



University of Guilan
Faculty of Agricultural Sciences

Cereal Research

Vol. 15, No. 4, Winter 2026 (389-402)

doi: 10.22124/CR.2025.30599.1865

pISSN: 2252-0163 eISSN: 2538-6115



RESEARCH PAPER

OPEN ACCESS

Response of grain millet hybrids to environmental diversity and identification of high-yielding stable hybrids

Reza Ataei^{1*}, Ahmad Ghasemi², Ali Azari-Nasrabad³, Masoud Torabi⁴ and Mohammad Reza Shiri⁵

1. Research Assistant Professor, Seed and Plant Improvement Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran (* Corresponding author: reza_ataei@ut.ac.ir)
2. Research Assistant Professor, Sistan Agriculture and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Zabol, Iran
3. Research Assistant Professor, South Khorasan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Birjand, Iran
4. Research Associate Professor, Isfahan Agriculture and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Isfahan, Iran
5. Research Associate Professor, Seed and Plant Improvement Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran

Comprehensive abstract

Introduction

Pearl millet (*Pennisetum glaucum* L.) is one of the most important crops in warm and arid regions, playing a key role in food security across arid and semi-arid areas of the world. Due to climate change and increasing environmental fluctuations, the need to develop high-yielding and stable hybrids has become more crucial than ever. Given the nature of cross-pollination and high heterosis potential, the development of hybrid cultivars is the main breeding strategy in pearl millet. Hybrid varieties of pearl millet can significantly enhance both yield and stability under diverse agro-climatic conditions. However, environmental variability causes differential genotypic responses, making it essential to assess genotype–environment ($G \times E$) interactions for selecting superior hybrids in different climate regions. The objective of this study was to evaluate the stability of promising pearl millet hybrids and to identify stable, high-yielding, and well-adapted hybrids for the target regions.

Materials and methods

The plant materials consisted of eleven promising pearl millet hybrids along with the check cultivar ‘Mehran’. The experiment was conducted in a randomized complete block design (RCBD) with three replications across eight environments (four locations, Karaj, Birjand, Isfahan and Zabol, during two cropping seasons, 2022 and 2023). The traits evaluated included days to 50% flowering, plant height, panicle length, panicle diameter, number of tillers, 1000-grain weight, and grain yield. Statistical analyses were performed using SAS software, and mean comparisons were conducted using Duncan’s multiple range test at 0.05 probability level. For combined analysis of variance, genotype and location were considered as fixed factors, while year was treated as a random factor. Stability analyses were performed using the Lin and Binns method, rank-based stability parameters, and the GGE biplot model to identify stable and high-yielding hybrids.

Research findings

Combined analysis of variance and comparison of means revealed significant genetic variability among the pearl millet hybrids for all studied traits. Moreover, the effects of environment and genotype \times environment interaction were significant ($P < 0.01$) on all measured traits including grain



yield. The results indicated that the studied genotypes exhibited both crossover and non-crossover types of interactions. Comparison of grain yield of the studied hybrids showed that hybrids H794 and H824 with 8.41 and 7.81 t.ha⁻¹, respectively, produced the highest grain yield. The results of the stability analysis across eight environments based on the three methods (rank-based, superiority index, and GGE-biplot) demonstrated that two promising hybrids H794 and H824 had the higher grain yield and stability across all studied environments.

Conclusion

This study clearly demonstrated the potential of exploiting heterosis in pearl millet to replace obsolete cultivars with modern high-yielding hybrids. All evaluated hybrids outperformed the check cultivar 'Mehran', indicating their superiority for yield improvement. Introducing these promising hybrids could significantly enhance the national average grain yield of pearl millet. Moreover, considering the ongoing water scarcity crisis in the country, the dissemination of high-yielding and drought-efficient hybrids could encourage farmers to cultivate this low-water-requirement crop.

Keywords: Genotype×environment interaction, Grain yield, Heterosis, Stability analysis

Received: May 6, 2025

Accepted: November 6, 2025

Cite this article:

Ataei, R., Ghasemi, A., Azari-Nasrabad, A., Torabi, M., & Shiri, M. R. (2026). Response of grain millet hybrids to environmental diversity and identification of high-yielding stable hybrids. *Cereal Research*, 15(4), 389-402. doi: [10.22124/CR.2025.30599.1865](https://doi.org/10.22124/CR.2025.30599.1865).



واکنش هیبریدهای ارزن دانه‌ای به تنوع محیطی و شناسایی هیبریدهای پرمحصول و پایدار

رضا عطائی^{۱*}، احمد قاسمی^۲، علی آذری نصرآباد^۳، مسعود ترابی^۴ و محمدرضا شیری^۵

۱- استادیار پژوهش، موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران (* نویسنده

مسئول: reza_ataei@ut.ac.ir)

۲- استادیار پژوهش، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی سیستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، زابل، ایران

۳- استادیار پژوهش، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان جنوبی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی،

بیرجند، ایران

۴- دانشیار پژوهش، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی اصفهان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اصفهان،

ایران

۵- دانشیار پژوهش، موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران

چکیده جامع

مقدمه: ارزن مرواریدی (*Pennisetum glaucum* L.) یکی از گیاهان مهم مناطق گرم و خشک است که نقش مهمی در امنیت غذایی مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان ایفا می‌کند. به دلیل تغییرات اقلیمی و افزایش نوسانات محیطی، لزوم دستیابی به رقم‌های هیبرید با عملکرد بالا و پایداری مناسب بیش از پیش احساس می‌شود. با توجه به دگرگونی و هتروزیس بالا، ایجاد رقم‌های هیبرید مهم‌ترین روش اصلاحی در ارزن مرواریدی است. رقم‌های هیبرید ارزن مرواریدی به‌طور معنی‌داری می‌توانند عملکرد و پایداری آن را در شرایط متنوع اقلیمی افزایش دهند. با این حال، از آنجایی که تنوع محیطی موجب بروز واکنش‌های متفاوت در ژنوتیپ‌ها می‌شود، از این‌رو بررسی دقیق برهمکنش ژنوتیپ × محیط برای انتخاب هیبریدهای برتر در مناطق اقلیمی متفاوت ضروری است. هدف از اجرای این مطالعه، ارزیابی پایداری هیبریدهای امیدبخش ارزن مرواریدی و شناسایی هیبریدهای پایدار، پرمحصول و سازگار برای مناطق مورد مطالعه بود.

مواد و روش‌ها: مواد گیاهی این مطالعه، ۱۱ هیبرید امیدبخش ارزن مرواریدی بود که به‌همراه رقم شاهد مهران در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در هشت محیط (چهار منطقه کرج، بیرجند، اصفهان و زابل طی دو سال زراعی ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲) مورد ارزیابی قرار گرفتند. صفات مورد مطالعه، شامل تعداد روز تا ۵۰ درصد گلدهی، ارتفاع بوته، طول خوشه، قطر خوشه، تعداد پنجه در بوته، وزن هزار دانه و عملکرد دانه بود. تجزیه آماری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS و مقایسه میانگین‌ها بر اساس آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد انجام شد. برای انجام تجزیه واریانس مرکب، ژنوتیپ و مکان به‌عنوان متغیرهای ثابت و سال به‌عنوان متغیر تصادفی در نظر گرفته شد. به‌منظور ارزیابی پایداری هیبریدهای مورد مطالعه و شناسایی هیبریدهای پایدار و پرمحصول نیز از روش‌های لین و بینز، رتبه‌بندی و GGE-Biplot استفاده شد.

یافته‌های تحقیق: نتایج تجزیه واریانس مرکب و مقایسه میانگین‌ها نشان داد که تنوع ژنتیکی معنی‌داری بین هیبریدهای ارزن مرواریدی برای تمامی صفات مورد مطالعه وجود داشت. علاوه بر این، اثر محیط و برهمکنش ژنوتیپ × محیط بر تمامی

صفات اندازه‌گیری شده از جمله عملکرد دانه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. بررسی نتایج نشان داد که ژنوتیپ‌های مورد بررسی تحت تأثیر هر دو نوع برهمکنش (مقاطع و غیرمقاطع) قرار گرفتند. مقایسه عملکرد دانه هیبریدهای مورد مطالعه نشان داد که دو هیبرید H794 و H824 به ترتیب با میانگین عملکرد ۸/۴۱ و ۷/۸۱ تن در هکتار، بیش‌ترین عملکرد دانه را تولید کردند. نتایج تجزیه پایداری ژنوتیپ‌ها در هشت محیط با استفاده از سه روش رتبه‌بندی، ضریب برتری و GGE بای‌پلات نیز نشان داد که دو هیبرید امیدبخش H794 و H824 دارای عملکرد و پایداری بالایی در تمامی محیط‌های مورد بررسی بودند.

نتیجه‌گیری: این مطالعه به‌وضوح نشان داد که امکان بهره‌گیری از هتروزیس موجود در ارزن مرواریدی با استفاده از فناوری جدید ایجاد رقم‌های هیبرید برای جایگزینی رقم‌های قدیمی وجود دارد. نتایج نشان داد که تمامی هیبریدهای امیدبخش مورد بررسی از عملکرد بالاتری نسبت به رقم شاهد مهران برخوردار بودند و بنابراین به‌خوبی می‌توان با جایگزینی این هیبریدها در عرصه، میانگین عملکرد دانه ارزن مرواریدی را در کشور بهبود بخشید. علاوه بر این، با توجه به بحران آب در کشور، معرفی رقم‌های با عملکرد بالا و متنوع به عرصه، کشاورزان را به کشت این محصول کم‌آب‌بر ترغیب خواهد کرد.

واژه‌های کلیدی: برهمکنش ژنوتیپ × محیط، تجزیه پایداری، عملکرد دانه، هتروزیس

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۱۵

نحوه استناد به این مقاله:

عطائی، رضا، قاسمی، احمد، آذری نصرآباد، علی، ترابی، مسعود، و شیرینی، محمدرضا. (۱۴۰۴). واکنش هیبریدهای ارزن دانه‌ای به تنوع محیطی و شناسایی هیبریدهای پرمحصول و پایدار. *تحقیقات غلات*، ۱۵(۴)، ۳۸۹-۴۰۲. doi: [10.22124/CR.2025.30599.1865](https://doi.org/10.22124/CR.2025.30599.1865)

مقدمه

تغییرات اقلیمی و افزایش متوسط دمای جهانی تأثیر عمیقی بر تولیدات کشاورزی در سراسر جهان دارد. این تغییرات به‌طور مستقیم بر فرآیندهای بیوفیزیکی نظیر رشد گیاهان و حیوانات و همچنین بر جنبه‌های مختلف فرآوری و توزیع غذا تأثیر می‌گذارند. ارزیابی دقیق اثرات تغییرات اقلیمی و به‌کارگیری ابزارها و روش‌های نوین برای کاهش این اثرات به‌منظور تولید بهینه محصولات کشاورزی و تأمین نیازهای غذایی جمعیت در حال رشد ضروری است. ارزن مرواریدی (*Pennisetum glaucum* L.) به‌عنوان یک محصول مغذی و مقاوم به تغییرات اقلیمی، ظرفیت بالایی برای افزایش تولید و دستیابی به بازده اقتصادی بیشتر در شرایط اقلیمی سخت دارد. این گیاه با توانایی بالاتر در تحمل دماهای شدید، حتی در مواجهه با تغییرات اقلیمی، به‌ویژه در مناطق حاشیه‌ای، می‌تواند جایگزین مناسبی برای دیگر غلات باشد. افزون بر این، ارزن مرواریدی دارای سقف دمایی بالاتری برای تولید دانه است و به‌عنوان یک محصول با پتانسیل تغذیه‌ای بالا و کم‌تر شناخته‌شده، نیاز به استفاده بیشتر و بهره‌برداری بهینه از آن وجود دارد (Krishnan & Meera, 2018). ارزن مرواریدی به دلیل تاب‌آوری بالاتر در برابر رویدادهای اقلیمی شدید مانند خشک‌سالی و کمبود آب، می‌تواند نقش حیاتی در تأمین امنیت غذایی و تغذیه‌ای در شرایط اقلیمی در حال تغییر که در حال حاضر ابعاد نگران‌کننده‌ای به‌خود گرفته است، ایفا کند. بر اساس گزارش فائو، تولید ارزن (شامل تمامی گونه‌های ارزن) در سال ۲۰۲۳ بیش از ۳۱ میلیون تن (با سطح زیر کشت حدود ۳۲ میلیون هکتار) بوده است که در مقایسه با ذرت با تولید بیش از ۱۲۰۰ میلیون تن (با سطح زیر کشت بیش از ۲۰۸ میلیون هکتار)، سهم بسیار کمی در اقتصاد کشاورزی دنیا دارد. ارزن مرواریدی بیش از نیمی از سطح زیرکشت ارزن‌ها را به‌خود اختصاص داده است و از لحاظ اهمیت اقتصادی در بین غلات، در رتبه ششم بعد از گندم، برنج، ذرت، جو و سورگوم قرار دارد (FAO, 2023). ارزن‌ها و به‌ویژه ارزن مرواریدی نقش مهمی در تأمین امنیت غذایی مناطق گرم و خشک دارند و تخمین زده می‌شود که تأمین غذای بیش از ۹۰ میلیون نفر در این مناطق به تولید ارزن وابسته است (Satyavathi et al., 2021). دانه ارزن مرواریدی از لحاظ ارزش غذایی نسبت به گندم، برنج، ذرت و سورگوم دارای وضعیت بهتری است

و مقادیر بالاتری پروتئین، ویتامین‌ها، اسیدهای آمینه ضروری، آنتی‌اکسیدان‌ها و ریزمغذی‌های ضروری مانند آهن و روی دارد (Muthamilarasan et al., 2016; Dias-Martins et al., 2018). ارزن مرواریدی، به‌دلیل ارزش غذایی بالا، در برخی کشورهای در حال توسعه مانند هند و چین به‌عنوان غذای انسان مورد استفاده قرار می‌گیرد (Davis et al., 2003). علاوه بر این، مقایسه انرژی‌زایی دانه ارزن مرواریدی (۳۶۱ کیلوکالری در ۱۰۰ گرم) در مقایسه با گندم (۳۴۶ کیلوکالری در ۱۰۰ گرم)، برنج (۳۴۵ کیلوکالری در ۱۰۰ گرم)، ذرت (۱۲۵ کیلوکالری در ۱۰۰ گرم) و سورگوم (۳۴۹ کیلوکالری در ۱۰۰ گرم)، نشان می‌دهد که این گیاه می‌تواند جایگزین مناسبی برای سایر غلات در خوراک دام و طیور و حتی رژیم غذایی انسان باشد (Nambiar et al., 2011). در میان غلات، ارزن مرواریدی یکی از گیاهانی است که با ایجاد هیبریدهای سینگل‌کراس با استفاده از سیستم نرعمیمی در اوایل دهه ۱۹۶۰ میلادی، افزایش عملکرد چشم‌گیری از خود نشان داد. رقم HHB67 یکی از موفق‌ترین هیبریدهای ارزن مرواریدی در دهه ۶۰ است که برای عملکرد دانه در حدود ۸۰ درصد هتروزیس از خود نشان داد (Srivastava et al., 2020). با وجود گزارش‌های متفاوت در مورد میزان هتروزیس در ارزن مرواریدی، با این‌حال توافق خوبی بر استفاده از رقم‌های هیبرید به‌جای رقم‌های آزادگرده‌افشان در این گیاه وجود دارد (Gupta et al., 2018).

ارزیابی پایداری ۱۴ ژنوتیپ ارزن مرواریدی در شرایط محیطی مختلف نشان داد که بخش عمده‌ای از برهمکنش ژنوتیپ × محیط دارای ماهیت خطی بود (Patel et al., 2019). همچنین، هیچ‌یک از ژنوتیپ‌ها پایداری متوسطی برای تمامی صفات نداشتند، با این‌حال هیبریدهای MS94111A × IC1153 و MS88004A × AIB214 دارای پایداری متوسط برای عملکرد دانه در بوته، هیبرید MS94111A × IC1179 دارای پایداری کم‌تر از متوسط و سازگار با محیط‌های مطلوب و هیبریدهای MS88004A × IC301R و MS99111A × AIB214 دارای پایداری بالاتر از متوسط و سازگار با محیط‌های نامطلوب برای عملکرد دانه در بوته بودند (Patel et al., 2019). در مطالعه دیگری، عملکرد و پایداری ۳۰ ژنوتیپ ارزن مرواریدی در شرایط مختلف محیطی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که برهم‌کنش

مواد و روش‌ها

مواد گیاهی این تحقیق (جدول ۱)، تعداد ۱۱ هیبرید جدید ارزن مرواریدی ایجاد شده با سیستم نرعیمی سیتوپلاسمی (Ataei *et al.*, 2024) بود که به همراه رقم مهران به عنوان شاهد در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در مناطق کرج، بیرجند، اصفهان و زابل به مدت دو سال (۱۴۰۱-۱۴۰۲) ارزیابی شد. کشت بذر بر اساس اقلیم هر منطقه در زمان مناسب انجام شد. هر کرت آزمایشی شامل چهار ردیف به طول پنج متر با فاصله ردیف ۶۰ سانتی‌متر بود. تمامی عملیات زراعی بر اساس عرف منطقه انجام شد. یادداشت‌برداری صفات در تمامی مناطق به صورت یکسان بر اساس دستورالعمل موسسه بین‌المللی ایکریسات (ICRISAT) انجام شد. برای اندازه‌گیری تعداد روز تا ۵۰ درصد گلدهی، ارتفاع گیاه، طول خوشه، قطر خوشه، تعداد پنجه و وزن هزار دانه، ده بوته به‌طور تصادفی از ردیف‌های میانی هر کرت پس از حذف اثر حاشیه انتخاب شد. برای اندازه‌گیری عملکرد دانه نیز بوته‌های دو ردیف میانی برداشت و پس از توزین دانه‌ها، عملکرد دانه بر حسب تن در هکتار ثبت شد. تجزیه آماری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS و مقایسه میانگین‌ها بر اساس آزمون چنددامنه‌ای دانکن انجام شد. برای انجام تجزیه واریانس مرکب، ژنوتیپ و مکان به عنوان متغیرهای ثابت و سال به عنوان متغیر تصادفی در نظر گرفته شد و واریانس‌های خطای تمامی آزمایش‌ها بر اساس امید ریاضی میانگین مربعات محاسبه شد. برای ارزیابی پایداری هیبریدها نیز از روش‌های لین و بینز (Lin & Binns, 1988)، رتبه‌بندی و GGE بای پلات (Kang *et al.*, 2006) استفاده و در نهایت بهترین هیبریدهای آزمایش انتخاب شدند. برای محاسبه میانگین رتبه ژنوتیپ‌ها، هر ژنوتیپ بر اساس عملکرد در هر محیط، رتبه‌بندی و سپس میانگین رتبه آن ژنوتیپ در محیط‌های مختلف محاسبه و برای مقایسه پایداری استفاده شد.

ژنوتیپ × محیط برای صفات تعداد روز تا رسیدگی، ارتفاع بوته، قطر خوشه، میزان دانه‌بندی، عملکرد دانه در بوته، شاخص برداشت، وزن هزار دانه و درصد پروتئین معنی‌دار بود. نتایج تجزیه پایداری به روش ابرهات و راسل نیز نشان داد که دو ژنوتیپ GP-14 و J-2563 دارای پایداری خوبی در محیط‌های مختلف بودند (Sodhaparmar *et al.*, 2023). خاندلوال و همکاران (Khandelwal *et al.*, 2024) تعداد ۲۱ هیبرید ارزن مرواریدی را در مناطق خشک و نیمه‌خشک هند مورد ارزیابی قرار دادند و بر اساس نتایج تجزیه پایداری با روش‌های AMMI و GGE بای‌پلات، هیبرید SHT106 را به عنوان رقم دومنظوره (دانه‌ای و علوفه‌ای)، SHT110 و SHT108 را به عنوان هیبریدهای پایدار و با عملکرد دانه بالا و SHT109 و SHT103 را به عنوان هیبریدهای پایدار و با عملکرد علوفه خشک بالا در تمام محیط‌ها شناسایی و معرفی کردند.

ارزن در ایران با سطح زیر کشت ۲۵۰۰۰ هکتار و متوسط عملکرد دانه ۲-۱/۵ تن در هکتار، اغلب در استان‌های اصفهان، یزد، سیستان و بلوچستان، خراسان جنوبی، کرمان و مازندران کشت می‌شود. تولید ارزن مرواریدی در ایران اغلب متکی به استفاده از رقم‌های با عملکرد پایین بوده و در حال حاضر رقم مهران تنها رقم اصلاح‌شده کشور است که از طریق گزینش اصلاح شده و یک رقم آزادگرده‌افشان می‌باشد. از این‌رو، تولید رقم‌های هیبرید با عملکرد بالا و پایدار که بتواند بخشی از بازار مصرف در کشور را به‌خود اختصاص دهد، از اولویت‌های تحقیقاتی ارزن است. در این راستا، تحقیق حاضر با هدف مقایسه عملکرد نخستین هیبریدهای ارزن مرواریدی کشور و تعیین پایدارترین هیبرید انجام شد. انتظار می‌رود این تحقیق مقدمه‌ای بر تغییر جهت برنامه اصلاح ارزن مرواریدی به سمت ایجاد رقم‌های هیبرید و جایگزینی رقم‌های آزادگرده‌افشان با رقم‌های هیبرید باشد.

جدول ۱- ژنوتیپ‌های ارزن مرواریدی مطالعه شده در این آزمایش

Table 1. Pearl millet genotypes studied in this experiment

Genotype	Pedigree	Genotype	Pedigree
H294	ICMA 93222 × SPII4	H543	ICMA 95222 × SPII3
H314	ICMA 08999 × SPII4	H563	ICMA 97444 × SPII3
H333	ICMA 09888 × SPII3	H604	ICMA 04999 × SPII4
H353	ICMA 00999 × SPII3	H794	ICMA 98222 × SPII4
H444	ICMA 89111 × SPII4	H824	ICMA 04888 × SPII4
H504	ICMA 94222 × SPII4	Mehran (Check)	-

ضریب برتری (P_i) نیز بر اساس رابطه (۱) محاسبه شد:

$$P_i = \sum_{j=1}^n \frac{(X_{ij} - M_j)^2}{2n} \quad (1)$$

در این رابطه، P_i ضریب برتری ژنوتیپ i ، X_{ij} عملکرد ژنوتیپ i در محیط j ، M_j بیشترین عملکرد ثبت شده در محیط j و n تعداد محیط‌های مورد بررسی است. برای محاسبه (GL) P_i از داده‌های عملکرد در جدول دو طرفه ژنوتیپ و مکان و برای محاسبه (GLY) P_i از جدول سه طرفه ژنوتیپ، مکان و سال استفاده شد.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس مرکب صفات مورد بررسی در چهار مکان مختلف طی دو سال نشان داد که اثر مکان برای تمامی صفات مورد بررسی معنی‌دار بود، اما اثر سال فقط برای قطر خوشه و عملکرد دانه معنی‌دار شد (جدول ۲). همچنین، برهمکنش ژنوتیپ \times مکان برای تمامی صفات مورد بررسی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود، در حالی که برهمکنش ژنوتیپ \times سال و ژنوتیپ \times سال \times مکان فقط برای ارتفاع بوته، قطر خوشه و عملکرد دانه معنی‌دار شد (جدول ۲). با توجه به معنی‌داری برهمکنش، برای آزمون اثر اصلی ژنوتیپ در تجزیه واریانس و مقایسه میانگین ژنوتیپ‌ها از واریانس برهمکنش به‌عنوان خطای آزمایش استفاده شد. نتایج نشان داد که اثر اصلی ژنوتیپ برای تمامی صفات در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. همچنین، محیط بخش بزرگی از تنوع موجود را توجیه کرد، به طوری که سهم تنوع ایجاد شده توسط محیط از ۶۶/۹ درصد برای ارتفاع بوته تا ۹۱/۸ درصد برای عملکرد دانه متغیر بود (جدول ۲).

نتایج نشان داد که ژنوتیپ‌های ارزن از تنوع بالایی برای صفات مورد بررسی (به‌ویژه صفت انتهایی عملکرد دانه) برخوردار بودند، به طوری که پاسخ ژنوتیپ‌ها برای این صفات در محیط‌های مختلف یکسان نبود و ژنوتیپ‌ها تحت تأثیر شرایط خاص هر محیط بودند. معنی‌داری اثر اصلی مکان و بزرگی واریانس محیط‌های آزمایش نشان‌دهنده تفاوت بین مناطق از لحاظ ویژگی‌های جغرافیایی (مانند ارتفاع از سطح دریا) و شرایط آب و هوایی (مانند میزان بارندگی، پراکنش بارندگی و درجه حرارت) بود (Kang, 1997). نتایج مطالعات دیگران نیز نشان داده است که بخش بزرگی از واریانس ایجاد شده توسط محیط توجیه می‌شود. در بررسی پایداری ژنوتیپ‌ها

در لوبیا (Temesgen *et al.*, 2015) و ارزن معمولی (Zhang *et al.*, 2016) گزارش شد که به‌ترتیب بیش از ۸۹ و ۸۶ درصد از واریانس کل توسط محیط ایجاد شد. همچنین، معنی‌داری واریانس برهمکنش‌ها برای صفات مورد بررسی (به‌ویژه برای عملکرد دانه)، نشان‌دهنده پاسخ‌های متفاوت ژنوتیپ‌های ارزن مرواریدی در شرایط محیطی مختلف است که منجر به ایجاد تفاوت در عملکرد و رتبه‌بندی ژنوتیپ‌ها در محیط‌های مختلف می‌شود (Fikere *et al.*, 2008). بزرگی واریانس برهمکنش‌ها در مقایسه با واریانس ژنوتیپ با نتایج مطالعات صورت گرفته در ذرت (Shiri, 2013) و برنج (Lakew *et al.*, 2014) مطابقت داشت. نوسان عملکرد در محیط‌های مختلف و وجود برهمکنش ژنوتیپ و محیط در انتخاب و معرفی ژنوتیپ‌ها برای مجموعه محیط‌های هدف موثر است (Dawson *et al.*, 2011; Mikó *et al.*, 2014).

مقایسه میانگین ژنوتیپ‌های مورد بررسی برای تعداد روز تا گلدهی، ارتفاع بوته، تعداد پنجه در متر مربع و عملکرد دانه (به‌عنوان محصول نهایی) در جدول ۳ ارائه شده است. میانگین کل آزمایش برای عملکرد دانه ۵/۴۴ تن در هکتار بود که اختلاف زیادی با عملکرد رقم شاهد (۳/۳۶ تن در هکتار) داشت. برای صفت عملکرد دانه، شش هیبرید امیدبخش H504، H604، H824، H794 و H444 به‌ترتیب دارای عملکرد بیش‌تری نسبت به میانگین کل آزمایش بودند. همچنین، از ۱۱ هیبرید مورد مطالعه، ۱۰ هیبرید (به‌جز H333) عملکرد بیش‌تری از رقم شاهد مهران داشتند و دو هیبرید امیدبخش H824 و H794 به‌ترتیب با ۷/۸۱ و ۸/۴۱ تن در هکتار بیش‌ترین عملکرد دانه را به‌خود اختصاص دادند. این دو هیبرید امیدبخش، علاوه بر عملکرد بالا دارای ویژگی‌های مطلوب یک رقم دانه‌ای (عدم ورس در زمان رسیدگی، ارتفاع مناسب برای برداشت مکانیزه و همزمانی رسیدگی) نیز بودند. دو هیبرید H824 و H794 به‌ترتیب با میانگین ارتفاع ۱۵۸/۳ و ۱۴۸/۷ سانتی‌متر و میانگین تعداد پنجه ۱۴/۵ و ۱۴/۲ عدد کم‌ترین ارتفاع بوته و تعداد پنجه را در آزمایش داشتند (جدول ۳). کاهش ارتفاع گیاه امکان افزایش تراکم و مقاومت به ورس را فراهم می‌کند که یکی از اهداف اصلاحی مهم است. هر چند پنجه‌زنی زیاد در گیاهان علوفه‌ای صفت مناسبی برای افزایش عملکرد است، ولی این ویژگی در گیاهان دانه‌ای به‌دلیل عدم یکنواختی در رسیدگی و اختلال در برداشت مکانیزه، صفت مطلوبی

بین ۸۰ تا ۱۲۰ سانتی‌متر به‌عنوان ارتفاع مناسب برداشت ماشینی معرفی می‌شود (Wei Yan *et al.*, 2019). در ارزن مرواریدی سه نوع الگوی پنجه‌زنی هم‌زمان، غیر هم‌زمان (مشتق از محور جوانه برگ پایه) و غیر انتهایی (مشتق از محور جوانه‌های جانبی) وجود دارد (Salama *et al.*, 2020) و الگوی پنجه‌زنی غیر انتهایی بیش‌ترین تأثیر را بر عدم یکنواختی رسیدگی در رقم‌های دیررس دارد. هیبریدهای H794 و H824 علاوه بر ارتفاع مناسب، مقاومت بالا به ورس (بدون ورس) و زودرسی، از کم‌ترین الگوی پنجه‌زنی غیر انتهایی و بالاترین یکنواختی رسیدگی برخوردار بودند.

به‌شمار نمی‌آید (Gooding, 2009). با افزایش سطح زیر کشت و افزایش هزینه‌های کارگری، امکان برداشت مکانیزه یکی از عوامل موفقیت رقم در عرصه است (Yang *et al.*, 2021). گزارش‌های متعددی در مورد معماری گیاه برای سهولت برداشت مکانیزه در گیاهان مختلف به‌ویژه ذرت وجود دارد (Yan *et al.*, 2019; Jiang *et al.*, 2022). مقاومت به ورس و یکنواختی در رسیدگی دو صفت مهم برای تناسب رقم در برداشت مکانیزه هستند. رقم‌های پاکوتاه به‌دلیل کودپذیری بیش‌تر و مقاومت به ورس نسبت به رقم‌های پابلند که رشد رویشی بیش‌تری دارند و دیررس‌تر هستند، ترجیح داده می‌شوند. در پنبه ارتفاع

جدول ۲- تجزیه واریانس مرکب صفات مورد بررسی بر اساس داده‌های چهار منطقه طی دو سال

Table 2. Combined analysis of variance of the studied traits based on data from four locations during two years

Source of variation	df	Days to 50% flowering	Plant height	Tiller number	Panicle length	Panicle diameter	1000-grain weight	Grain yield
Environment (E)	7	1307.27**	15104.65**	216.97**	275.62**	9.72**	39.81**	317.88**
Location (L)	3	3044.33**	35216.90**	503.90**	630.77**	20.68**	91.22**	729.25**
Year (Y)	1	3.55 ^{ns}	0.578 ^{ns}	2.05 ^{ns}	10.35 ^{ns}	1.11**	0.03 ^{ns}	2.80**
L × Y	3	4.80 ^{ns}	27.09 ^{ns}	1.68 ^{ns}	8.90 ^{ns}	1.64**	1.68*	11.55**
Replication within E	16	1.68	13.57	1.37	3.00	0.01	0.37	0.31
Genotype (G)	11	771.18**	16947.29**	108.40**	105.46**	2.61**	15.78**	57.89**
G × E	77	12.22**	175.59**	8.02**	10.06**	0.32**	2.22**	3.09**
G × L	33	48.82**	374.66**	17.50**	21.53**	0.62**	4.80**	5.89**
G × Y	11	2.14 ^{ns}	34.36**	0.81 ^{ns}	1.15 ^{ns}	0.11**	0.26 ^{ns}	0.71*
G × L × Y	33	2.09 ^{ns}	23.61**	0.95 ^{ns}	1.58 ^{ns}	0.10**	0.30 ^{ns}	1.10**
Error	176	1.84	7.52	1.21	2.35	0.02	0.67	0.38
Variance explained by environment (%)		78.6	66.9	79.5	82.7	87.0	80.7	91.8
Variance explained by genotypes (%)		19.8	32.2	17.0	13.4	9.7	13.7	7.1
Variance explained by interaction effects (%)		1.3	0.8	3.0	3.0	3.1	4.6	0.9

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

جدول ۳- مقایسه میانگین بین ژنوتیپ‌های ارزن مرواریدی

Table 3. Comparisons of means between pearl millet genotypes

Genotype	Plant height (cm)	Days to 50% flowering	Tiller number	Grain yield (t/ha)
H794	148.7 ^j	56.3 ^h	14.16 ^g	8.41 ^a
H824	158.3 ^h	62.41 ^d	14.54 ^g	7.81 ^b
H604	164.4 ^g	58.95 ^f	19.91 ^a	6.21 ^c
H504	152.8 ⁱ	58.16 ^g	16.27 ^e	5.92 ^{cd}
H444	174.6 ^d	62.16 ^d	17.95 ^{bc}	5.75 ^d
H294	170.7 ^e	60.08 ^e	17.11 ^d	5.76 ^d
H563	176.6 ^c	64.00 ^c	18.58 ^b	5.10 ^e
H353	209.1 ^a	73.33 ^a	17.95 ^{bc}	4.99 ^e
H314	168.6 ^f	59.20 ^f	17.75 ^c	4.02 ^g
H333	209.2 ^a	71.5 ^b	20.33 ^a	3.60 ^h
H543	203.4 ^b	71.04 ^b	20.27 ^a	4.39 ^f
Mehran	118.8 ^k	64.75 ^c	15.27 ^f	3.36 ^h
Overall Mean	-	63.49	-	5.44

Means followed by similar letters in each column are not significantly different by Duncan's test.

داخلی است که به‌طور ویژه بر استفاده از رقم‌های هیبرید ارزن مرواریدی تأکید دارد، به‌طوری که تمامی رقم‌های مورد آزمایش نسبت به رقم تجاری موجود (رقم مهران) از افزایش عملکرد قابل قبولی برخوردار بودند و انتظار می‌رود با به‌کارگیری این هیبریدها، میانگین عملکرد دانه ارزن مرواریدی در کشور بهبود یابد.

میانگین کل عملکرد در این آزمایش ۵/۴۴ تن در هکتار بود و هیبریدهای H794 و H824 دارای بالاترین عملکرد در بین ژنوتیپ‌های مورد آزمایش بودند. در هشت محیط مورد آزمایش، عملکرد دانه از ۲/۲۰ تن در هکتار در محیط E₁ تا ۹/۳۳ تن در هکتار در محیط E₈ متغیر بود. مناطق کرج و اصفهان طی دو سال به‌ترتیب با ۹/۴۱ و ۶/۵۰ تن در هکتار تولید دانه از مطلوب‌ترین محیط‌ها در این آزمایش بودند، در حالی که محیط‌های E₁ و E₂ (منطقه زابل طی دو سال) به‌ترتیب با ۲/۲۰ و ۲/۲۷ تن در هکتار، کم‌بازده‌ترین محیط‌ها بودند. ژنوتیپ H794 محیط‌های E₁، E₂، E₅ و E₆ (زابل و اصفهان) و ژنوتیپ H824 در چهار محیط دیگر عملکرد بالاتری از بقیه ژنوتیپ‌ها داشتند (جدول ۴). تغییر رتبه رقم‌ها در محیط‌های مختلف نشان داد که برهمکنش ژنوتیپ و محیط از نوع متقاطع وجود دارد (Yan & Hunt, 2001).

ژنوتیپ H794 با ۵۶/۳ روز تا گلدهی زودرس‌ترین هیبرید امیدبخش آزمایش بود و اختلاف معنی‌داری با رقم شاهد مهران داشت. زودرسی یکی از مهم‌ترین صفات ارزن مرواریدی است. به‌دلیل اینکه ارزن اغلب به‌عنوان کشت دوم بعد از گندم در کشور مطرح است، بنابراین رقم‌های زودرس ارزن امکان برنامه‌ریزی برای سیستم کشت دوم را فراهم می‌آورند. از طرفی، در مقیاس جهانی، ارزن اغلب در نواحی گرم و خشک کشت شده و در طول رشد با انواع تنش‌ها به‌ویژه خشکی مواجه می‌شود. ارزن مرواریدی مقاومت خوبی به تنش خشکی میان‌فصل دارد و هنگام روبرو با آن قابلیت جبران کاهش عملکرد را با توجه به تولید پنجه‌های ثانویه دارد. بنابراین، خشکی میان‌فصل اهمیت کم‌تری نسبت به خشکی آخر فصل دارد. رقم‌های زودرس در نواحی که با تنش خشکی آخر فصل روبرو هستند، به وسیله مکانیسم فرار تا حد زیادی از خسارت وارده در امان می‌مانند (Vadez et al., 2012).

با گسترش جهانی‌شدن و پیشرفت فناوری، کشاورزی نیز از ساختار سنتی مبتنی بر کشاورزان خرده‌پا به سمت سیستم‌های تحت کنترل شرکت‌های بزرگ تغییر کرده است. استفاده از فناوری‌های نوین، از جمله رقم‌های هیبرید و پرمحصول، نقش چشم‌گیری در افزایش تولید، بهبود امنیت غذایی و رشد اقتصادی کشورهای در حال توسعه داشته است (Thanh & Duong, 2021).

جدول ۴- میانگین عملکرد علوفه و رتبه‌بندی ژنوتیپ‌های مورد بررسی در محیط‌های مختلف

Table 4. Mean forage yield (t/ha) and ranking of the evaluated genotypes across different environments

Genotype	H294	H314	H333	H353	H444	H504	H543	H563	H604	H794	H824	Mehran	Mean	Rank
E1 [†]	2.97	1.63	1.40	2.30	1.37	1.13	1.53	1.47	1.33	5.37	4.60	1.27	2.20	8
E2	3.30	1.73	1.40	2.67	1.50	1.10	1.47	1.60	1.40	5.40	4.47	1.20	2.27	7
E3	4.00	1.80	1.50	2.17	3.67	5.33	2.37	3.03	4.50	5.60	6.50	3.57	3.89	5
E4	3.47	1.80	1.80	2.27	3.50	5.37	1.93	2.87	4.86	5.97	6.17	3.53	3.40	6
E5	5.53	4.83	4.07	5.00	6.97	6.73	4.13	5.67	7.20	10.33	6.80	2.70	5.83	4
E6	7.73	4.83	5.20	6.37	8.90	8.60	5.23	7.23	9.23	10.70	8.70	3.43	7.18	3
E7	9.40	7.83	6.53	9.73	9.97	9.93	9.40	9.53	10.63	11.98	12.53	5.61	9.49	2
E8	9.70	7.73	7.10	9.43	10.20	9.17	9.07	9.43	10.57	11.98	12.73	5.61	9.33	1
Mean	5.76	4.02	3.62	4.99	5.75	5.92	4.39	5.10	6.21	8.41	7.81	3.36	5.44	
Rank	5	10	11	8	6	4	9	7	3	1	2	12		
Mean Rank	5.43	9.00	10.62	6.93	5.37	6.75	8.68	6.81	4.50	1.62	2.12	10.12		
P _i (GLY) [‡]	5.09	11.89	14.09	7.69	5.09	5.07	10.23	7.06	4.11	0.37	1.17	17.26		
P _i (GL) [‡]	4.54	11.25	13.27	7.24	4.53	4.59	9.76	6.58	3.53	0.08	1.04	16.20		

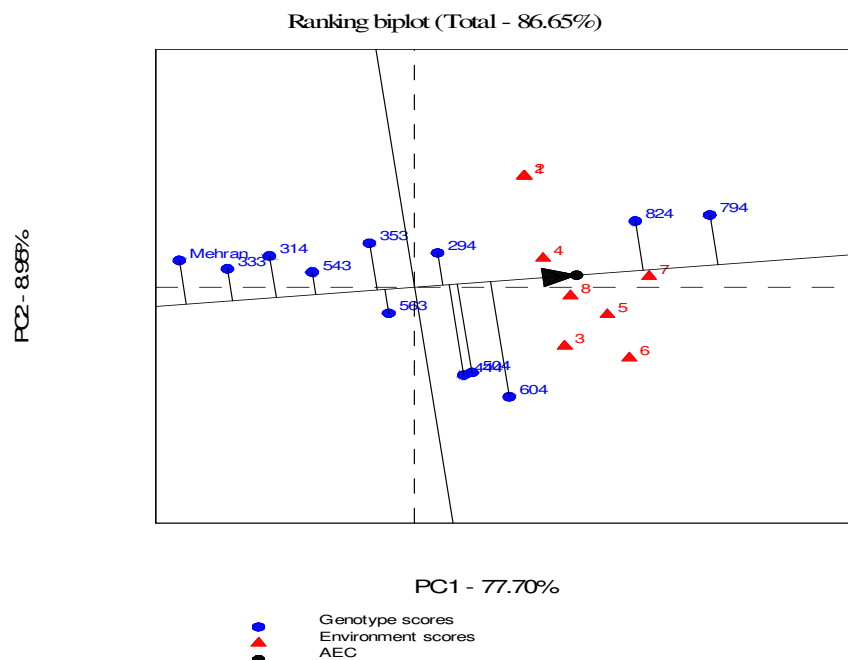
[†] E1, Zabol 2022; E2, Zabol 2023; E3, Birjand 2022; E4, Birjand 2023; E5, Isfahan 2022; E6, Isfahan 2023; E7, Karaj 2022; E8, Karaj 2023.

[‡] P_i (GL) and P_i (GLY) is superiority index based on genotype×location and genotype×location×year data, respectively.

بیشتری برخوردار هستند. به این ترتیب، نتایج بای پلات ژنوتیپ‌ها نشان داد که ژنوتیپ‌های H794 و H824 دارای بیشترین و رقم مهران دارای کمترین اثر اصلی ژنوتیپ هستند. این نتایج با نتایج جدول ۵ که در آن ژنوتیپ‌های H794 و H824 دارای بیشترین و رقم مهران دارای کمترین مقدار عملکرد بود، مطابقت دارد. علاوه بر این، به دلیل اینکه مؤلفه دوم برآوردی از برهمکنش ژنوتیپ × محیط است، بنابراین طول خطوط عمود شده از ژنوتیپ‌ها و محیط‌ها بر محور AEC، میزان این برهمکنش را نشان می‌دهد. بر این اساس، دو ژنوتیپ H794 و H824 پایداری خوبی در محیط‌های مورد داشتند (شکل ۱).

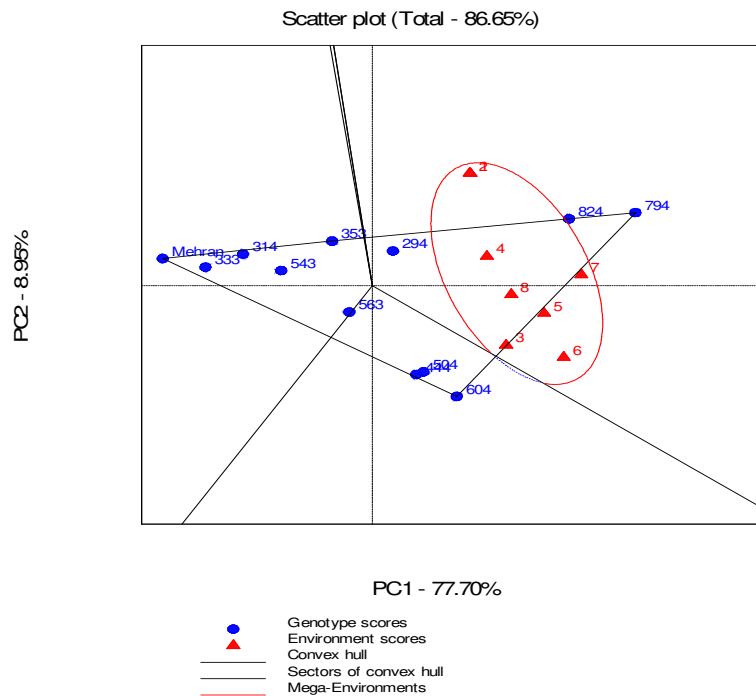
به منظور شناسایی الگوی برهمکنش و تقسیم‌بندی ژنوتیپ‌ها در محیط‌ها و همچنین شناسایی محیط‌های بزرگ، نمودار چندضلعی بای پلات رسم شد (شکل ۲). نمودار چندضلعی برای ژنوتیپ‌های ارزن مرواریدی مطالعه شده سه بخش مجزا و فرضی شناسایی کرد. همچنین کلیه محیط‌ها را در یک محیط بزرگ قرار داد (شکل ۲). وجود محیط‌های بزرگ در این آزمایش نشان داد که الگوی برهمکنش از نوع متقاطع است.

به دلیل معنی‌دار بودن برهمکنش ژنوتیپ × مکان (GL) و ژنوتیپ × سال × مکان (GLY)، تجزیه پایداری به روش ضریب برتری لین و بینز (Lin & Binns, 1988) با دو روش مجزا برای برهمکنش‌های دوگانه و سه‌گانه انجام شد. نتایج نشان داد که در هر دو روش دو ژنوتیپ H794 و H824 با کمترین ضریب برتری، پایدارترین ژنوتیپ‌ها بودند (جدول ۴). تجزیه گرافیکی و رتبه‌بندی ژنوتیپ‌ها و محیط‌ها بر اساس عملکرد دانه و پایداری نشان داد که مؤلفه‌های اول و دوم به ترتیب ۷۷/۷ و ۸/۹۵ درصد از واریانس کل داده‌ها را توجیه کردند (شکل ۱). مؤلفه اول نشان‌دهنده اثر اصلی ژنوتیپ و مؤلفه دوم نشان‌دهنده برهمکنش است (Yan, 2002). در تجزیه پایداری به روش گرافیکی در صورتی که دو مؤلفه اول بیش از ۶۰ درصد از واریانس کل داده‌ها را توصیف کنند، مدل برازش شده برای تجزیه برهمکنش کفایت می‌کند (Yan et al., 2010). در این مطالعه، مجموع دو مؤلفه بیش از ۸۶ درصد از واریانس داده‌ها را توجیه کرد. ژنوتیپ‌ها و محیط‌هایی که در سمت راست محور میانگین عملکرد محیطی یا AEC (پیکان مشکی روی محور افقی) قرار دارند، از اثرات اصلی ژنوتیپ



شکل ۱- رتبه‌بندی ژنوتیپ‌های مورد بررسی بر اساس اثرات اصلی و برهمکنش. شماره‌های ۱ تا ۸ (مثلث‌های قرمز)، محیط‌های مورد مطالعه هستند و به ترتیب عبارت‌اند از: زابل ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲، بیرجند ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲، اصفهان ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲، و کرخ ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲.

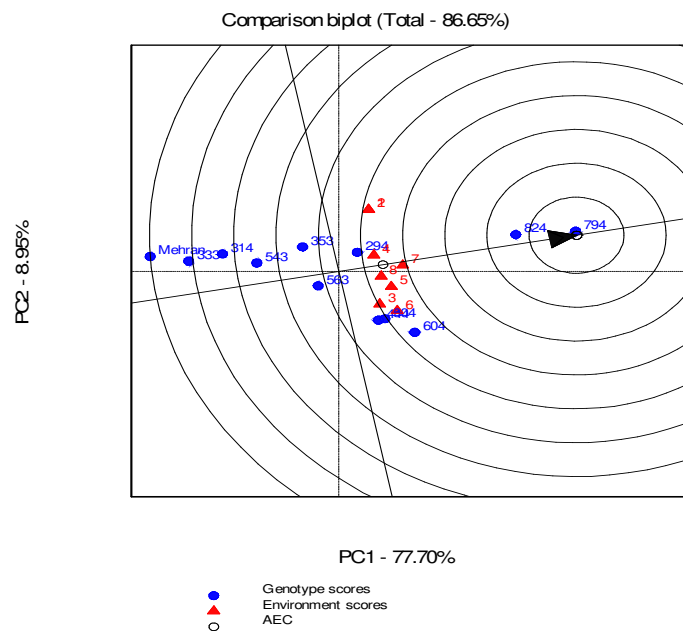
Figure 1. Ranking the studied genotypes based on their main and interaction effects. The numbers 1-8 (red triangles) are the studied environments: Zabol 2022 and 2023, Birjand 2022 and 2023, Isfahan 2022 and 2023, and Karaj 2022 and 2023, respectively.



شکل ۲- نمایش الگوی برهمکنش و تقسیم‌بندی محیط‌ها به محیط‌های بزرگ. شماره‌های ۱ تا ۸ (مثلث‌های قرمز) محیط‌های مورد مطالعه هستند و به ترتیب عبارت‌اند از: زابل ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲، بیرجند ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲، اصفهان ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲، و کرج ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲. Figure 2. Representation of the interaction pattern and classification of environments into mega-environments. The numbers 1-8 (red triangles) are the studied environments: Zabol 2022 and 2023, Birjand 2022 and 2023, Isfahan 2022 and 2023, and Karaj 2022 and 2023, respectively.

مناطق مختلف از اهمیت زیادی برخوردار است. با اینکه یک ژنوتیپ ایده‌آل ممکن است هیچ‌گاه در واقعیت وجود نداشته باشد، اما ژنوتیپ ایده‌آل در تجزیه گرافیکی به صورت ژنوتیپ فرضی با عملکرد و پایداری بالا تعریف می‌شود و یک مفهوم نظری است که به‌عنوان یک شاخص برای گزینش ژنوتیپ‌های تحت بررسی استفاده می‌شود (Yan & Tinker, 2006). ژنوتیپ ایده‌آل به‌صورت یک دایره در مرکز دوایر متحدالمرکز نشان داده می‌شود و فاصله ژنوتیپ‌های دیگر با آن سنجیده می‌شود. ژنوتیپ H794 نزدیک‌ترین ژنوتیپ به ژنوتیپ ایده‌آل است و بعد از آن ژنوتیپ H824 قرار دارد (شکل ۳). به‌طور کلی نتایج تجزیه پایداری به روش‌های مختلف (رتبه‌بندی، ضریب برتری لین و بینز و تجزیه‌های گرافیکی) در این آزمایش نشان داد دو ژنوتیپ H794 و H824 علاوه بر عملکرد بالا از پایداری دینامیک خوبی برخوردارند و پتانسیل معرفی به عنوان دو رقم هیبرید دانه‌ای را به خوبی دارا هستند.

همچنین، به‌دلیل اینکه رتبه ژنوتیپ‌ها در برخی محیط‌ها بدون تغییر باقی مانده است، بنابراین الگوی برهمکنش ترکیبی از برهمکنش متقاطع و غیرمتقاطع است. برازش چندضلعی نشان داد که ژنوتیپ‌های H794 و H824 در محیط بزرگ ژنوتیپ‌های برتر بودند. علاوه بر این، ژنوتیپ‌های H294، H543 و H563 که در نزدیکی مرکز چندضلعی قرار گرفتند، حساسیت قابل توجهی نسبت به تغییرات محیطی نداشتند. این نتایج همسو با نتایج ارائه شده در شکل ۱ بود که در آن این سه ژنوتیپ از کم‌ترین برهمکنش برخوردار بودند. همچنین، ژنوتیپ H604 و رقم مهران با وجود اینکه در رأس چندضلعی قرار گرفتند، با این حال در هیچ‌یک از محیط‌ها به‌عنوان ژنوتیپ برتر معرفی نشدند. این نتایج با نتایج توصیفی ارائه شده در جدول ۴ مطابقت کامل داشت. یکی از مزیت‌های تجزیه گرافیکی پایداری، شناسایی ژنوتیپ‌ها و محیط‌های ایده‌آل است. در برنامه‌های اصلاحی گزینش ژنوتیپ‌های با عملکرد بالا و پایدار طی سال‌ها و



شکل ۳- تعیین ژنوتیپ ایده‌آل. شماره‌های ۱ تا ۸ (مثلث‌های قرمز) محیط‌های مورد مطالعه هستند و به ترتیب عبارت‌اند از: زابل ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲، بیرجند ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲، اصفهان ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲، و کرج ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲.

Figure 3. Identifying the ideal genotype. The numbers 1-8 (red triangles) are the studied environments: Zabol 2022 and 2023, Birjand 2022 and 2023, Isfahan 2022 and 2023, and Karaj 2022 and 2023, respectively.

نتیجه‌گیری کلی

نتایج این مطالعه نشان داد که عملکرد دانه ژنوتیپ‌های ارزن مرواریدی به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر محیط و برهمکنش ژنوتیپ × محیط قرار گرفتند. علاوه بر این، ژنوتیپ‌ها هر دو نوع برهمکنش متقاطع و غیرمتقاطع را نشان دادند. بر اساس نتایج این مطالعه، دو ژنوتیپ H794 و H824 به ترتیب با میانگین عملکرد دانه ۸/۴۱ و ۷/۸۱ تن در هکتار، علاوه بر عملکرد بالا از پایداری دینامیک خوبی برخوردار بودند و پتانسیل معرفی به‌عنوان دو رقم هیبرید دانه‌ای را دارا هستند. در مجموع این مطالعه نشان داد که امکان بهره‌گیری از هتروزیس برای جایگزینی رقم‌های قدیمی ارزن مرواریدی با فناوری جدید ایجاد رقم‌های هیبرید وجود دارد، به‌طوری که تمامی رقم‌های امیدبخش مورد بررسی نسبت به رقم مهران دارای عملکرد بالاتری بودند. در حال حاضر رقم مهران تنها رقم تجاری کشور است که مورد کشت‌وکار قرار می‌گیرد. بنابراین با جایگزینی این هیبریدها می‌توان میانگین عملکرد را تا حدودی بهبود بخشید. همچنین، با توجه به بحران آب در

کشور معرفی رقم‌های پرمحصول و متنوع، کشاورزان را به کشت این محصول کم‌آب‌بر ترغیب خواهد کرد.

تضاد منافع

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

رعایت اخلاق در نشر

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

اجازه انتشار مقاله

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

References

- Ataei, R., Torabi, M., Ghasemi, A., & Shiri, M. R. (2024). Investigation and feasibility of pearl millet hybrid cultivars development in Iran. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 55(1), 63-73. doi: [10.22059/ijfcs.2023.358056.654999](https://doi.org/10.22059/ijfcs.2023.358056.654999).
- Davis, A., Dale, N., & Ferreira, F. (2003). Pearl millet as an alternative feed ingredient in broiler diets. *Journal of Applied Poultry Research*, 12(2), 137-144. doi: [10.1093/japr/12.2.137](https://doi.org/10.1093/japr/12.2.137).
- Dawson, J. C., Rivière, P., Berthelot, J.-F., Mercier, F., Kochko, P. d., Galic, N., Pin, S., Serpolay, E., Thomas, M., & Giuliano, S. (2011). Collaborative plant breeding for organic agricultural systems in developed countries. *Sustainability*, 3(8), 1206-1223. doi: [10.3390/su3081206](https://doi.org/10.3390/su3081206).
- Dias-Martins, A. M., Pessanha, K. L. F., Pacheco, S., Rodrigues, J. A. S., & Carvalho, C. W. P. (2018). Potential use of pearl millet (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) in Brazil: Food security, processing, health benefits and nutritional products. *Food Research International*, 109, 175-186. doi: [10.1016/j.foodres.2018.04.023](https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.04.023).
- FAO. (2023). FAOSTAT. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, Italy.
- Ficiciyan, A. M., Loos, J., & Tschardtke, T. (2021). Similar yield benefits of hybrid, conventional, and organic tomato and sweet pepper varieties under well-watered and drought-stressed conditions. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5, 628537. doi: [10.3389/fsufs.2021.628537](https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.628537).
- Fikere, M., Tadesse, T., & Letta, T. (2008). Genotype-environment interactions and stability parameters for grain yield of faba bean (*Vicia faba* L.) genotypes grown in south eastern Ethiopia. *International Journal of Sustainable Crop Production*, 3(6), 80-87.
- Gooding, M. J. (2009). The Wheat Crop. In: Khan, K., & Shewry, P. R. (Eds.). Wheat. Fourth edition. AACC International Press. pp. 19-49. doi: [10.1016/B978-1-891127-55-7.50009-4](https://doi.org/10.1016/B978-1-891127-55-7.50009-4).
- Gupta, S. K., Nepolean, T., Shaikh, C. G., Rai, K., Hash, C. T., Das, R. R., & Rathore, A. (2018). Phenotypic and molecular diversity-based prediction of heterosis in pearl millet (*Pennisetum glaucum* L. (R.) Br.). *The Crop Journal*, 6(3), 271-281. doi: [10.1016/j.cj.2017.09.008](https://doi.org/10.1016/j.cj.2017.09.008).
- Jiang, L., Rong, M., Wang, M., Chen, D., & Yu, H. (2022). Combining ability analysis of relevant characters of maize inbred lines suitable for machine harvest. *Computational Intelligence & Neuroscience*, 2022. doi: [10.1155/2022/2480801](https://doi.org/10.1155/2022/2480801).
- Srivastava, R. K., Bollam, S., Pujarula, V., Pusuluri, M., Singh, R. B., Potupureddi, G., & Gupta, R. (2020). Exploitation of heterosis in pearl millet: A review. *Plants*, 9(7), 807. doi: [10.3390/plants9070807](https://doi.org/10.3390/plants9070807).
- Kang, M. S. (1997). Using genotype-by-environment interaction for crop cultivar development. *Advances in Agronomy*, 62, 199-252. doi: [10.1016/S0065-2113\(08\)60569-6](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60569-6).
- Kang, M. S., Aggarwal, V. D., & Chirwa, R. M. (2006). Adaptability and stability of bean cultivars as determined via yield-stability statistic and GGE biplot analysis. *Journal of Crop Improvement*, 15(1), 97-120. doi: [10.1300/J411v15n01_08](https://doi.org/10.1300/J411v15n01_08).
- Khandelwal, V., Patel, R., Choudhary, K. B., Pawar, S., Patel, M., Iyanar, K., Mungra, K. D., Kumar, S., & Satyavathi, C. T. (2024). Stability analysis and identification of superior hybrids in pearl millet [*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.] using the multi trait stability index. *Plants (Basel)*, 13(8), 1-22. doi: [10.3390/plants13081101](https://doi.org/10.3390/plants13081101).
- Krishnan, R., & Meera, M. (2018). Pearl millet minerals: Effect of processing on bioaccessibility. *Journal of Food Science & Technology*, 55, 3362-3372. doi: [10.1007/s13197-018-3305-9](https://doi.org/10.1007/s13197-018-3305-9).
- Lakew, T., Tariku, S., Alem, T., & Bitew, M. (2014). Agronomic performances and stability analysis of upland rice genotypes in north west Ethiopia. *International Journal of Scientific & Research Publications*, 4(4), 1-9.
- Lin, C. S., & Binns, M. R. (1988). A superiority measure of cultivar performance for cultivar × location data. *Canadian Journal of Plant Science*, 68(1), 193-198. doi: [10.4141/cjps88-018](https://doi.org/10.4141/cjps88-018).
- Mikó, P., Löschenberger, F., Hiltbrunner, J., Aebi, R., Megyeri, M., Kovács, G., Molnár-Láng, M., Vida, G., & Rakszegi, M. (2014). Comparison of bread wheat varieties with different breeding origin under organic and low input management. *Euphytica*, 199(1-2), 69-80. doi: [10.1007/s10681-014-1171-8](https://doi.org/10.1007/s10681-014-1171-8).
- Muthamilarasan, M., Dhaka, A., Yadav, R., & Prasad, M. (2016). Exploration of millet models for developing nutrient rich graminaceous crops. *Plant Science*, 242, 89-97. doi: [10.1016/j.plantsci.2015.08.023](https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2015.08.023).
- Nambiar, V. S., Dhaduk, J., Sareen, N., Shahu, T., & Desai, R. (2011). Potential functional implications of pearl millet (*Pennisetum glaucum*) in health and disease. *Journal of Applied Pharmaceutical Science*, 1(10), 62-67.

- Patel, J. M., Patel, M. S., Patel, H. N., Soni, N. V., & Prajapati, N. N. (2019). Stability analysis in pearl millet (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.). *International Journal of Chemical Studies*, 7(4), 2371-2375.
- Salama, H. S., Shaalan, A. M., & Nasser, M. E. (2020). Forage performance of pearl millet (*Pennisetum glaucum* [L.] R. Br.) in arid regions: Yield and quality assessment of new genotypes on different sowing dates. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 80(4), 572-584. doi: [10.4067/S0718-58392020000400572](https://doi.org/10.4067/S0718-58392020000400572).
- Satyavathi, C. T., Ambawat, S., Khandelwal, V., & Srivastava, R. K. (2021). Pearl millet: A climate-resilient nutricereal for mitigating hidden hunger and provide nutritional security. *Frontiers in Plant Science*, 12, 659938. doi: [10.3389/fpls.2021.659938](https://doi.org/10.3389/fpls.2021.659938).
- Shiri, M. (2013). Grain yield stability analysis of maize (*Zea mays* L.) hybrids under different drought stress conditions using GGE biplot analysis. *Crop Breeding Journal*, 3(2), 107-112. doi: [10.22092/cbj.2012.100456](https://doi.org/10.22092/cbj.2012.100456).
- Sodhaparmar, M., Patel, M., Gami, R., Solanki, S., Prajapati, N., & R1, V. (2023). Stability analysis in pearl millet [*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.]. *Frontiers in Crop Improvement*, 11(1), 21-26.
- Temesgen, T., Keneni, G., Sefera, T., & Jarso, M. (2015). Yield stability and relationships among stability parameters in faba bean (*Vicia faba* L.) genotypes. *The Crop Journal*, 3(3), 258-268. doi: [10.1016/j.cj.2015.03.004](https://doi.org/10.1016/j.cj.2015.03.004).
- Thanh, P., & Duong, P. (2021). Economic impacts of hybrid rice varieties in Vietnam: An instrumental analysis. *Journal of Agricultural Science & Technology*, 23(6), 1195-1211. doi: [20.1001.1.16807073.2021.23.6.3.6](https://doi.org/20.1001.1.16807073.2021.23.6.3.6).
- Vadez, V., Hash, T., Bidinger, F., & Kholova, J. (2012). Phenotyping pearl millet for adaptation to drought. *Frontiers of Physiology*, 3, 1-12. doi: [10.3389/fphys.2012.00386](https://doi.org/10.3389/fphys.2012.00386).
- Yan, W. (2002). Singular-value partitioning in biplot analysis of multi-environment trial data. *Agronomy Journal*, 94(5), 990-996. doi: [10.2134/agronj2002.9900](https://doi.org/10.2134/agronj2002.9900).
- Yan, W., Du, M., Zhao, W., Li, F., Wang, X., Eneji, A. E., Yang, F., Huang, J., Meng, L., & Qi, H. (2019). Relationships between plant architecture traits and cotton yield within the plant height range of 80-120 cm desired for mechanical harvesting in the Yellow River Valley of China. *Agronomy*, 9(10), 587. doi: [10.3390/agronomy9100587](https://doi.org/10.3390/agronomy9100587).
- Yan, W., Frégeau-Reid, J. A., Pageau, D., Martin, R. A., Mitchell-Fetch, J. W., Etienne, M., Rawsell, J., Scott, P., Price, M., De Haan, B., Cumiskey, A., Lajeunesse, J., Durand, J., & Sperry, E. (2010). Identifying essential test locations for oat breeding in eastern Canada. *Crop Science*, 50(2), 504-515. doi: [10.2135/cropsci2009.03.0133](https://doi.org/10.2135/cropsci2009.03.0133).
- Yan, W., & Hunt, L. (2001). Interpretation of genotype × environment interaction for winter wheat yield in Ontario. *Crop Science*, 41(1), 19-25. doi: [10.2135/cropsci2001.41119x](https://doi.org/10.2135/cropsci2001.41119x).
- Yan, W., & Tinker, N. A. (2006). Biplot analysis of multi-environment trial data: Principles and applications. *Canadian Journal of Plant Science*, 86(3), 623-645. doi: [10.4141/P05-169](https://doi.org/10.4141/P05-169).
- Yang, M., He, J., Wan, S., Li, W., Chen, W., Wang, Y., Jiang, X., Cheng, P., Chu, P., Shen, W., & Guan, R. (2021). Fine mapping of the *BnaC04.BIL1* gene controlling plant height in *Brassica napus* L. *BMC Plant Biology*, 21(1), 359. doi: [10.1186/s12870-021-03137-9](https://doi.org/10.1186/s12870-021-03137-9).
- Zhang, P.-P., Song, H., Ke, X.-W., Jin, X.-J., Yin, L.-H., Liu, Y., Qu, Y., Su, W., Feng, N.-J., Zheng, D.-F., & Feng, B.-L. (2016). GGE biplot analysis of yield stability and test location representativeness in proso millet (*Panicum miliaceum* L.) genotypes. *Journal of Integrative Agriculture*, 15(6), 1218-1227. doi: [10.1016/S2095-3119\(15\)61157-1](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(15)61157-1).