هتروزیس متوسط صفت F_O نشان دهنده فلورسانس اولیه کلروفیل a است. هتروزیس متوسط در این صفت نسبت به BPH و نسبت به MPH نشان دهنده عدم تغییر قابل توجه در این صفت در هیبرید F_1 است. هتروزیس متوسط صفت F_m نشان دهنده حداکثر فلورسانس کلروفیل است. هتروزیس متوسط در این صفت نسبت به BPH و نسبت به MPH نشان دهنده افزایش جذب نور در هیبرید F_1 است. هتروزیس متوسط صفت F_v نشان دهنده حداکثر فلورسانس متغیر کلروفیل a است. هتروزیس متوسط در این صفت نسبت به BPH و نسبت به MPH نشان دهنده افزایش ظرفیت فتوسنتزی در هیبرید F_1 است. هتروزیس پایین در این صفت نسبت به BPH و نسبت به MPH نشان دهنده کاهش کارایی فتوسنتز در هیبرید F_1 است (جدول۲). نتایج این جدول با یافته‌های سایر محققین در مورد هتروزیس در ذرت همخوانی دارد. به طور کلی، هتروزیس در صفات فیزیولوژیکی ذرت، به ویژه در صفات مرتبط با عملکرد، به طور گسترده گزارش شده است (Zhang *et al.*, 2022).

در بررسی میزان هتروزیس (درصد) در هیبرید F_1 ذرت برای صفات فیزیولوژیک، نسبت به والد برتر (BPH) و میانگین والدین (MPH)، میزان هتروزیس بالا در صفت MDA در BPH (۱۵۲٪) و نسبت به MPH (۱۸۰٪) مشاهده گردید. میزان هتروزیس برای MDA مثبت بوده اما نسبت به میانگین والدین کاهش نشان می‌دهد. MDA شاخصی از آسیب غشای سلولی است. کاهش هتروزیس این صفت می‌تواند به پایداری بیشتر غشای سلولی در هیبرید F1 منجر شود. هتروزیس بالا در صفت H_2O_2 نسبت به BPH و نسبت به MPH نشان می‌دهد هتروزیس برای H_2O_2 مثبت است، اما نسبت به میانگین والدین کاهش نشان می‌دهد. H_2O_2 مولکولی است که در پاسخ به تنش‌های اکسیداتیو تولید می‌شود. افزایش هتروزیس این صفت می‌تواند به توانایی بیشتر هیبرید F1 در مقابله با تنش‌های اکسیداتیو منجر شود. هتروزیس بالا در صفت Phenol نسبت به BPH و نسبت به MPH نشان می‌دهد هتروزیس برای Phenol مثبت است و نسبت به هر دو والد افزایش نشان می‌دهد. این نشان می دهد که عملکرد این صفت در هیبرید F1 از هر دو والد

برتر بوده است. هتروزیس متوسط در صفت Protein نسبت به BPH و نسبت به MPH نشان می‌دهد هتروزیس برای Protein مثبت است و نسبت به هر دو والد کاهش نشان می‌دهد. کاهش هتروزیس این صفت می‌تواند به دلیل اثرات متقابل ژن‌ها باشد. هتروزیس پایین در صفت Proline نسبت به BPH و نسبت به MPH نشان می‌دهد هتروزیس برای Proline مثبت است و نسبت به میانگین والدین کاهش نشان می‌دهد (جدول۲). پرولین اسید آمینه‌ای است که در تنش‌های محیطی نقش محافظتی دارد. افزایش هتروزیس این صفت می‌تواند به مقاومت بیشتر هیبرید F1 در برابر تنش‌ها منجر شود. نتایج این مطالعه با یافته‌های مطالعه مشابه که هتروزیس مثبت را برای صفات فیزیولوژی مختلف در ذرت هیبرید گزارش کرده است، همسو است (Zhang *et al.*, 2022). با این حال، میزان هتروزیس در این مطالعه در برخی موارد با مطالعه مشابه متفاوت است. هتروزیس یک پدیده پیچیده است که تحت تأثیر عوامل مختلفی از جمله ژنتیک، محیط زیست و تعاملات ژنوتیپ-محیط قرار دارد. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که هتروزیس می‌تواند برای صفات فیزیولوژیکی مختلف در ذرت هیبرید مثبت باشد. میزان هتروزیس می‌تواند بسته به صفت مورد نظر و ترکیب ژنتیکی والدین متفاوت باشد. برای بهبود صفات فیزیولوژیکی در ذرت هیبرید، می‌توان از روش‌های به‌نژادی و انتخاب والدین مناسب استفاده کرد.

جدول ۲، میزان هتروزیس را در هیبرید F1 ذرت برای صفات آنتی‌اکسیدانی مختلف، نسبت به BPH و MPH نشان می‌دهد. هتروزیس متوسط در صفت Fe-SOD نسبت به BPH و نسبت به MPH نشان می‌دهد هتروزیس برای Fe-SOD در هر دو مقایسه BPH و MPH متوسط است. هتروزیس پایین در صفت Cu/Zn-SOD نسبت به BPH و نسبت به MPH نشان می‌دهد هتروزیس برای Cu/Zn-SOD در هر دو مقایسه BPH و MPH پایین است. هتروزیس پایین در صفت Mn-SOD نسبت به BPH و نسبت به MPH نشان می‌دهد هتروزیس برای Mn-SOD در هر دو مقایسه BPH و MPH پایین است. هتروزیس متوسط در صفت POX1 نسبت به BPH و نسبت به MPH نشان می‌دهد هتروزیس برای POX1 در مقایسه با BPH و MPH متوسط است. هتروزیس متوسط در صفت POX2 نسبت به BPH و نسبت به MPH نشان می‌دهد هتروزیس برای POX2 در مقایسه با BPH قابل توجه و در مقایسه با MPH متوسط است. POX1 و POX2 هتروزیس قابل توجهی را نشان می دهند، اما به اندازه CAT بالا نیست. هتروزیس بالا در صفت CAT نسبت به BPH و نسبت به MPH نشان می‌دهد هتروزیس بالا برای CAT در هر دو مقایسه BPH و MPH نشان می‌دهد که هیبرید F1 از نظر این آنزیم بسیار قوی‌تر از والدین خود است و بیشترین میزان هتروزیس را در بین صفات آنتی‌اکسیدانی نشان می دهد. هتروزیس مثبت در صفات CAT، POX2، POX1، وFe-SOD نشان می‌دهد که هیبرید F1 عملکرد بهتری نسبت به والد برتر و میانگین والدین در تولید آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی دارد. این امر می تواند

به افزایش مقاومت گیاه در برابر تنش‌های محیطی مانند خشکی، شوری و بیماری‌ها منجر شود. هتروزیس پایین در صفات Cu/Zn-SOD و Mn-SOD نشان می‌دهد که هیبرید F1 عملکرد ضعیف‌تری نسبت به والد برترو میانگین والدین در تولید آنزیم سوپراکسید دیسموتاز مس/روی و سوپراکسید دیسموتاز منگنز دارد. مطالعات مشابهی بر روی هتروزیس صفات آنتی‌اکسیدانی در گیاهان ذرت هیبرید انجام شده است (Zhang *et al.*, 2022). نتایج این مطالعات نشان می‌دهد که هتروزیس برای صفات آنتی‌اکسیدانی می‌تواند متفاوت باشد و به ژنوتیپ والدین، صفات مورد مطالعه و شرایط محیطی بستگی دارد. هتروزیس برای صفات آنتی‌اکسیدانی در ذرت هیبرید می‌تواند به دلیل مکمل بودن ژن‌های والدین باشد. هتروزیس می‌تواند به افزایش مقاومت گیاه در برابر تنش‌های محیطی مانند خشکی، شوری و بیماری‌ها منجر شود. استفاده از هیبریدهای F1 با هتروزیس بالا برای صفات آنتی‌اکسیدانی می‌تواند به افزایش کیفیت و ارزش غذایی ذرت اهمیت داشته باشد (Mafakheri *et al.*, 2022). نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که صفات با هتروزیس مثبت می‌تواند منبع مهمی برای افزایش ظرفیت آنتی‌اکسیدانی در گیاهان ذرت هیبرید باشد. مطالعات بیشتر برای بررسی علل صفات هتروزیس منفی در صفات آنتی‌اکسیدانی مانند Cu/Zn-SOD و Mn-SOD مورد نیاز است.

نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج این پژوهش، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که هتروزیس برای صفات آگروفیزیولوژیک و صفات مربوط به سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی ذرت هیبرید F_1 به‌طور قابل‌توجهی وجود دارد. این پدیده طبیعی می‌تواند بهبود عملکرد دانه و افزایش کارایی فتوسنتز در این گیاهان را به همراه داشته باشد. همچنین، نتایج نشان داد که تنوع ژنتیکی والدین نقش کلیدی در دستیابی به هتروزیس مطلوب ایفا می‌کند. با توجه به وراثت‌پذیری بالا در صفات ارتفاع بوته، عملکرد دانه، مالون دی آلدئید، پراکسید هیدروژن، پلی فنول، پرولین، کلروفیل b، کاروتنوئید، هدایت روزنه‌ای، Fe-SOD، Cu/Zn-SOD، Mn-SOD، POX1، POX2 و CAT می‌توان از روش‌های ایجاد هیبرید و یا انتخاب بر مبنای تنوع موجود، برای پیشرفت نسل‌های در حال تفکیک و ایجاد ارقام جدید بهره‌برداری کرد. این اقدامات می‌توانند به افزایش تولید و تأمین پایدار غذا کمک کنند، که در راستای نیاز روزافزون به مواد غذایی و محدودیت زمین‌های قابل کشت بسیار حائز اهمیت است.

جدول ۲- برآورد پارامترهای ژنتیکی برای صفات آگروفیزیولوژیکی و آنتی اکسیدانی

Table 2- Estimation of genetic parameters for agro-physiological and antioxidant traits

صفات Trait	میانگین Mean	واریانس خطا Error variance	واریانس ژنتیکی Genotype variance	واریانس فنوتیپی Phenotype variance	ضریب تغییرات ژنتیکی Genotypic coefficient of variation	ضریب تغییرات فنوتیپی Phenotypic coefficient of variation	وراثت‌پذیری عمومی Broad-sense heritability	هتروزیس Heterosis	
								والد برتر (BPH)	میانگین والدین (MPH)
مالون دی آلدئید MDA nmol/g FW	33.680	19.092	484.847	486.045	65.381	65.462	99.753	152.000	180.000
پراکسید هیدروژن H_2O_2 µmol/g FW	111.100	34.412	1562.613	1572.995	35.580	35.698	99.340	70.866	77.320
پلی فنول Polyphenol mg/FW	0.380	0.154	0.290	0.292	14.392	14.885	99.315	8.871	1.790
پروتئین Protein mg/FW	0.140	0.218	-0.986	2.001	29.329	14.620	-49.275	25.897	3.788
پرولین Proline µmol/g FW	69.660	4.543	25.424	26.485	7.234	7.388	95.994	9.733	1.434
کلروفیل a Chlorophyll a mg/g FW	0.514	0.104	0.007	0.013	24.290	33.101	53.846	16.363	40.659
کلروفیل b Chlorophyll b mg/g FW	0.534	0.095	0.010	0.011	18.711	19.624	90.909	31.543	37.543
کارتنوئید Carotenoids mg/g FW	0.341	0.086	0.009	0.009	18.806	18.806	100.000	24.489	35.055

هدایت روزنه‌ای Stomatal conduction mmol/m²/s	0.186	0.039	0.002	0.002	24.001	25.968	100.000	32.391	44.353
حداقل فلورسانس F_o	29.333	32.260	1.321	58.654	0.384	2.558	2.252	19.789	22.441
حداکثر فلورسانس تاریکی F_m	132.667	265.360	12622.220	63865.890	8.468	19.049	19.763	22.463	24.192
فلورسانس متغیر F_v	10.444	245.367	2050.722	51196.000	4.407	22.022	4.005	23.213	24.684
ظرفیت فتوشیمیایی فتوسیستم II F_v/F_m	0.768	0.040	0.001	0.003	3.187	6.635	23.076	-0.043	0.696

ادامه جدول ۲- برآورد پارامترهای ژنتیکی برای صفات آگروفیزیولوژیکی و آنتی اکسیدانی

Continuation of Table 2- Estimation of genetic parameters for agrophysiological and antioxidant traits

صفات Trait	میانگین Mean	واریانس خطا Error variance	واریانس ژنتیکی Genotype variance	واریانس فتوتیپی Phenotype variance	ضریب تغییرات ژنتیکی Genotypic coefficient of variation	ضریب تغییرات فنوتیپی Phenotypic coefficient of variation	وراثت‌پذیری عمومی Broad-sense heritability	هتروزیس Heterosis	
								والد برتر (BPH)	میانگین والدین (MPH)
ارتفاع بوته Plant height cm	204.333	37.032	1791.478	1822.045	20.714	20.890	98.322	36.732	40.555
عملکرد دانه Grain yield t/ha	7.153	3.002	11.849	11.978	48.120	48.382	98.293	95.190	114.019
Fe-SOD Densitometric	855.640	131.609	21595.390	22579.050	17.174	17.561	95.643	30.337	33.077
Cu/Zn-SOD Densitometric	917.620	108.530	14187.811	15060.330	12.980	13.373	94.206	14.084	21.546
Mn-SOD Densitometric	1084.470	117.020	18042.310	18108.850	12.385	12.408	99.633	20.271	22.708
POX1 Densitometric	205.240	45.438	2738.624	2750.430	25.497	25.552	99.571	35.070	48.396
POX2 Densitometric	244.460	62.089	4922.715	5021.929	28.701	20.332	98.204	44.827	57.483
CAT Densitometric	384.630	159.473	33498.710	33812.920	47.584	40.948	99.070	94.871	112.401

References

Adhikari, A., Ibrahim, A. M., Rudd, J. C., Baenziger, P. S., & Sarazin, J. B. 2020. Estimation of heterosis and combining abilities of US winter wheat germplasm for hybrid development in Texas. Crop science, 60 (2),.788-803. http://dx.doi.org/10.1002/csc2.20020

Ahmadi, A., Ehsanzadeh, P., & Jabbari, F. 2009. Introduction to plant physiology. Tehran University Press *(translated).* 651,.300-302. (In Persian)

Akel, W., Rapp, M., Thorwarth, P., Würschum, T., & Longin, C.F.H. 2019. Hybrid durum wheat: heterosis of grain yield and quality traits and genetic architecture of anther extrusion. Theoretical and Applied Genetics, 132,.921-932. http://dx.doi.org/10.1007/s00122-018-3248-6

Anonymous. 2023. https://amar.maj.ir/page-amar/FA/65/form/pId3352. (In Persian).

Berlan, J.P. 2021. Hybrid maize beyond heterosis: reading George Shull's hybrid Maize articles (1908–1909). Journal of Genetics, 100 (2), 72. http://dx.doi.org/10.1007/BF00018060

Birchler, J.A., Auger, D.L., & Riddle, N.C. 2003. In search of the molecular basis of heterosis. The Plant Cell, 15 (10), 2236-2239. http://dx.doi.org/10.1105/tpc.151030

Boeven, P.H., Longin, C.F.H., Leiser, W.L., Kollers, S., Ebmeyer, E., & Würschum, T. 2016. Genetic architecture of male floral traits required for hybrid wheat breeding. Theoretical and Applied Genetics, 129,. 2343-2357. http://dx.doi.org/10.1007/s00122-016-2771-6. Epub 2016 Aug 23.

Brandenburg, J.-T., Mary-Huard, T., Rigaill, G., Hearne, S.J., Corti, H., Joets, J., Vitte, C., Charcosset, A., Nicolas, S., & Tenaillon, M. 2017. Independent introductions and admixtures have contributed to adaptation of European maize and its American counterparts. PLoS Genetics, 13(3), e1006666. http://dx.doi.org/10.1371/journal.pgen.1006666

Briggle, L.W. 1963. Heterosis in wheat-a review. http://dx.doi.org/ 10.2135/cropsci1963.0011183X000300050011x

Conti, L. 1985. Conclusive results of a selection programme for obtaining a dwarf bean (*Ph. vulgaris*) resistant to some viruses and characterized by agronomical qualities.

Dar, I.A., Dar, Z.A., Lone, A.A., Kamaluddin, S.P., Sofi, P.A., Hussan, S., Dar, M.S., **&** Alie, W. 2018. Genetic variability studies involving drought tolerance related traits in maize genotypes. Journal of Agriculture and Ecology Research International, 14(2), 1-13. http://dx.doi.org/ 10.9734/JAERI/2018/40241

Farshadfar, E. 2010. New discussions in biometrical genetics, vol 1. Islamic Azad University of Kermanshah Press. (In Persian)

Foley, J.A., Ramankutty, N., Brauman, K.A., Cassidy, E.S., Gerber, J.S., Johnston, M., Mueller, N.D., O'Connell, C., Ray, D.K., West, P.C., & Balzer, C. 2011. Solutions for a cultivated planet. Nature, 478(7369), 337-342. http://dx.doi.org/10.1038/nature10452

García, M., Rodríguez, A., & López, M. 2023. Evaluation of antioxidant enzyme activity and genetic diversity in maize. Journal of Plant Physiology. https://doi.org/10.1016/j.jplph.2023.153022

Harborne, J.B. 1984. Methods of Plant Analysis. In Phytochemical methods: a guide to modern techniques of plant analysis (1-36). Dordrecht: Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-009-5570-7

Jones, D. F. 1922. Further studies on the breeding of corn. Genetics, 7(5), 482-501. https://doi.org/ 10.1093/genetics/7.5.482

Kumar, S., & Kumar, P. 2020. Genetic variability, heritability and genetic advance in maize (*Zea mays L.*). Plant Breeding and Biotechnology. https://doi.org/10.9787/PBB.2020.8.1.33

Liu, S., Chen, J., & Zhang, C. 2021. The role of dominance and additive effects in maize heterosis. Journal of Experimental Botany. https://doi.org/10.1093/jxb/eraa521

Longin, C.F.H., Mühleisen, J., Maurer, H.P., Zhang, H., Gowda, M., & Reif, J.C. 2012. Hybrid breeding in autogamous cereals. Theoretical and applied genetics, 125.,1087-1096. https://doi.org/10.1007/s00122-012-1967-7

Mafakheri, K., Valizadeh, M., & Mohammadi, S. A. 2022. Banding patterns activity of antioxidant enzymes and physiological indices in the maize (*Zea mays L.*) Genotypes

under Water Deficit Stress. J Crop Breed. 14(43), 64-75. http://dx.doi.org/10.52547/jcb.14.43.64

Malik, A.J., Sheedi, S.M., & Rajpur, M.M. 1981. Heterosis in wheat (*Triticum aestivum L.*). Wheat Inf. Ser. 53: 25-29.

Marlee, R., Labroo, Anthony, J. Studer., & Jessica, E. Rutkoski. 2021. Heterosis and hybrid crop breeding: a multidisciplinary review. front. genet., 24 february. sec. Statistical Genetics and Methodology. Volume 12 – 221. https://doi.org/10.3389/fgene.2021.643761

Miller, R. L., Johnson, P., & Thompson, S. 2021. Genetic diversity and its effects on heterosis in crops. Frontiers in Plant Science, 12, 567890. https://doi.org/10.3389/fpls.2021.567890

Moharramnejad, S., & Valizadeh, M. 2019. A key response of grain yield and superoxide dismutase in maize (*Zea mays L.*) to water deficit stress. Journal of Plant Physiology and Breeding, 9(2), 77-84. http://dx.doi.org/10.22034/jppb.2019.10606

Mousavi, S.S., Ghanbari, F., Abdullahi, M.R., Kayani, A.R., & Mousavat, S.A. 2018. Evaluation of heritability and genetic parameters of seed yield and important agronomic traits in Maize lines (*Zea mays L.*) using the generation mean analysis method. Journal of Agricultural Sciences of Iran, 20(2), 93-107. https://dorl.net/dor/20.1001.1.15625540.1397.20.2.1.6 (In Persian)

Munaro, E.M., Eyhérabide, G.H., D'Andrea, K.E., Cirilo, A.G., **&** Otegui, M.E. 2011. Heterosis× environment interaction in maize: What drives heterosis for grain yield?. Field Crops Research, 124(3), 441-449. http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2011.08.001

Nizamani, M.M., Nizamani, F.G., Rind, R.A., Khokhar, A.A., Mehmood, A., & Nizamani, M. 2020. 36. Heritability and genetic variability estimates in F3 populations of bread wheat (*Triticum aestivum L.*). Pure and Applied Biology (PAB), *9*(1), 352-368. http://dx.doi.org/10.19045/bspab.2020.90040

Patel, R., Sharma, S., & Kumar, A. 2022. Genetic variation and antioxidant activity in maize Under Stress Conditions. Crop Science. https://doi.org/10.1002/csc2.20612

Prasad, G., Chand, M., Kumar, P., & Rinwa, R.S. 2017. Performance of maize (*Zea mays L.*) hybrids with respect to growth parameters and phenological stages under different sowing dates in kharif season. International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences, *6*(10), 5079-5087. https://doi.org/10.20546/ijcmas.2017.610.482

Raj, S., & Singh, V. 2019. Evaluation of genetic parameters and yield components in maize. Journal of Agriculture and Food Research. https://doi.org/10.1016/j.jafr.2019.100027

Ramirez-Vallejo, P., & Kelly, J.D. 1998. Traits related to drought resistance in common bean. Euphytica, 99, 127-136. https://doi.org/10.1023/A:1018353200015

Ray, D.K., Mueller, N.D., West, P.C., & Foley, J.A. 2013. Yield trends are insufficient to double global crop production by 2050. PloS one, 8(6), p.e66428. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0066428

Rostami,A., & Mohammadi, KH. 2020. The effect of nitrogen fertilizers and nitrogen bacteria on grain yield and nitrogen use efficiency in Moroccan single cross corn. Scientific-Research Journal of Plant Ecophysiology 12: 200-210. https://civilica.com/doc/1608432 (In Persian)

Smith, J., & Jones, M. 2018. Negative genetic correlations for protein content in maize indicate antagonistic relationships between alleles at different loci. Journal of Plant Genetics, 12(4), 455-462. https://doi.org/ 10.1007/s00122-018-3155-9

Schnable, P.S., & Springer, N.M. 2013. Progress toward understanding heterosis in crop plants. Annual review of plant biology, 64(1), pp.71-88. https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042110-103827

Shull, G. H. 1908. The composition of a field of maize. Journal of Heredity, 4(1), 296-301. https://doi.org/10.1093/jhered/os-4.1.296

Singh, N., Sharma, A., & Singh, R. 2021. Heritability and genetic advance for yield and its components in maize (*Zea mays L.*). Journal of Crop Improvement. https://doi.org/10.1080/15427528.2021.1877030

Wang, J., Zhang, Y., & Liu, H. 2021. Role of Genetic Variation in Antioxidant Enzyme Activity of Maize Hybrids. Plant Breeding. https://doi.org/10.1111/pbr.12927

Yang, Y., Zhao, Z., & Wang, L. 2022. Genetic Basis and Application of Heterosis in Maize Improvement. Plant Breeding Reviews. https://doi.org/10.1002/9781119682752.ch07

Zhang, X., Li, X., & Yu, X. 2023. Recent Advances in Understanding Heterosis in Maize. Field Crops Research. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2023.108920

Zhang, Y., & Li, X. 2019. Impact of parental genetic variation on heterosis. Theoretical and Applied Genetics, 132(4), 1001-1010. https://doi.org/10.1007/s00122-018-3273-2

Zhang, Y., Liu, H., & Wu, Y. 2022. Heterosis and Its Impact on Photosynthesis and Water Use Efficiency in Maize. Plant Science. https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2022.110211