



تجزیه پایداری عملکرد و سازگاری هیبریدهای امیدبخش سورگوم دانه‌ای (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) با استفاده از روش GGE بای پلات

Analysis of Yield Stability and Adaptability of Promising Grain Sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) Hybrids Using GGE Biplot Method

عظیم خزائی^{۱*}، فرید گل زردی^۲، علی آذری نصرآباد^۳، لیلا نظری^۴، مسعود ترابی^۵
و مهدی متقی^۶

- ۱- دانشیار، بخش تحقیقات ذرت و گیاهان علوفه‌ای، مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.
- ۲- استادیار، بخش تحقیقات ذرت و گیاهان علوفه‌ای، مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.
- ۳- استادیار، بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان خراسان جنوبی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، بیرجند، ایران.
- ۴- استادیار، بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، شیراز، ایران.
- ۵- دانشیار، بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اصفهان، ایران.
- ۶- استادیار، بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان همدان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، همدان، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۲۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۰۵

چکیده

خزائی، ع.، گل زردی، ف.، آذری نصرآباد، ع.، نظری، ل.، ترابی، م. و متقی، م. ۱۴۰۴. تجزیه پایداری عملکرد و سازگاری هیبریدهای امیدبخش سورگوم دانه‌ای (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) با استفاده از روش GGE بای پلات. نهال و بذر ۴۱: ۲۳۰-۲۰۷

این پژوهش با هدف ارزیابی عملکرد و پایداری عملکرد دانه ۱۱ هیبرید امیدبخش سورگوم دانه‌ای و رقم فومن (شاهد) در پنج ایستگاه تحقیقات کشاورزی (کرج، بیرجند، اصفهان، شیراز و همدان) در سال‌های ۱۴۰۲ و ۱۴۰۳ اجرا شد. تجزیه واریانس مرکب داده‌ها نشان داد که برهمکنش ژنوتیپ × مکان × سال بر عملکرد دانه، اجزای عملکرد و خصوصیات مورفولوژیک سورگوم معنی‌دار بود که این اهمیت آزمایش‌های چند محیطی را تأیید می‌کند. هیبریدهای KHGS5، KHGS4 و KHGS2 با تولید ۹۱۲۴، ۹۰۷۷ و ۸۸۰۴ کیلوگرم در هکتار دانه، به ترتیب بالاترین عملکرد دانه را داشتند. هیبرید KHGS5 با پایین‌ترین میانگین رتبه (۵/۲)، دارای پایداری بیشترین عملکرد دانه در محیط‌های مختلف بود و پس از آن، هیبرید KHGS4 (رتبه ۵/۴) از پایداری عملکرد دانه مناسبی برخوردار بود. برای تجزیه و تحلیل برهمکنش ژنوتیپ × محیط و شناسایی ژنوتیپ‌های با عملکرد دانه بالا و پایدار از روش GGE-Biplot استفاده شد. دو مؤلفه اول بای پلات مجموعاً حدود ۷۹/۶ درصد از تغییرات را تبیین کردند که نشان‌دهنده مناسب بودن مدل در نمایش ساختار داده‌ها بود. هیبرید KHGS4 در کمترین فاصله با ژنوتیپ ایده‌آل قرار گرفت. بر اساس نمودار چندضلعی، هیبریدهای KHGS4 و KHGS2 در همدان و کرج و هیبرید KHGS9 در اصفهان و بیرجند برتری داشتند. در مقابل، هیبرید KHGS5 با بیشترین عملکرد دانه و پایداری عملکرد بالا، برای دستیابی به عملکرد قابل اطمینان در شرایط محیطی متغیر مناسب بود. علاوه بر این، ایستگاه‌های تحقیقات کشاورزی کرج و همدان به عنوان مناطق مناسب برای گزینش هیبریدهای برتر سورگوم دانه‌ای شناسایی شدند. به طور کلی، هیبرید KHGS5 به دلیل عملکرد دانه بالا، پایداری عملکرد مطلوب و سازگاری وسیع برای کشت در اغلب مناطق مورد مطالعه (از جمله شیراز) مناسب تعیین شد. در حالی که برای همدان و کرج، هیبرید KHGS4 و برای اصفهان و بیرجند، هیبرید KHGS9 با سازگاری خصوصی قابل توصیه می‌باشند.

واژه‌های کلیدی: سورگوم دانه‌ای، آزمایش چندمحیطی، برهمکنش ژنوتیپ × محیط، سازگاری خصوصی، وزن هزار دانه.

تلفن: ۰۲۶۳۴۸۵۲۰۵۲

* نگارنده مسئول: a.khazaei@areeo.ac.ir



© 2025 Seed and Plant. This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0), which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source.

مقدمه

یکی از راهکارهای افزایش تولید در شرایط محدودیت منابع آبی، کشت گیاهان متحمل به خشکی با کارایی مصرف آب بالا است (Mirahki et al., 2023). سورگوم (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) با ویژگی‌های منحصربه‌فردی نظیر تحمل به تنش‌های خشکی و گرما، سامانه ریشه‌ای عمیق و کارآمد، و مسیر فتوسنتزی چهار کربنه، به‌عنوان یکی از مهمترین گیاهان زراعی در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان شناخته می‌شود (Tavazoh et al., 2024). معرفی ارقام پرمحصول و مقاوم این گیاه، راهکاری ضروری برای تأمین بخشی از خوراک دام و طیور در کشور به شمار می‌رود (Khazaei et al., 2019; Khazaei et al., 2022).

عملکرد نهایی یک ژنوتیپ برآیند پتانسیل ژنتیکی آن، اثر محیط و برهمکنش ژنوتیپ × محیط تعیین می‌شود (Yan and Kang, 2003; Khazaei et al., 2022). از این رو، در ارزیابی و انتخاب ارقام سازگار، در نظر گرفتن پایداری عملکرد و برهمکنش ژنوتیپ × محیط ضروری است. به طور کلی، ارقام با سازگاری وسیع در طیفی از محیط‌ها عملکردی متوسط و پایدار دارند، در حالی که ارقام با سازگاری خصوصی تنها در شرایط خاص و مطلوب به حداکثر عملکرد خود دست می‌رسند (Etaati et al., 2023; Khazaei et al., 2025).

در بین روش‌های چندمتغیره، تحلیل GGE بای‌پلات به دلیل توانایی در جداسازی اثرات اصلی ژنوتیپ (G) و برهمکنش ژنوتیپ × محیط (GE) و ارائه بای‌پلات‌های گرافیکی تفسیرپذیر، اهمیت ویژه‌ای یافته است (Yan, 2016). این روش نسبت به روش‌هایی مانند AMMI اطلاعات کامل‌تری در مورد سازگاری و پایداری عملکرد ژنوتیپ‌ها ارائه می‌دهد (Yan et al., 2007; Singh et al., 2019). کاربرد موفقیت‌آمیز GGE بای‌پلات در ارزیابی پایداری عملکرد در گیاهان مختلفی از جمله ارزن (Zhang et al., 2016)، گندم (Singh et al., 2019)، ذرت (Shojaei et al., 2022)، عدس (Ghaffar et al., 2023) و نیز در برنامه‌های به‌نژادی سورگوم (Batista et al., 2017; Enyew et al., 2021; Da Silva et al., 2021; Demelash, 2024) گزارش شده است. این روش با شناسایی محیط‌های کلان (گروه‌های محیطی همگن) و ژنوتیپ‌های برتر برای هر ناحیه، ابزاری قدرتمند برای تصمیم‌گیری در انتخاب نهایی و معرفی ارقام است (Dalló et al., 2019).

با توجه به تنوع اقلیمی کشور و اهمیت توسعه کشت گیاهان سازگار بر تن‌شهای محیطی، اجرای آزمایش‌های چندمحیطی برای شناسایی و تولید ژنوتیپ‌های با عملکرد پایدار از اهمیت بالایی برخوردار است. هدف از این پژوهش، ارزیابی برهمکنش ژنوتیپ × محیط و شناسایی

هیبریدهای سورگوم دانه‌ای با عملکرد دانه و پایداری عملکرد بالا و سازگار برای مناطق مختلف کشور با استفاده از روش GGE بای پلات بود.

مواد و روش‌ها

این پژوهش به مدت دو سال (۱۴۰۲ و ۱۴۰۳) در پنج ایستگاه تحقیقات کشاورزی شامل کرج، بیرجند، اصفهان، شیراز و همدان اجرا شد. آزمایش به صورت طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار انجام شد. هر کرت آزمایشی شامل چهار خط کشت به طول چهار متر بود. فاصله بین ردیف‌ها ۶۰ سانتی‌متر و فاصله بین بوته‌ها روی ردیف ۱۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. یازده هیبرید امیدبخش سورگوم دانه‌ای با کدهای KHGS1 تا KHGS11 و یک رقم شاهد تجاری (فومن) بودند.

هیبریدهای مورد ارزیابی حاصل برنامه دورگ‌گیری و انتخاب در بخش تحقیقات ذرت و گیاهان علوفه‌ای، مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر در کرج از سال ۱۳۹۶ تا ۱۴۰۱ بودند. اولین دورگ‌گیری‌ها برای تولید هیبریدهای سورگوم دانه‌ای در شرایط آب و هوایی ایران در سال ۱۳۹۶ در مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر در کرج انجام شد. با استفاده از لاین‌های نر عقیم (جفت لاین‌ها) و ارقام و لاین‌های نر بارور و گرده‌دهنده، تعداد زیادی هیبرید F1 ایجاد شد و سال بعد در ارزیابی مقدماتی مورد مطالعه و سنجش قرار گرفتند و هیبریدهای مناسب از لحاظ خصوصیات مطلوب زراعی برای مرحله بعد انتخاب شدند. در نهایت ۱۱ هیبرید سورگوم دانه‌ای همراه هیبرید شاهد (فومن) وارد آزمایش‌های سازگاری شدند (جدول ۱).

جدول ۱- کد و والدین هیبریدهای امیدبخش سورگوم دانه‌ای

Table 1. Code and parents of promising grain sorghum hybrids

شماره هیبرید Hybrid no.	کد هیبرید Hybrid code	والدین هیبرید Hybrid parent
1	KHGS1	♀AS9 × Fouman♂
2	KHGS2	♀AICS88005 × Sepideh♂
3	KHGS3	♀AICS11 × Sepideh♂
4	KHGS4	♀AICS84 × Sepideh♂
5	KHGS5	♀AICS11 × Kimia♂
6	KHGS6	♀A3 × Fouman♂
7	KHGS7	♀AICS84 × Kimia♂
8	KHGS8	♀A3 × Sepideh♂
9	KHGS9	♀AS9 × Kimia♂
10	KHGS10	♀F8 × Sepideh♂
11	KHGS11	♀AS9 × Sepideh♂
12	Fouman	Commercial check

کود پایه به میزان ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار فسفات دی آمونیوم و ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار اوره در زمان کاشت مصرف شد. کود سرک نیتروژن از منبع اوره به میزان ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار در مرحله ۵ تا ۶ برگی (ارتفاع گیاه ۴۰-۳۵ سانتی متری) استفاده گردید. عملیات تنک کردن پس از استقرار بوته ها برای دستیابی به تراکم مطلوب (۱۶۷ هزار بوته در هکتار) انجام شد. وجین دستی برای مدیریت و کنترل علف های هرز و آبیاری آزمایش ها با توجه به نیاز گیاه انجام شد.

به منظور ارزیابی صفات مورد مطالعه، از گیاهان واقع در دو ردیف میانی هر کرت (به استثنای نیم متر ابتدایی و انتهایی هر ردیف) در مرحله رسیدگی فیزیولوژیک نمونه برداری شد. صفات مورفولوژیک با بررسی ۱۰ بوته که به طور تصادفی در هر کرت انتخاب شدند، اندازه گیری گردیدند. ارتفاع گیاه از سطح خاک تا نوک خوشه (پانیکول) اصلی با استفاده از متر ثبت شد. قطر ساقه با استفاده از کولیس دیجیتال در میانگرمه اول بوته ها اندازه گیری شد. طول پانیکول با استفاده از خط کش از محل اتصال پایین ترین انشعاب فرعی گل آذین تا نوک خوشه (پانیکول) اندازه گیری شد.

برای تعیین عملکرد دانه، پانیکول های دو ردیف میانی هر کرت پس از مرحله رسیدگی فیزیولوژیک برداشت شدند و تا رسیدن رطوبت دانه ها به میزان استاندارد ۱۴ درصد در گرمخانه

با دمای ۴۵ درجه سانتی گراد قرار گرفتند. سپس خرمکوبی انجام شد و دانه ها پاک سازی و توزین شدند. در نهایت عملکرد دانه بر حسب کیلوگرم در هکتار با در نظر گرفتن سطح برداشت شده محاسبه گردید. برای تعیین وزن هزار دانه، ابتدا هزار عدد دانه از نمونه هر کرت با استفاده از دستگاه شمارنده جدا شد و با ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۱ گرم توزین گردید.

برای بررسی پایداری عملکرد دانه، سازگاری و برهمکنش ژنوتیپ × محیط، از روش GGE بای پلات استفاده شد. بدین منظور ماتریس داده ها شامل میانگین عملکرد دانه هر ژنوتیپ در هر یک از ده محیط تهیه و با استفاده از بسته نرم افزاری METAN در محیط R مورد تجزیه قرار گرفت. مدل آماری مورد استفاده به صورت زیر بود (Yan and Kang, 2003):

(رابطه ۱)

$$Y_{ij} - \mu - \beta_j = \lambda_1 \xi_{i1} \eta_{j1} + \lambda_2 \xi_{i2} \eta_{j2} + \varepsilon_{ij}$$

که در آن Y_{ij} میانگین عملکرد دانه ژنوتیپ i ام در محیط j ام، μ میانگین کلی، β_j میانگین اثر محیط j ام، λ_1 و λ_2 مقادیر ویژه برای مؤلفه های اصلی اول و دوم، ξ_{i1} و ξ_{i2} بردارهای ویژه ژنوتیپی (امتیازهای ژنوتیپ i ام برای مؤلفه های اصلی اول و دوم)، η_{j1} و η_{j2} بردارهای ویژه محیطی (امتیازهای محیط j ام برای مؤلفه های اصلی اول و دوم) و ε_{ij} باقیمانده مدل (مقدار باقیمانده برای ژنوتیپ i ام در

محیط ژام) هستند. از این تجزیه برای ترسیم بای‌پلات‌های میانگین در مقابل پایداری، کدام هیبرید در کجا برتر است، روابط بین محیط‌ها و رتبه‌بندی ژنوتیپ‌ها و محیط‌ها استفاده شد.

پس از اطمینان از برقراری فرض‌های تجزیه واریانس، داده‌ها با استفاده از تجزیه واریانس مرکب و با فرض ثابت بودن اثر ژنوتیپ و تصادفی بودن اثر سال و مکان، مورد تجزیه قرار گرفتند. تجزیه واریانس و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS 9.0 انجام شد. برای مقایسه میانگین‌ها از آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد استفاده گردید. برای بررسی روابط بین صفات، تجزیه به مؤلفه‌های اصلی بر اساس ماتریس همبستگی با استفاده از نرم‌افزار Minitab (نسخه ۲۲) انجام شد.

نتایج و بحث

تجزیه واریانس مرکب داده‌ها نشان داد که اثر مکان بر ارتفاع گیاه و قطر ساقه در سطح احتمال پنج درصد و بر طول پانیکول در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). برهمکنش مکان $\times$ سال بر کلیه صفات به جز طول پانیکول در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد که نشان می‌دهد پاسخ صفات به تغییرات محیطی در سال‌ها و مکان‌های مختلف یکسان نبود (جدول ۲). هیبریدهای سورگوم دانه‌ای از نظر

عملکرد دانه در سطح احتمال پنج درصد و برای سایر صفات در سطح احتمال یک درصد تفاوت معنی‌دار داشتند. برهمکنش ژنوتیپ $\times$ سال فقط بر قطر ساقه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. برهمکنش ژنوتیپ $\times$ مکان بر کلیه صفات به جز قطر ساقه معنی‌دار شد، درحالی‌که برهمکنش ژنوتیپ $\times$ مکان $\times$ سال بر کلیه صفات مورد بررسی معنی‌دار بود که دلالت بر وجود برهمکنش پیچیده ژنوتیپ $\times$ محیط و تغییرپذیری رفتاری هیبریدها در محیط‌های مختلف داشت (Khazaei et al., 2025).

مقایسه میانگین‌ها نشان داد که صفات مورد بررسی در ژنوتیپ‌های سورگوم، هیبریدهای KHGS2، KHGS4، KHGS7 و KHGS10 با میانگین‌های بیش از ۱۶۵ سانتی‌متر، بلندترین ارتفاع گیاه را داشتند، درحالی‌که کوتاه‌ترین ارتفاع گیاه (۱۰۶/۶ سانتی‌متر) در رقم فومن مشاهده شد (جدول ۳). هیبرید KHGS9 با میانگین ۱۳/۲ برگ در گیاه، از نظر تعداد برگ برتر از سایر ژنوتیپ‌ها بود، درحالی‌که کمترین تعداد برگ در گیاه (۸/۸) در رقم شاهد ثبت گردید. حداکثر قطر ساقه (۱/۹۹ سانتی‌متر) در هیبرید KHGS9 مشاهده شد، هر چند تفاوت معنی‌داری با هیبریدهای KHGS5، KHGS7 و KHGS10 نداشت، درحالی‌که کمترین قطر ساقه (۱/۵۵ سانتی‌متر) در رقم شاهد ثبت گردید (جدول ۳).

جدول ۲- تجزیه واریانس مرکب برای صفات مختلف هیبریدهای امیدبخش سورگوم دانه‌ای در دو سال و پنج مکان

Table 2. Combined analysis of variance for different traits of promising grain sorghum hybrids in two years and five locations

S.O.V.	منبع تغییرات	درجه آزادی d.f.	Mean squares					
			ارتفاع گیاه Plant height	تعداد برگ در گیاه Leaf plant ⁻¹	قطر ساقه Stem diameter	طول خوشه Panicle length	عملکرد دانه Grain yield	وزن هزار دانه Thousand-grain weight
Year (Y)	سال	1	14481.8	48.5	12.36	60.5	34099817	74.5
Location (L)	مکان	4	44476.0*	9.4	20.38*	160.7**	150737293	148.4
L × Y	مکان × سال	4	4842.6**	6.5**	2.16**	9.3	334202999**	47.8**
Error 1	خطای ۱	20	34.2	0.6	0.05	15.5	2583276	2.2
Genotype (G)	ژنوتیپ	11	12393.9**	39.3**	0.66**	196.9**	14691112*	144.2**
G × Y	ژنوتیپ × سال	11	415.7	2.2	0.24**	6.2	3718906	8.0
G × L	ژنوتیپ × مکان	44	654.1**	3.2*	0.11	29.5**	25537868**	34.6**
G × L × Y	ژنوتیپ × مکان × سال	44	221.3**	1.7**	0.09**	13.5*	6996875**	11.2**
Error 2	خطای ۲	220	112.9	1.0	0.04	8.4	1559601	4.4

* and **: Significant at the 5% and 1% probability levels, respectively.

* و **: به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد و یک درصد.

جدول ۳- مقایسه میانگین صفات مطالعه شده هیبریدهای امیدبخش سورگوم دانه‌ای

Table 3. Mean comparison of the studied traits of promising grain sorghum hybrids

هیبرید Hybrid	ارتفاع گیاه (سانتی‌متر) Plant height (cm)	تعداد برگ در گیاه Leaf plant ⁻¹	قطر ساقه (سانتی‌متر) Stem diameter (cm)	طول خوشه (سانتی‌متر) Panicle length (cm)	عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار) Grain yield (kg ha ⁻¹)	وزن هزار دانه (گرم) Thousand-grain weight (g)
KHGS1	119.5e	10.4de	1.77be	24.10f	8470ad	26.42dg
KHGS2	169.3a	11.4bc	1.61eg	30.09a	8804ac	28.16cd
KHGS3	145.6c	10.2de	1.59 fg	26.46ce	8043cd	27.22df
KHGS4	165.0a	11.6b	1.80bd	30.12a	9077ab	27.96de
KHGS5	154.3b	11.9b	1.90ab	25.93cf	9124a	29.85bc
KHGS6	126.9e	10.0e	1.64dg	24.48ef	8154bd	25.08g
KHGS7	166.5a	11.4bc	1.89ac	29.45ab	8410ad	30.58ab
KHGS8	144.3cd	10.2de	1.64dg	27.34cd	8171bd	26.03eg
KHGS9	146.9bc	13.2a	1.99a	25.55df	8356ad	27.62de
KHGS10	167.3a	11.8 b	1.91ab	27.64bd	7648d	32.13a
KHGS11	137.4d	10.8cd	1.73cf	27.73bc	8428ad	25.62fg
Fouman	106.6f	8.8f	1.55g	21.65g	6490e	25.65fg

میانگین‌هایی، در هر ستون، که دارای حداقل یک حروف مشترک می باشند، بر اساس آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند. توضیح: گروه بندی مقایسه میانگین‌ها فقط با استفاده از حروف اول و آخر خلاصه شده‌اند.

Means, in each column, followed by at least one letter in common are not significantly different at the 5% probability level using Duncan's Multiple Range test. For clarity, mean comparison letter groupings have been summarised using only the first and last letters.

هیبریدهای KHGS2، KHGS4 و KHGS7

به ترتیب با ۳۰/۰۹، ۳۰/۱۲ و ۲۹/۴۵ سانتی‌متر دارای بیشترین طول خوشه بودند، در حالی که کمترین طول خوشه (۲۱/۶۵ سانتی‌متر) در رقم شاهد ثبت شد. هیبرید KHGS10 با میانگین ۳۲/۱۳ گرم دارای بیشترین وزن هزار دانه بود، هر چند تفاوت معنی‌داری با هیبرید KHGS7 (۳۰/۵۸ گرم) نداشت، در حالی که حداقل وزن هزار دانه (۲۵/۰۸ گرم) در هیبرید KHGS6 ثبت گردید. از نظر عملکرد دانه، هیبریدهای KHGS5 (۹۱۲۴ کیلوگرم در هکتار)، KHGS4 (۸۸۰۴ کیلوگرم در هکتار) و KHGS2 (۸۸۰۴ کیلوگرم در هکتار) به ترتیب بالاترین عملکرد را داشتند، در حالی که رقم شاهد فومن با عملکرد ۶۴۹۰ کیلوگرم در هکتار، کمترین عملکرد دانه را به خود اختصاص داد (جدول ۳).

مقایسه میانگین‌های عملکرد دانه ژنوتیپ‌های سورگوم در پنج مکان (میانگین دو سال) و میانگین رتبه آنها نشان داد که هیبرید KHGS5 با پایین‌ترین میانگین رتبه (۵/۲) و پس از آن هیبرید KHGS4 با میانگین رتبه ۵/۴، از عملکرد دانه پایداری بر خوردار بودند (جدول ۴). در حالی که، رقم شاهد فومن با بالاترین میانگین رتبه (۹/۰)، ناپایدارترین و کمترین عملکرد دانه را داشت (جدول‌های ۳ و ۴). به طور کلی، هیبریدهای مورد مطالعه نسبت به رقم شاهد، از عملکرد دانه بالاتر و پایداری عملکرد بهتری در محیط‌های متنوع برخوردار بودند که نشان‌دهنده پتانسیل ژنتیکی مطلوب آنها برای

کشت در شرایط مختلف محیطی است.

در کرج بیشترین عملکرد دانه (۱۳۳۸۰ کیلوگرم در هکتار) مربوط به هیبرید KHGS4 بود، هر چند تفاوت معنی‌داری با عملکرد هیبرید KHGS2 (۱۲۶۸۰ کیلوگرم در هکتار) نداشت (جدول ۴). در اصفهان هیبریدهای KHGS9 و KHGS1 به ترتیب با عملکرد دانه ۱۰۵۸۲ و ۱۰۳۲۱ کیلوگرم در هکتار، برتری معنی‌داری نسبت به سایر ژنوتیپ‌ها نشان دادند. در شیراز هیبریدهای KHGS5 و KHGS8 به ترتیب با عملکرد دانه ۸۶۴۰ و ۸۶۵۷ کیلوگرم در هکتار، برتر بودند (جدول ۴).

در همدان، حداکثر عملکرد دانه (۱۳۵۸۸ کیلوگرم در هکتار) مربوط به هیبرید KHGS2 بود، هر چند تفاوت معنی‌داری با هیبریدهای KHGS3، KHGS4، KHGS5 و KHGS8 و KHGS11 نداشت (جدول ۴). در بیرجند نیز حداکثر عملکرد دانه (۱۱۰۳۳ کیلوگرم در هکتار) به هیبرید KHGS9 اختصاص داشت، هر چند تفاوت معنی‌داری با هیبرید KHGS1 (۸۹۲۹ کیلوگرم در هکتار) نداشت (جدول ۴). بررسی‌ها نشان داد که برتری هیبریدها کاملاً وابسته به محیط (مکان-سال) است و یک هیبرید در همه محیط‌ها برتر نبود. به عنوان مثال: هیبرید KHGS9 در اصفهان و بیرجند عملکرد دانه بالاتری داشت، در حالی که هیبرید KHGS5 در شیراز و همدان جزو برترین هیبریدها بود. این الگوی واکنش متفاوت، وجود برهمکنش ژنوتیپ × محیط قوی را که در تجزیه

واریانس مرکب نیز معنی‌دار بود (جدول ۲)، به
وضوح تأیید می‌کند و لزوم شناسایی هیبریدهای
با سازگاری خصوصی برای هر منطقه یا گروهی
از محیط‌های مشابه را مورد تأکید قرار می‌دهد.

جدول ۴- مقایسه میانگین عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار) هیبریدهای امیدبخش سورگوم دانه‌ای در
پنج مکان

Table 4. Mean comparison of the grain yield (kg ha^{-1}) of promising grain sorghum hybrids in five locations

رتبه	بیرجند	همدان	شیراز	اصفهان	کرج	هیبرید
Rank	Birjand	Hamedan	Shiraz	Isfahan	Karaj	Hybrid
6.8	8929ab	9256ce	5992bc	1032a	7850fg	KHGS1
6.4	3828e	13588a	6384b	7540d	12680a	KHGS2
6.2	4413de	12348ab	7133b	6694e	9629bd	KHGS3
5.4	6331cd	12432ab	6997b	6249f	13380a	KHGS4
5.2	8542b	12266ab	8640a	7616d	8557dg	KHGS5
7.0	8713b	10108bd	6986b	7641d	7325g	KHGS6
6.8	7219bc	10597bc	6033bc	9286b	8915cf	KHGS7
6.2	4466de	10802ac	8657a	6648e	10285bc	KHGS8
6.4	11033a	5597f	5079c	10582a	9487be	KHGS9
6.6	5503ce	7524df	6464b	8230c	10517b	KHGS10
6.0	8768b	10876ac	6408b	8024c	8066ef	KHGS11
9.0	7404bc	6838ef	7130b	5952f	5128h	Fouman

میانگین‌هایی، در هر ستون، که دارای حداقل یک حروف مشترک می‌باشند، بر اساس آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند. توضیح: گروه بندی مقایسه میانگین‌ها فقط با استفاده از حروف اول و آخر خلاصه شده‌اند.

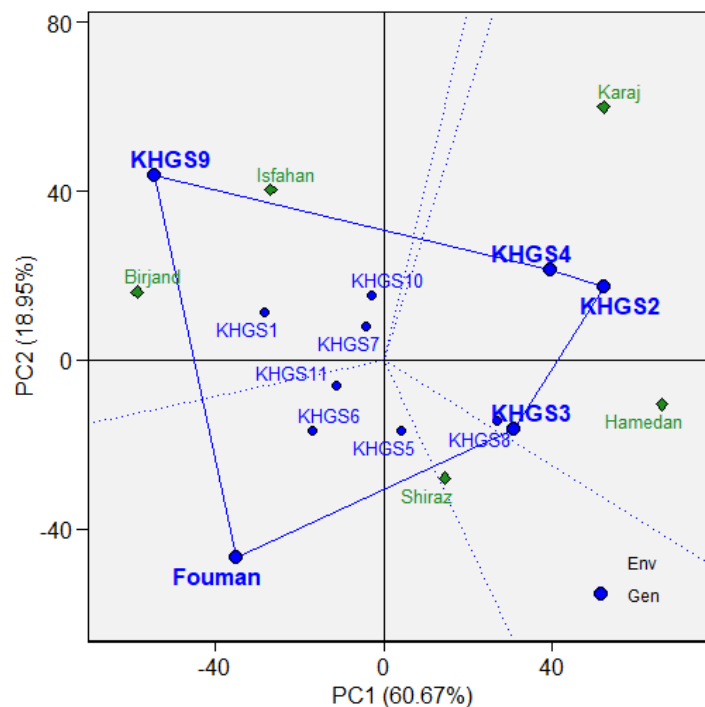
Means, in each column, followed by at least one letter in common are not significantly different at the 5% probability level using Duncan's Multiple Range test. For clarity, mean comparison letter groupings have been summarised using only the first and last letters.

به‌طور کلی، در اغلب آزمایش‌های
چندمحیطی، سهم عمده تغییرات مشاهده‌شده در
عملکرد دانه به اثر محیط اختصاص دارد، در
حالی که سهم اثر ژنوتیپ و برهمکنش ژنوتیپ ×
محیط معمولاً در مقایسه با اثر محیط کمتر است
(Yan and Kang, 2003). در مطالعه حاضر نیز
۵۴/۷ درصد از تغییرات مشاهده‌شده در عملکرد
دانه به اثر محیط اختصاص داشت، درحالی که
سهم اثر ژنوتیپ و برهمکنش ژنوتیپ × محیط
به ترتیب ۴/۵ و ۴۰/۸ درصد بود (نتایج نشان داده
نشده است). بزرگی اثر محیط بیانگر ناهمگنی
قابل توجه بین محیط‌های آزمایشی بوده و این
تفاوت‌ها عمدتاً ناشی از تفاوت دمای هوا و خاک،
دامنه نوسان دمای شب و روز، مقدار و توزیع
بارندگی در طول فصل رویش گیاه، ویژگی‌های
فیزیکی و شیمیایی خاک از جمله pH، همچنین
تفاوت در عرض و طول جغرافیایی و ارتفاع از
سطح دریا در مناطق مورد بررسی است.
از سوی دیگر، تغییرات سالانه و نوسانات
شرایط آب‌وهوایی به‌عنوان بخشی از عوامل
محیطی، نقش مهمی در بروز برهمکنش ژنوتیپ
× محیط ایفا می‌کنند. در چنین شرایطی،

شرایط محیطی هدف، از روش GGE-Biplot استفاده شد. این مدل قادر است الگوی غالب در داده‌ها را جدا کرده و هم ژنوتیپ‌های برتر و هم محیط‌های متمایزکننده را به صورت بصری نمایش دهد. دو مؤلفه اصلی اول (PC1 و PC2) در مجموع ۷۹/۶۲ درصد (مؤلفه اول ۶۰/۶۷ درصد و مؤلفه دوم ۱۸/۹۵ درصد) از تغییرات کل داده‌های مربوط به اثر ژنوتیپ و برهمکنش ژنوتیپ × محیط را توجیه کردند (شکل ۱)، که بیانگر کفایت و مناسبت بای پلات برای توصیف الگوی برهمکنش ژنوتیپ × محیط و شناسایی ژنوتیپ‌های برتر در محیط‌های مختلف است.

الگوهای عملکرد دانه ژنوتیپ‌ها در محیط‌های مختلف لزوماً در سال‌های گوناگون تکرارپذیر نیستند. بنابراین، ارزیابی ژنوتیپ‌ها در چند سال و چند مکان برای شناسایی ژنوتیپ‌های با عملکرد دانه بالا، پایداری عملکرد و سازگاری گسترده یا اختصاصی امری ضروری است. نادیده گرفتن اثر معنی‌دار برهمکنش ژنوتیپ × محیط می‌تواند منجر به کاهش دقت گزینش ژنتیکی و کارایی برنامه‌های بهنژادی شود.

بر این اساس، به منظور تجزیه و تحلیل جامع برهمکنش ژنوتیپ × محیط و شناسایی هیبریدهای با عملکرد برتر و پایدار و سازگار به



شکل ۱- نمودار چند ضلعی GGE بای پلات بر اساس عملکرد دانه ژنوتیپ‌های سورگوم دانه‌ای در پنج مکان (میانگین سال‌های ۱۴۰۲ و ۱۴۰۳)

Fig. 1. Polygon view of the GGE-biplot based on grain yield of grain sorghum genotypes in five locations (Mean of 2023 and 2024 growing seasons)

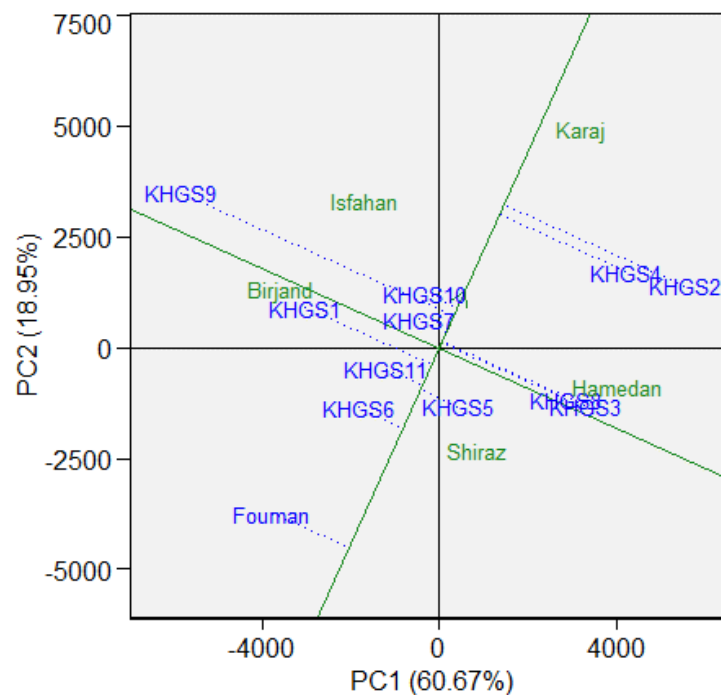
برای شناسایی هیبریدهای دارای بیشترین عملکرد دانه در هر ناحیه خاص از محیط‌ها، نمودار چندضلعی GGE-Biplot با اتصال ژنوتیپ‌هایی که بیشترین فاصله را از مبدأ بای‌پلات دارند (شامل هیبریدهای KHGS2، KHGS3، KHGS4 و KHGS9 و رقم فومن) رسم شد (شکل ۱). هیبریدهایی که در رأس‌های چندضلعی قرار گرفتند بیشترین حساسیت و پاسخ به تغییرات محیطی را نشان دادند، درحالی‌که سایر هیبریدها که در نزدیکی مبدأ قرار گرفتند، سهم کمتری در ایجاد برهمکنش ژنوتیپ $\times$ محیط داشتند (Yan and Kang, 2003). سپس از مبدأ مختصات، بر هر یک از اضلاع چندضلعی خطوط عمود ترسیم می‌شود که فضا را به چند بخش یا محیط کلان (Mega-environment) تقسیم می‌کند و هیبریدهای واقع در رأس هر بخش، بهترین ژنوتیپ برای محیط‌های قرارگرفته در همان بخش محسوب می‌شوند (Yan et al., 2000).

بر این اساس، هیبریدهای KHGS4، KHGS2 و KHGS3 در کرج و همدان برتری داشتند و در این مناطق دارای بیشترین سازگاری بودند (شکل ۱). هیبرید KHGS9 نیز به‌عنوان برترین ژنوتیپ در مناطق اصفهان و بیرجند شناخته شد. رقم فومن اگرچه یکی از رأس‌های چندضلعی را تشکیل داد، اما هیچ‌یک از محیط‌های آزمایشی در بخش متناظر با آن قرار نگرفتند (شکل ۱). این موضوع نشان می‌دهد که رقم شاهد در هیچ‌یک از مناطق مورد مطالعه

دارای عملکرد برتر نبود و از نظر سازگاری اختصاصی نسبت به هیبریدهای جدید، مزیت رقابتی قابل توجهی نداشت. این یافته‌ها اهمیت راهبرد سازگاری خصوصی و توصیه منطقه‌ای هیبریدها را در برنامه‌های بهنژادی و توسعه کشت ارقام سورگوم دانه‌ای برجسته می‌کند و نشان می‌دهد که انتخاب ژنوتیپ برتر باید بر اساس شرایط محیط‌های هدف انجام شود.

برای ارزیابی همزمان عملکرد دانه و پایداری عملکرد ژنوتیپ‌ها بای‌پلات "میانگین در مقابل پایداری" ترسیم شد (شکل ۲). در این بای‌پلات، محور افقی که از مبدأ عبور می‌کند به‌عنوان محور میانگین عملکرد (Average Tester Coordinate) در نظر گرفته می‌شود. موقعیت ژنوتیپ‌ها بر روی این محور، بیانگر میانگین عملکرد آن‌ها و فاصله عمودی ژنوتیپ‌ها از این محور نشان‌دهنده میزان ناپایداری آن‌ها است، به‌طوری‌که فاصله کمتر از محور نشان‌دهنده پایداری بیشتر ژنوتیپ است (De Figueiredo et al., 2015; Rezene, 2019). بر این اساس، هیبریدهای KHGS2 و KHGS4 بالاترین و رقم فومن کمترین میانگین عملکرد دانه را در بین ژنوتیپ‌های سورگوم دانه‌ای مورد بررسی نشان دادند. از نظر پایداری عملکرد دانه، هیبریدهای KHGS5، KHGS6، KHGS7، KHGS10 و KHGS11 به محور میانگین عملکرد نزدیک‌تر بودند و بنابراین عملکرد دانه آنها واکنش متعادل‌تر و پایدارتری نسبت به تغییرات محیطی نشان داد. در مقابل،

هیبریدهای KHGS9 و KHGS2، پایداری عملکردی کمتری داشتند (شکل ۲).



شکل ۲- مقایسه ژنوتیپ‌های سورگوم دانه‌ای بر اساس میانگین عملکرد دانه و پایداری عملکرد (میانگین سال‌های ۱۴۰۲ و ۱۴۰۳)

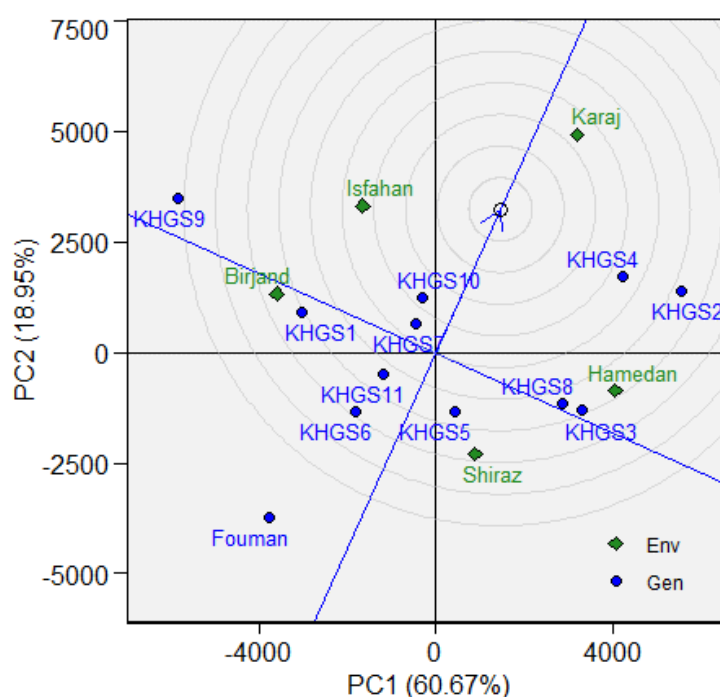
Fig. 2. Comparison of sorghum genotypes based on mean grain yield and yield stability (Mean of 2023 and 2024 growing seasons)

این نشان دهنده رابطه میان عملکرد دانه بالا و پایداری آن است که در برنامه‌های بهنژادی باید به‌طور هم‌زمان مدنظر قرار گیرد (Khazaei et al., 2023a). رقم فومن در مقایسه با برخی هیبریدهای امیدبخش جدید، از نظر عملکرد دانه و سازگاری محیطی برتری نداشت و در مجموعه محیط‌های مورد بررسی، عملکرد پایین‌تری داشت. چنین یافته‌ای اهمیت استفاده از ژنوتیپ‌های جدید و و برتر را در برنامه‌های بهنژادی و توسعه کشت سورگوم دانه‌ای تقویت می‌کند.

هیبریدهای KHGS4 و KHGS2 با وجود عملکرد دانه بالا، پایداری عملکرد کمتری نسبت به اکثر ژنوتیپ‌های مورد بررسی داشتند که نشان‌دهنده حساسیت بیشتر آن‌ها به تغییرات محیطی بود. این بدان معناست که این ژنوتیپ‌ها عملکرد دانه بالای خود را مدیون سازگاری خصوصی (کرج و همدان) هستند و در سایر محیط‌ها عملکرد پایین‌تری داشتند. هیبریدهای KHGS7 و KHGS11 نیز با وجود پایداری عملکرد، عملکرد دانه متوسطی داشتند (شکل ۲).

از نظر عملکرد دانه و پایداری آن معرفی می‌شوند (Yan et al., 2000). در پژوهش حاضر هیبرید KHGS4 در کمترین فاصله با ژنوتیپ ایده‌آل قرار گرفت و به عنوان برترین هیبرید شناخته شد. هیبرید KHGS9 و رقم فومن دورترین فاصله را از ژنوتیپ ایده‌آل داشتند و بنابراین در پایین‌ترین سطح مطلوبیت قرار گرفتند.

برای تعیین ژنوتیپ‌های برتر از نظر عملکرد دانه و پایداری آن، از معیار فاصله از ژنوتیپ ایده‌آل در بای‌پلات استفاده شد (شکل ۳). ژنوتیپ ایده‌آل به صورت یک نقطه فرضی با بیشترین عملکرد دانه و پایداری آن تعریف می‌شود. در این تجزیه و تحلیل، ژنوتیپ‌هایی با کمترین فاصله اقلیدسی از نقطه ایده‌آل، به عنوان برترین ژنوتیپ‌ها



شکل ۳- مقایسه ژنوتیپ‌های سورگوم دانه‌ای با ژنوتیپ ایده‌آل از نظر عملکرد دانه و پایداری عملکرد (میانگین سال‌های ۱۴۰۲ و ۱۴۰۳)

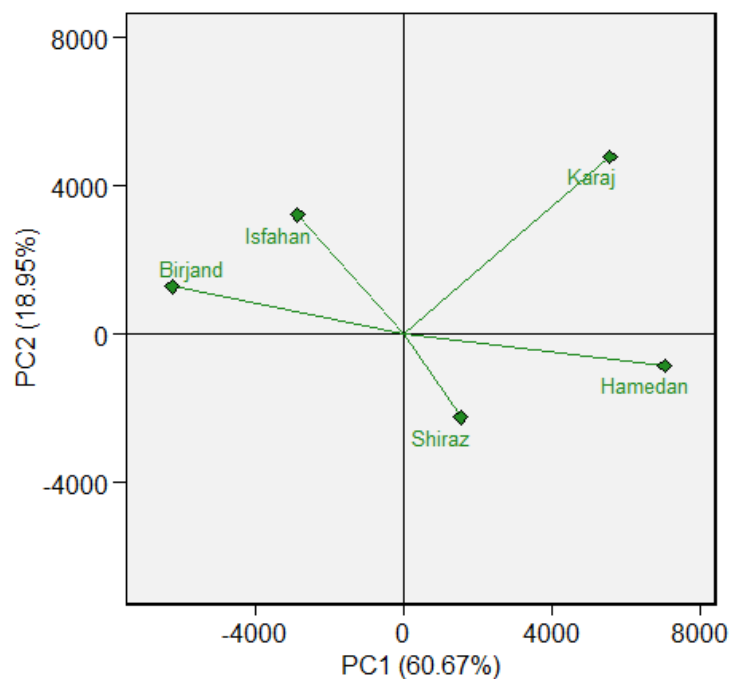
Fig. 3. Comparison of grain sorghum genotypes with the ideal genotype for grain yield and yield stability (Mean of 2023 and 2024 growing seasons)

به‌نژادی ظرفیت آن برای توصیه کشت در مناطق هدف محدودتر است. این یافته با نتایج تجزیه‌های پیشین نیز همخوانی دارد که نشان می‌دهند برتری واقعی ژنوتیپ زمانی حاصل

در مورد رقم فومن، این نتیجه اهمیت ویژه‌ای دارد، زیرا نشان می‌دهد که رقم تجاری مورد استفاده، در شبکه محیطی حاضر نتوانسته با هیبریدهای امیدبخش رقابت کند و از نظر

کردند (تشابه در رتبه‌بندی هیبریدها) و می‌توان با حذف محیط‌های تکراری، هزینه ارزیابی ژرم‌پلاسِم را کاهش و کارایی برنامه‌های بهنژادی را افزایش داد (Khazaei *et al.*, 2023b). علاوه‌براین، همبستگی منفی بین مناطق همدان و کرج با بیرجند و اصفهان مشاهده شد. این نشان می‌دهد که ژنوتیپ‌های برتر در کرج و همدان، عملکرد دانه بالایی در بیرجند و اصفهان نداشتند. این مشاهده وجود دو محیط عمده اصلی (کرج و همدان، و بیرجند و اصفهان) با الگوهای اقلیمی و مدیریتی متفاوت را تأیید می‌کند. شیراز در مقایسه با سایر محیط‌ها دارای PC2 منفی قابل توجهی بوده و با فاصله از هر دو گروه اصلی قرار گرفته است (شکل ۴).

می‌شود که عملکرد دانه بالا با پایداری مناسب همراه باشد، نه صرفاً با میانگین عملکرد بالا در یک یا دو محیط خاص (Khazaei *et al.*, 2023b). برای بررسی روابط بین محیط‌های آزمایشی، از بای‌پلات همبستگی محیط‌ها استفاده شد که در آن محیط‌ها به صورت بردارهایی از مبدأ مختصات نمایش داده می‌شوند (شکل ۴). کسینوس زاویه بین دو بردار محیطی نشان‌دهنده میزان همبستگی بین آن دو محیط است (Yan and Kang, 2003). وجود همبستگی مثبت بین برخی مکان‌ها (بیرجند با اصفهان و کرج با همدان) نشان می‌دهد که این محیط‌ها اطلاعات مشابهی در مورد عملکرد دانه ژنوتیپ‌ها فراهم



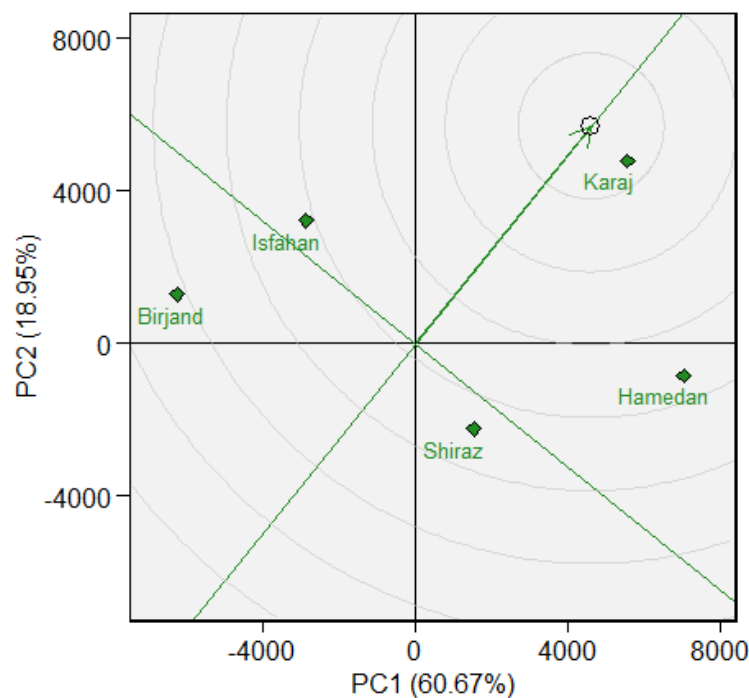
شکل ۴- بای‌پلات برای ارزیابی روابط بین محیط‌های آزمایشی (میانگین سال‌های ۱۴۰۲ و ۱۴۰۳)
Fig. 4. Biplot for examining of relationships between experimental environments (Mean of 2023 and 2024 growing seasons)

الگوی پاسخ ژنوتیپ‌ها در شیراز با الگوی سایر مناطق متفاوت بود. این موضوع نشان می‌دهد که احتمالاً فاکتورهای محیطی خاص (مانند تغییرات دما در دوره رویش گیاه، تغییرات رطوبت یا نوع خاک در شیراز) منجر به واکنش‌های اختصاصی ژنوتیپ‌ها در این منطقه شد. با توجه به این نتایج، انتخاب ژنوتیپی با سازگاری عمومی بالا برای تمامی مناطق مورد بررسی با چالش مواجه خواهد بود. بنابراین، برای بیرجند و اصفهان، ژنوتیپ‌های متحمل به تنش‌های گرمایی و خشکی و با پتانسیل عملکرد دانه بالا در شرایط تنش باید در اولویت برنامه‌های بهنژادی سورگوم دانه‌ای قرار گیرند، در حالی که برای مناطق همدان و کرج، باید بر ژنوتیپ‌هایی تمرکز کرد که در اقلیم معتدل عملکرد دانه مطلوبی داشته باشند. شیراز نیز به عنوان یک محیط متمایز در برنامه‌های بهنژادی برای شناسایی ژنوتیپ‌های با سازگاری خصوصی قابل توجه است.

طول بردار هر محیط نیز بیانگر قدرت تمایز آن محیط در تفکیک ژنوتیپ‌ها و میزان پراکنش درونی داده‌ها است (Yan and Kang, 2003). بر این اساس همدان و کرج توانایی مطلوبی در تفکیک ژنوتیپ‌ها داشتند (شکل ۴). بنابراین، این محیط‌ها به عنوان مکان‌های مناسب برای گزینش هیبریدهای برتر سورگوم دانه‌ای شناسایی شدند. در مقابل، شیراز با کوتاه‌ترین طول بردار، از قدرت تفکیک‌کنندگی محدودی

در این مجموعه آزمایشی برخوردار بود و نقش کمتری در تمایز بین ژنوتیپ‌ها ایفا کرد. برای ارزیابی قابلیت تمایز محیط‌های آزمایشی، محیط‌ها بر اساس نزدیکی به یک محیط ایده‌آل فرضی رتبه‌بندی شدند (شکل ۵). محیط ایده‌آل به عنوان محیطی با حداکثر قدرت تمایز بین ژنوتیپ‌ها و کوچکترین زاویه با میانگین بردار محیطی تعریف می‌شود (Yan et al., 2000; Khazaei et al., 2023a). نتایج نشان داد منطقه کرج کمترین فاصله را با محیط ایده‌آل داشت، که نشان‌دهنده مناسبت این محیط تمایز کارآمد بین ژنوتیپ‌های برتر و همچنین نمایندگی مناسب از الگوی کلی واکنش ژنوتیپ‌ها بود. پس از آن، محیط‌های همدان و اصفهان قرار گرفتند (شکل ۵). مقدار PC1 بالای برای همدان و کرج حاکی از پتانسیل عملکرد دانه بالا در این مناطق و همچنین قدرت تفکیک بالای آن‌ها است.

نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهد که اگر هدف از آزمایش انتخاب ژنوتیپ‌هایی با عملکرد دانه بالا برای مناطق مستعد باشد، همدان و کرج بهترین مناطق برای غربالگری و انتخاب هیبریدهای امیدبخش هستند. هر چند شیراز از نظر تمایز بین ژنوتیپ‌ها ضعیف بود، اما به دلیل زاویه متفاوت، می‌تواند برای شناسایی ژنوتیپ‌های با سازگاری خصوصی و مقاوم به تنش‌های محیطی ویژه آن مکان مفید باشد.



شکل ۵- مقایسه محیط‌های آزمایشی با محیط ایده‌آل (میانگین سال‌های ۱۴۰۲ و ۱۴۰۳)

Fig. 5. Comparison of experimental environments with the ideal environment (Mean of 2023 and 2024 growing seasons)

محیط‌های مختلف در مصر گزارش نمودند که روش GGE بای‌پلات مناسب‌ترین مدل برای ارزیابی برهمکنش ژنوتیپ × محیط بود. به طور کلی، تجزیه و تحلیل با استفاده از روش GGE بای‌پلات، نتایج به دست آمده از تجزیه واریانس مرکب داده‌ها و مقایسه میانگین‌ها را غنی‌تر و تفسیر آن‌ها را آسان‌تر ساخت. تأیید برهمکنش ژنوتیپ × محیط معنی‌دار و پیچیده در این پژوهش، با مطالعات متعدد بر روی سورگوم و دیگر غلات مطابقت دارد (Al-Naggar *et al.*, 2018; Khazaei *et al.*, 2019; Khazaei *et al.*, 2022). شناسایی محیط‌های کلان مجزا حاکی از آن است که

خزائی و همکاران (Khazaei *et al.*, 2023a) نیز با استفاده از روش GGE بای‌پلات ژنوتیپ‌های سورگوم دانه‌ای سازگار به محیط‌های مختلف را شناسایی کردند و این روش را مناسب‌ترین مدل برای ارزیابی اثرات متقابل ژنوتیپ × محیط معرفی کردند. غفار و همکاران (Ghaffar *et al.*, 2023) نیز با استفاده از روش گرافیکی GGE بای‌پلات از بین ژنوتیپ‌های عدس مورد مطالعه در هفت محیط، ژنوتیپ برتر را شناسایی کردند. آل-ناگار و همکاران (Al-Naggar *et al.*, 2018) در مقایسه روش‌های مختلف برای ارزیابی پایداری عملکرد دانه ژنوتیپ‌های مختلف سورگوم دانه‌ای در

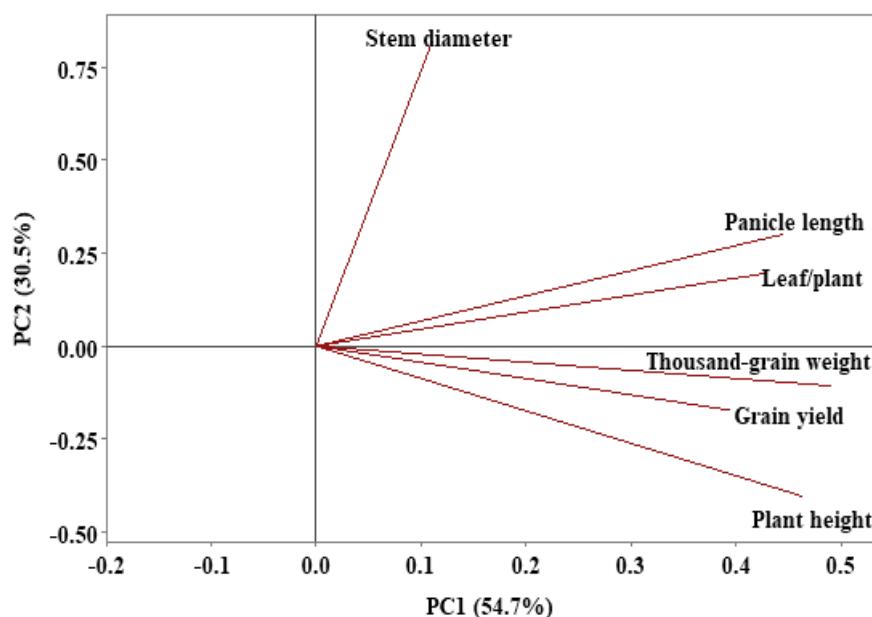
انتخاب هیبریدهای سورگوم دانه‌ای برای کشت در محیط‌های مختلف، باید بر اساس سازگاری خصوصی با منطقه هدف باشد

در پژوهش حاضر، برتری هیبرید KHGS5 از جنبه‌های مختلف (حداکثر عملکرد دانه همراه با پایداری عملکرد بالا) در مورد تأکید قرار گرفت. این هیبرید به دلیل ترکیب میانگین عملکرد دانه بالا و سازگاری عمومی (برهمکنش ژنوتیپ × محیط پایین)، به عنوان ژنوتیپی مناسب برای کشت در شرایط محیطی متغیر شناسایی شد. در حالی که، هیبریدهای KHGS2، KHGS3 و KHGS4 دارای برهمکنش قوی با محیط بودند، به طوری که در مناطق همدان و کرج عملکرد دانه بالایی داشتند، اما در سایر محیط‌ها عملکرد دانه آنها به طور قابل توجهی کاهش یافت. همچنین، هیبرید KHGS9 که در اصفهان و بیرجند عملکرد دانه بالایی داشت اما در سایر مناطق با کاهش عملکرد مواجه شد. با وجود ارزش بالای این هیبریدها در مناطق خاص، به دلیل سازگاری خصوصی، عملکرد دانه آنها در سایر مناطق به دلیل عدم سازگاری، قابل پیش‌بینی نبوده و ریسک کشت آنها را افزایش می‌دهد.

برای بررسی روابط بین صفات مورد مطالعه در هیبریدهای سورگوم دانه‌ای، تجزیه به مؤلفه‌های اصلی بر اساس ماتریس همبستگی انجام شد (شکل ۶). دو مؤلفه اصلی اول در مجموع ۸۵/۲ درصد از کل تغییرات مشاهده بین صفات مورد بررسی را توجیه کردند. ضرایب

همبستگی صفات با مؤلفه اصلی اول نشان داد که صفات عملکرد دانه (۰/۳۹۴)، وزن هزار دانه (۰/۴۹۰)، ارتفاع گیاه (۰/۴۶۲)، طول خوشه (۰/۴۴۴) و تعداد برگ در گیاه (۰/۴۲۶) دارای همبستگی مثبت و بالایی با این مؤلفه بودند. نزدیکی بردارهای این صفات در نمودار بای‌پلات (شکل ۶) بیانگر همبستگی مثبت آنها با یکدیگر است و نشان می‌دهد که انتخاب برای افزایش ارتفاع گیاه، طول خوشه، تعداد برگ در بوته و وزن هزار دانه می‌تواند به طور غیرمستقیم منجر به بهبود عملکرد دانه شود. به عبارت دیگر، به نظر می‌رسد که در ژنوتیپ‌های مورد بررسی، صفات مرتبط با افزایش سطح فتوسنتزکننده (مانند تعداد برگ و ارتفاع بوته بیشتر) با افزایش توانایی ذخیره‌سازی مواد پرورده در دانه (وزن هزار دانه) همراه بوده و در نهایت عملکرد نهایی دانه را ارتقا می‌دهند.

در مؤلفه دوم، صفت قطر ساقه با ضریب همبستگی ۰/۸۱۸ در جهت مثبت این مؤلفه قرار داشت، در حالی که عملکرد دانه در این محور دارای همبستگی پایین و منفی (۰/۱۷۲-) بود. بردار قطر ساقه تقریباً به صورت عمود بر بردارهای ارتفاع گیاه، وزن هزار دانه و عملکرد دانه قرار گرفت (شکل ۶)، که نشان‌دهنده عدم همبستگی معنی‌دار قطر ساقه با این صفات بود. بنابراین قطر ساقه و عملکرد دانه در ژنوتیپ‌های سورگوم دانه‌ای مورد بررسی با یکدیگر همبستگی معنی‌داری نداشتند و احتمالاً تحت کنترل گروه‌های ژنی متفاوتی قرار دارند.



شکل ۶- بای پلات تجزیه به مؤلفه‌های اصلی بر اساس ماتریس همبستگی صفات مورد مطالعه ژنوتیپ‌های سورگوم دانه‌ای

Fig. 6. Biplot of principal component analysis based on the correlation matrix of the studied traits of grain sorghum genotypes

مقاومت به ورس، مدنظر قرار گیرد. با تلفیق نتایج پژوهش حاضر، هیبرید KHGS5 به عنوان هیبرید برتر با عملکرد دانه بالا و پایدار برای کشت در اغلب مناطق هدف از این پژوهش پیشنهاد می‌شود. برای مناطق همدان و کرج یا مناطق با شرایط آب و هوایی مشابه آن، هیبریدهای KHGS2 و KHGS4 نیز می‌توانند گزینه‌های مناسبی باشند. برای اصفهان و بیرجند نیز هیبرید KHGS9 و برای شیراز هیبرید KHGS5 ژنوتیپ‌های سازگار و مناسبی هستند. وجود هیبریدهایی با عملکرد دانه بالاتر و پایداری در مقایسه با رقم فومن (شاهد)، نشان دهنده بهبود ژنتیکی ژرم پلاسما تولید شده در برنامه ملی

با توجه به نتایج پژوهش حاضر، در برنامه های بهنژادی سورگوم دانه‌ای در فرآیند گزینش برای دستیابی به ارقام پرمحصول، لزومی ندارد که ژنوتیپ‌های با ساقه ضخیم به عنوان ژنوتیپ‌های برتر از نظر عملکرد دانه در نظر گرفته شوند و برعکس، ژنوتیپ‌های با عملکرد بالا ممکن است ساقه‌هایی با قطر متفاوت داشته باشند. بنابراین، برای دستیابی به حداکثر عملکرد دانه، باید گزینش بر اساس افزایش مقادیر صفاتی متمرکز شود که همبستگی مثبت بالایی با مؤلفه اول دارند. از آنجایی که قطر ساقه همبستگی معنی‌داری با عملکرد دانه نشان نداد، این صفت می‌تواند در برنامه بهنژادی سورگوم دانه‌ای به صورت مستقل برای اهداف دیگر، مانند بهبود

به‌نژادی سورگوم دانه‌ای است. این یافته‌ها گامی مهم در جهت انتخاب مبتنی بر نتایج تحقیقاتی برای برنامه‌ریزی کشت هیبریدهای جدید سورگوم دانه‌ای در مناطق مختلف کشور محسوب می‌شود.

تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی نگارش شده است. نگارندگان بدین‌وسیله از پشتیبانی‌های مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر و مراکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی محل اجرای این پروژه سپاسگزاری می‌کنند.

سپاسگزاری

این مقاله با استفاده از داده‌های پروژه تحقیقاتی با کد مصوب ۰۲۰۶۶۸-۰۵۶-۰۳-۰۳-۰۱ موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر و سازمان

عدم تعارض منافع

نگارندگان اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تعارض منافع با هم و سایر اشخاص حقوقی/حقیقی ندارند.

References

- Al-Naggar, A.M.M., Abd El-Salam, R.M., Asran, M.R. and Yaseen, W. 2018. Yield adaptability and stability of grain sorghum genotypes across different environments in Egypt using AMMI and GGE-biplot models. *Annual Research & Review in Biology*, 23(3), pp.1-16. DOI: 10.9734/ARRB/2018/39491
- Batista, P.S.C., Menezes, C.B., Carvalho, A.J., Portugal, A.F., Bastos, E.A., Cardoso, M.J., Santos, C.V. and Julio, M.P.M. 2017. Performance of grain sorghum hybrids under drought stress using GGE biplot analyses. *Genetics and Molecular Research*, 16(3), pp.1-12. DOI: 10.4238/gmr16039761
- Da Silva, K.J., Teodoro, P.E., da Silva, M.J., Teodoro, L.P.R., Cardoso, M.J., Godinho, V.D.P.C., Mota, J.H., Simon, G.A., Tardin, F.D., da Silva, A.R. and Guedes, F.L. 2021. Identification of mega-environments for grain sorghum in Brazil using GGE biplot methodology. *Agronomy Journal*, 113(4), pp.3019-3030. DOI: 10.1002/agj2.20707
- Dalló, S.C., Zdziarski, A.D., Woyann, L.G., Milioli, A.S., Zanella, R., Conte, J. and Benin, G. 2019. Across year and year-by-year GGE biplot analysis to evaluate soybean performance and stability in multi-environment trials. *Euphytica*, 215, e113. DOI: 10.1007/s10681-019-2438-x
- De Figueiredo, U.J., Nunes, J.A.R., Parrella, R.D.C., Souza, E.D., da Silva, A.R., Emygdio, B.M., Machado, J.R.A. and Tardin, F.D. 2015. Adaptability and stability

- of genotypes of sweet sorghum by GGE biplot and Toler methods. *Genetics and Molecular Research*, 14(3), pp.11211-11221. DOI: 10.4238/2015.September.22.15
- Demelash, H. 2024.** Genotype by environment interaction, AMMI, GGE biplot, and mega environment analysis of elite *Sorghum bicolor* (L.) Moench genotypes in humid lowland areas of Ethiopia. *Heliyon*, 10(5), e26528. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e26528
- Enyew, M., Feyissa, T., Geleta, M., Tesfaye, K., Hammenhag, C. and Carlsson, A.S. 2021.** Genotype by environment interaction, correlation, AMMI, GGE biplot and cluster analysis for grain yield and other agronomic traits in sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench). *Plos One*, 16(10), e0258211. DOI: 10.1371/journal.pone.0258211
- Etaati, M., Ardakani, M.R., Bagheri, M., Paknejad, F. and Golzardi, F. 2023.** Grain yield adaptability and stability of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) genotypes using different stability indices. *Journal of Crop Ecophysiology*, 17(65), pp.1-14. (in Persian). DOI: 10.30495/JCEP.2023.1935024.1815
- Ghaffar, M., Asghar, M.J., Shahid, M. and Hussain, J. 2023.** Estimation of $G \times E$ Interaction of Lentil Genotypes for yield using AMMI and GGE Biplot in Pakistan. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 23(2), pp.2316-2330. DOI: 10.1007/s42729-023-01182-x
- Khazaei, A., Torabi, M., Mokhtararpour, H. and Beheshti, A.R. 2019.** Evaluation of yield stability of forage sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] genotypes using AMMI analysis. *Iranian Journal of Crop Sciences*, 21(3), pp.225-236. (in Persian).
- Khazaei, A., Torabi, M., Feyzbakhsh, M.T. and Azari Nasrabad, A. 2021.** Analysis of grain yield stability and assessment of genotype $\times$ environment interaction for grain sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) genotypes. *Iranian Journal of Crop Sciences*, 23(3), pp.211-222. (in Persian).
- Khazaei, A., Golzardi, F., Shahverdi, M., Nazari, L., Ghasemi, A., Tabatabaei, S.A., Shariati, A. and Mokhtararpour, H. 2022.** Evaluation of genotype $\times$ environment interaction for forage yield of promising forage sorghum lines (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) using AMMI model. *Journal of Crop Breeding*, 14(42), pp.177-185. (in Persian). DOI: 10.52547/jcb.14.42.177
- Khazaei, A., Golzardi, F., Torabi, M., Feyzbakhsh, M.T., Azarinasrabad, A., Nazari, L., Ghasemi, A. and Mottaghi, M. 2023a.** GGE biplot vs. AMMI analysis of promising sorghum lines in the warm-temperate regions of Iran. *Journal of Crop Improvement*, 37(4), pp.506-522. DOI: 10.1080/15427528.2022.2113488

- Khazaei, A., Golzardi, F., Ghasemi, A., Tabatabaei, S.A., Nazari, L., Shahverdi, M., Mokhtarpour, H. and Shariati, A. 2023b.** Performance and stability analysis of forage sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] genotypes targeted to arid and semi-arid environments. *Cereal Research Communications*, 51(3), pp.729-736. DOI: 10.1007/s42976-022-00339-1
- Khazaei, A., Golzardi, F., Feyzbakhsh, M.T., Shahverdi, M., Ghorbani, H.R. and Shoushi Dezfali, A.A. 2025.** Evaluation of genotype $\times$ environment interaction for forage yield and yield stability of forage sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) promising hybrids using AMMI analysis. *Seed and Plant*, 40(4), pp.575-551. DOI: 10.22092/spj.2026.370971.1445
- Mirahki, I., Ardakani, M.R., Golzardi, F., Paknejad, F., Mahrokh, A. and Faraji, S. 2023.** Yield, water use efficiency and silage feeding value of sorghum cultivars as affected by planting date and planting method. *Gesunde Pflanzen*, 75(5), pp.1963-1973. DOI: 10.1007/s10343-022-00822-z
- Rezene, Y. 2019.** GGE-Biplot analysis of multi-environment yield trials of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) in the southern Ethiopia. *Journal of Plant Studies*, 8(1), pp.1-35. DOI:10.5539/jps.v8n1p35
- Shojaei, S.H., Mostafavi, K., Bihamta, M.R., Omrani, A., Mousavi, S.M.N., Illés, Á., Bojtor, C. and Nagy, J. 2022.** Stability on maize hybrids based on GGE biplot graphical technique. *Agronomy*, 12(2), e394. DOI: 10.3390/agronomy12020394
- Singh, C., Gupta, A., Gupta, V., Kumar, P., Sendhil, R., Tyagi, B.S., Singh, G., Chatrath, R. and Singh, G.P. 2019.** Genotype $\times$ environment interaction analysis of multi-environment wheat trials in India using AMMI and GGE biplot models. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, 19(3), pp.309-318. DOI: 10.1590/1984-70332019v19n3a43
- Tavazoh, M., Habibi, D., Golzardi, F., Ilkace, M.N. and Paknejad, F. 2024.** Effect of drought stress on morpho-physiological characteristics, nutritive value, and water-use efficiency of sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] varieties under various irrigation systems. *Brazilian Journal of Biology*, 84, e286121. DOI: 10.1590/1519-6984.286121
- Yan, W., Hunt, L.A., Sheng, Q. and Szlavics, Z. 2000.** Cultivar evaluation and mega-environment investigation based on the GGE biplot. *Crop science*, 40(3), pp.597-605. DOI:10.2135/cropsci2000

- Yan, W. and Kang, M.S. 2003.** GGE Biplot Analysis: A graphical tool for breeders, geneticists, and agronomists. CRC Press. Boca Raton, Florida, USA. 288 pp. DOI: 10.1201/9781420040371
- Yan, W., Kang, M.S., Ma, B., Woods, S. and Cornelius, P.L. 2007.** GGE biplot vs. AMMI analysis of genotype-by-environment data. *Crop Science*, 47(2), pp.643-653. DOI: 10.2135/ cropsoci2006.06.0374
- Yan, W. 2016.** Analysis and handling of $G \times E$ in a practical breeding program. *Crop Science*, 56(5), pp.2106-2118. DOI: 10.2135/cropsoci2015.06.0336
- Zhang, P.P., Hui, S., Yang, L.I.U., Yang, Q.U., Wang, S.U. and ZHENG, D.F. 2016.** GGE biplot analysis of yield stability and test location representativeness in proso millet (*Panicum miliaceum* L.) genotypes. *Journal of Integrative Agriculture*, 15(6), pp.1218-1227. DOI: 10.1016/S2095-3119(15)61157-1

Analysis of Yield Stability and Adaptability of Promising Grain Sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) Hybrids Using GGE Biplot Method

A. Khazaei^{1*} , F. Golzardi² , A. Azari Nasrabad³ , L. Nazari⁴, M. Torabi⁵ and M. Mottaghi⁶

1. Associate Professor, Maize and Forage Crops Research Department, Seed and Plant Improvement Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Karaj, Iran.

2. Assistant Professor, Maize and Forage Crops Research Department, Seed and Plant Improvement Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Karaj, Iran.

3. Assistant Professor, Field and Horticultural Crops Science Research Department, South Khorasan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Birjand, Iran.

4. Assistant Professor, Field and Horticultural Crops Science Research Department, Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Shiraz, Iran.

5. Associate Professor, Field and Horticultural Crops Science Research Department, Isfahan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Isfahan, Iran.

6. Assistant Professor, Field and Horticultural Crops Science Research Department, Hamedan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Hamedan, Iran.

ABSTRACT

Khazaei, A., Golzardi, F., Azari Nasrabad, A., Nazari, L., Torabi, M. and Mottaghi, M. 2025. Analysis of yield stability and adaptability of promising grain sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) hybrids using GGE biplot method. *Seed and Plant*, 41, pp.207-230 (in Persian).

This study aimed to evaluate grain yield and yield stability of eleven promising grain sorghum hybrids (KHGS1–KHGS11) along with the check cv. Fouman using randomized complete block designs with three replications in five agricultural research field stations; Karaj, Birjand, Isfahan, Shiraz, and Hamedan in 2023 and 2024 growing seasons. Combined analysis of variance indicated that the genotype $\times$ location $\times$ year interaction had significant effect on grain yield, yield components, and morphological traits of promising grain sorghum hybrids, highlighting the importance of multi-environmental trials. Hybrids KHGS5, KHGS4, and KHGS2 had the highest grain yield with 9124, 9077, and 8804 kg ha⁻¹, respectively. GGE-biplot analysis was conducted using the first two principal components to visualize G $\times$ E patterns, identify mega-environments, discriminating sites and ideal genotypes. The first two principal components of principal component analysis explained approximately 79.6% of the total variation, indicating the adequacy and suitability of the GGE model in representing data structure. Overall, hybrid KHGS5 with high grain yield, high yield stability and wide adaptation was identified as a suitable candidate for target environments. However, hybrid KHGS4 showed specific adaptation to Hamedan and Karaj, and hybrid KHGS9 to Isfahan and Birjand.

Keywords: Grain sorghum, genotype $\times$ environment interaction, multi-environment trial, specific adaptation, thousand-grain weight.

Introduction

Grain sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) is an important cereal crop in arid and semi-arid regions due to its tolerance to heat and drought stresses (Tavazoh *et al.*, 2024). However, its productivity is strongly affected by genotype environment $\times$ (G $\times$ E) interactions (Khazaei *et al.*, 2023). Precise assessment of G $\times$ E is essential for identifying genotypes that combine high yield, yield stability with broad or specific adaptation.

Multivariate graphical approaches, notably the GGE-biplot, provide an intuitive framework for visualizing genotype main effects and G $\times$ E, facilitating identification of mega-environments, discriminating test sites, and genotypes close to the ideal genotype (Yan and Kang, 2003). Recent work on sorghum has underscored the need to evaluate newly bred hybrids across multiple agro-ecological zones to detect stable, high-yielding entries (Khazaei *et al.*, 2023; Al-Naggar *et al.*, 2018).

The present study used combined analysis of variance and GGE-biplot approaches to evaluate 11 promising grain sorghum hybrids together with a commercial check in five agricultural research field stations in Iran in two growing seasons to identify adapted, yield-stable, high-yielding hybrids, as well as to determine the most discriminative environments for selection of promising hybrids.

Materials and Methods

Eleven promising grain sorghum hybrids (KHGS1–KHGS11) together with a commercial check cv. Fouman were evaluated using randomized complete block designs with three replications agricultural research field stations; Karaj, Birjand, Isfahan, Shiraz, and Hamedan in 2023 and 2024 growing seasons. Optimal agronomic practices were applied at each site. Plots consisted of four rows of four meters length with 60 cm row spacing and 10 cm within-row plant spacing.

Grain yield and major yield components and morphological traits were measured and recorded at maturity. Combined analysis of variance across sites and years was performed to test significance of main and interactions effects. GGE-biplot analysis was conducted using the first two principal components to visualize G $\times$ E patterns, identify mega-environments, discriminating sites and ideal genotypes. The polygon, which-won-where, and mean vs. stability (ideal genotype/ATC) views were used for interpretation.

Combined analysis of variance was performed using SAS 9.0, assuming genotype as fixed and year and location as random effects. Mean comparisons were carried out using Duncan's multiple range test at the 5% probability level. Metan package in R software was used for GGE-biplot analyses. Additionally, to investigate the relationships among studied traits, principal component analysis based on the correlation matrix was performed using Minitab software version 22.

Results and Discussion

Combined analysis of variance revealed that environment and its interactions were the dominant source of variation for grain yield and most measured traits. The genotype $\times$ location $\times$ year interaction was significant, highlighting strong temporal and spatial heterogeneity in expression of yield components. Environment accounted for the largest share of variance, consistent with multi-environment sorghum studies (Khazaei *et al.*, 2023).

Mean grain yield ranked KHGS5, KHGS4 and KHGS2 as top performers, producing 9124, 9077, and 8804 kg ha⁻¹, respectively, demonstrating meaningful genetic gains relative to the check cv. Fouman. Hybrid KHGS5 had the lowest mean rank (5.2),

followed by KHGS4 (5.4), indicating high yield stability across environments. The first two GGE principal components jointly explained 79.62% of total variation, indicating a structured $G \times E$ pattern suitable for biplot interpretation.

The polygon, which-won-where, view identified three mega-environments: (i) Karaj and Hamedan, where hybrids KHGS4 and KHGS2 were superior; (ii) Isfahan and Birjand, where KHGS9 was the best performer; and (iii) Shiraz, where no single genotype occupied a vertex, but KHGS5 showed consistent adaptation. Site evaluation via biplot revealed Karaj and Hamedan as highly discriminating and representative sites for selecting broadly adapted hybrids, recommending their continued use as primary screening research field stations.

These results are in accordance with previous reports that emphasized the value of GGE biplot analysis for identifying yield-stable, high-performing grain sorghum genotypes and discriminative testing environments (Al-Naggar *et al.*, 2018; Khazaei *et al.*, 2023). The results also showed that grain yield had a positive and significant correlation with thousand-grain weight, plant height, panicle length, and number of leaves plant⁻¹, therefore, selection based on these traits can lead to improved grain yield.

Overall, hybrid KHGS5 was identified as a high-yielding and yield-stable genotype with wide adaptation for most studied target environments, including Shiraz. Hybrids KHGS4 and KHGS2 had specific adaptation to Hamedan and Karaj, and hybrid KHGS9 had specific adaptation to Isfahan and Birjand. These superior promising hybrids compared to the check cv. Fouman highlights the genetic progress achieved in the national grain sorghum breeding program of Iran.

References

- Al-Naggar, A.M.M., Abd El-Salam, R.M., Asran, M.R. and Yaseen, W. 2018. Yield adaptability and stability of grain sorghum genotypes across different environments in Egypt using AMMI and GGE-biplot models. *Annual Research & Review in Biology*, 23(3), pp.1-16. DOI: 10.9734/ARRB/2018/39491
- Khazaei, A., Golzardi, F., Torabi, M., Feyzbakhsh, M.T., Azarinasrabad, A., Nazari, L., Ghasemi, A. and Mottaghi, M. 2023. GGE biplot vs. AMMI analysis of promising sorghum lines in the warm-temperate regions of Iran. *Journal of Crop Improvement*, 37(4), pp.506-522. DOI: 10.1080/15427528.2022.2113488
- Tavazoh, M., Habibi, D., Golzardi, F., Ilkaee, M.N. and Paknejad, F. 2024. Effect of drought stress on morpho-physiological characteristics, nutritive value, and water-use efficiency of sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] varieties under various irrigation systems. *Brazilian Journal of Biology*, 84, p.e286121. DOI: 10.1590/1519-6984.286121
- Yan, W. and Kang, M.S. 2003. GGE Biplot Analysis: A graphical tool for breeders, geneticists, and agronomists. CRC Press. Boca Raton, Florida, USA. 288 pp. DOI: 10.1201/9781420040371

*Corresponding author: a.khazaei@areeo.ac.ir

Tel.: +982634852052

Received: 18 May 2025

Accepted: 27 July 2025



2025© Seed and Plant. This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0), which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source.