

ارزیابی برهمکنش ژنوتیپ × محیط بر عملکرد هیبریدهای جدید سورگوم علوفه‌ای با استفاده از روش GGE بای پلات

محمد تقی فیض بخش^{۱*}، عظیم خزایی^۲

۱. دانشیار، بخش تحقیقات زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان گلستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، گرگان، ایران

۲. دانشیار، موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۰۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۲۴

چکیده

در این تحقیق ده هیبرید سورگوم علوفه‌ای و هیبرید شاهد (اسپیدفید)، در دو منطقه کرج و گرگان به مدت دو سال زراعی ۱۴۰۲-۱۴۰۳ و ۱۴۰۱-۱۴۰۲ مورد بررسی قرار گرفتند. آزمایش در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار انجام شد. هر کرت شامل چهار خط چهار متری با فواصل ردیف ۶۰ سانتی‌متر و فواصل بوته‌ها روی خطوط کاشت، هشت سانتی‌متر بود. نتایج تجزیه واریانس مرکب داده‌ها نشان داد که اثرات ژنوتیپ، محیط و برهم‌کنش آن‌ها بر عملکرد علوفه تر و خشک معنی‌دار بود. بر اساس مدل GEI برای علوفه تر، ۶۳ درصد از تغییرات کل مربوط به مؤلفه اصلی اول و ۲۰/۱ درصد از تغییرات کل مربوط به مؤلفه اصلی دوم بود که در مجموع ۸۳/۱ درصد از تغییرات کل را توجیه کردند بر اساس تجزیه و تحلیل GEI و GGE-Biplot، محیط آزمایشی کرج در هر دو سال آزمایش از قدرت تفکیک خوبی برخوردار بود و به عنوان مکان مناسب جهت گزینش هیبریدهای برتر شناخته شد. بر اساس نتایج حاصله هیبرید KHFS10 (A2×R109) مناسب علوفه تر (سال اول و دوم به ترتیب ۱۲۹/۵ و ۱۲۶/۹ تن در هکتار) و علوفه خشک (سال اول و دوم به ترتیب ۲۵/۹ و ۲۷/۸ تن در هکتار) در گرگان و مناطق دارای اقلیم مشابه مناسب شناخته شد. هیبریدهای KHFS3 (پگاه×AICS88005) و KHFS10 (A2×R109) برای علوفه تر و هیبرید KHFS3 (پگاه×AICS88005) از نظر علوفه خشک (سال اول و دوم به ترتیب ۳۲/۴ و ۳۲/۲ تن در هکتار) در کرج مناسب شناخته شدند.

کلیدواژگان: برهمکنش ژنوتیپ × محیط، پایداری عملکرد، ژنوتیپ مطلوب، محیط کلان

مقدمه

کمبود منابع آب آبیاری در کشور طی سال‌های اخیر باعث کاهش عملکرد گیاهان زراعی و تهدید امنیت غذایی شده است و بنابراین لازم است راهکارهایی برای تولید گیاهان زراعی ضمن صرفه‌جویی در مصرف آب اندیشیده شود. یکی از راهکارهای افزایش تولید با منابع محدود آب آبیاری، کشت گیاهان زراعی متحمل به خشکی با کارایی مصرف آب بالا می‌باشد. سورگوم با ویژگی‌های منحصر به فردی که دارد (از جمله تحمل به تنش‌های محیطی به‌ویژه خشکی و گرما، سیستم ریشه‌ای عمیق و گسترده، مسیر فتوسنتزی چهارکربنه و ...) به‌عنوان یکی از گیاهان زراعی مهم در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان شناخته می‌شود. (Tavazoh et al., 2022). معرفی ارقام پرمحصول و مقاوم به خشکی این گیاه، از جمله راهکارهای ضروری برای تأمین بخشی از نیاز غذایی دام و طیور در کشور محسوب می‌شود (Kazaei et al., 2019; Feyzbakhsh, 2016). به‌طور کلی به ارقامی سازگار اطلاق می‌شود که در دامنه‌ای از محیط‌ها، ضمن داشتن عملکرد بالا، پایدار نیز باشند. ارقام با سازگاری وسیع در یک سری از محیط‌ها عملکرد متوسط و پایدار دارند. ولی ارقامی که به‌طور منحصر در شرایط مطلوب، از عملکرد بالایی برخوردارند در شرایط نامساعد، دارای عملکرد ضعیفی هستند و به‌عنوان ارقام با سازگاری محدود شناخته می‌شوند (Lin & binns, 1991).

عملکرد نهایی هر ژنوتیپ از طریق ظرفیت بالقوه (پتانسیل) آن، اثر محیط و برهمکنش ژنوتیپ و محیط تعیین می‌شود (Yan & Kang, 2003)، بر همین اساس در تعیین پایداری عملکرد، برهمکنش ژنوتیپ و محیط باید مورد توجه قرار گیرد. در بین روش‌های چندمتغیره، روش GGE بای‌پلات اهمیت ویژه‌ای دارد (Greveniotis et al., 2023). مقایسه روش‌های GGE بای‌پلات و AMMI برای ارزیابی پایداری عملکرد و سازگاری نشان داده است که روش GGE بای‌پلات کارآمدتر بوده و اطلاعات بیشتری به محققان ارائه می‌کند (Singh et al., 2019; Arif et al., 2021). سهولت و دقت در تجزیه‌ها و سادگی در تفسیر خروجی‌ها مهم‌ترین مزایای روش GGE بای‌پلات است (Yan, 2016). این روش نوعی تجزیه به مؤلفه‌های اصلی، برای اثر اصلی ژنوتیپ و برهمکنش ژنوتیپ در محیط است

که نمودارهای گرافیکی ترسیمی، تصویری از روابط بین ژنوتیپ، محیط و برهمکنش آنها را ارائه می‌کند. استفاده از روش GGE بای‌پلات برای گزینش ژنوتیپ‌های برتر گندم نان (Singh et al., 2019)، گندم دوروم (Mohammadi et al., 2023)، بادام زمینی (Khan et al., 2021)، عدس (Ghaffar et al., 2023)، ذرت (Shojaei et al., 2022)، نخود فرنگی (Tolessa et al., 2013) و باقلا (Sheikh et al., 2021a; Greveniotis et al., 2023) و سورگوم به کار رفته است (Zhang et al., 2016). گزارش شده‌است. استفاده از روش GGE بای‌پلات توسط محققان مختلف در به‌نژادی سورگوم به کار رفته است (Ganapathy et al., 2014; Gill et al., 2014; Batista et al., 2017; Enyew et al., 2021; Teodoro et al., 2016). این روش از اجزای اصلی اعمال شده بر روی اثرات ژنوتیپ به اضافه تعامل $G \times E$ برای محدود کردن محیط‌های بزرگ، شناسایی مکان‌های آزمایش و توصیه بهترین ژنوتیپ‌ها استفاده می‌کند (Dalló et al., 2019; Singh et al., 2020). شکل و الگوها در بای‌پلات نشان داده شده‌اند، از جمله همبستگی بین محیط آزمایش، بسته به بزرگی نسبی ژنوتیپ و اثرات متقابل $G \times E$ بای‌پلات‌ها هر دو ژنوتیپ و اجزای برهمکنش $G \times E$ را نشان می‌دهند که دو منبع مربوط به تنوع در ارزیابی ژنوتیپ‌ها هستند و باید به‌طور همزمان برای ارزیابی ژنوتیپی و محیطی مناسب در نظر گرفته شوند. بنابراین، شناسایی گروه‌هایی از محیط‌ها با ویژگی‌های سازگاری اقلیمی مشابه (محیط‌های کلان) و در درون آنها، مکان‌هایی با قدرت تمایز بالا، که مکان‌های ضروری نامیده می‌شوند، بسیار مهم است. هدف از مطالعه حاضر شناسایی محیط‌های بزرگ از نظر عملکرد علوفه تر و خشک سورگوم و نشان دادن این موضوع بود که روش بای‌پلات GGE می‌تواند مکان‌های ضروری برای انجام آزمایش‌ها را در هر محیط کلان شناسایی کند. با توجه به تنوع اقلیمی و تغییرات شرایط آب و هوایی، اجرای پژوهش‌های به‌نژادی، معرفی و توسعه ژنوتیپ‌های پایدار و متحمل نسبت به تنش‌های زیستی برای مناطق مختلف کشور از اهمیت بالایی برخوردار است. هدف از این تحقیق شناسایی محیط هدف برای یک هیبرید مشخص، ارزیابی برهمکنش ژنوتیپ و محیط و رتبه‌بندی هیبریدهای سورگوم علوفه‌ای بر اساس میانگین عملکرد و پایداری به‌منظور معرفی هیبرید مناسب و یا والد مناسب جهت

برنامه‌های به‌نژادی با استفاده از روش GGE بای‌پلات است.

مواد و روش‌ها

این تحقیق در دو منطقه کرج و گرگان در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار به مدت دو سال زراعی (۱۴۰۱-۱۴۰۲ و ۱۴۰۲-۱۴۰۳) انجام شد (جدول ۱). در هر سال اجرای آزمایش، عملیات اولیه تهیه زمین شامل شخم، دیسک و ماله روی قطعه زمین مورد نظر انجام شد و بر اساس آزمون خاک، نیاز کودی تعیین گردید. بذور ده هیبرید سورگوم علوفه‌ای (KHFS1)، KHFS2، KHFS3، KHFS4، KHFS5، KHFS6، KHFS7، KHFS8، KHFS10 و KHFS11) همراه با رقم شاهد (اسپیدفید) بر اساس نقشه آزمایشی در کرت‌های مربوط کشت شدند (جدول ۲). میزان کود فسفات آمونیوم ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار و ۱۰۰ کیلوگرم اوره در زمان کاشت و ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار اوره زمانی که ارتفاع بوته‌ها به ۴۰ - ۳۵ سانتی‌متر رسید، توزیع شد. هر کرت شامل ۴ خط ۴ متری با فواصل ردیف ۶۰ سانتی‌متر و فواصل بوته‌ها ۸ سانتی‌متر بود. دور آبیاری بر اساس میزان ۶۰ میلی‌متر تبخیر از سطح تشتک تبخیر کلاس A انجام شد که در شرایط کرج و گرگان به‌طور متوسط به ترتیب هر هفت و ده روز یک بار آبیاری انجام شد. بعد از برداشت چین اول هم زمان با آبیاری دوباره ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار اوره توزیع شد. در زمان برداشت جهت برآورد عملکرد دو خط وسط پس از حذف حاشیه برداشت خواهد شد. در هر سال داده‌های هر مکان به‌صورت جداگانه تجزیه شده در پایان سال دوم تمام نتایج جمع‌بندی و پس از ارزیابی یکنواختی واریانس خطاهای آزمایشی تجزیه

مرکب انجام شد. در مرحله بعد جهت تجزیه داده‌ها ابتدا آزمون نرمال بودن باقی مانده با استفاده از آزمون کولموگروف - اسمیرنوف و با استفاده از نرم‌افزار SPSS19 انجام شد. برای اطمینان از یکنواختی توزیع خطاهای آزمایشی آزمون بارتلت انجام شد. تجزیه واریانس مرکب داده‌ها با فرض ثابت بودن ژنوتیپ‌ها و تصادفی بودن اثر محیط بر اساس طرح بلوک‌های کامل تصادفی با استفاده از نرم‌افزار SAS ver 9.4 انجام شد. به منظور رسم نمودارهای بای‌پلات و تعیین ژنوتیپ‌های پرمحصول پایدار و شناسایی محیط‌های کلان، میانگین عملکرد ژنوتیپ‌ها در محیط‌های مختلف به‌صورت یک ماتریس دو طرفه تنظیم و به نرم افزار GGE بای‌پلات معرفی گردید. برای تجزیه پایداری به روش GGE بای‌پلات از مدل آماری زیر استفاده شد (Yan & Kang, 2003):

رابطه (۱)

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

Y_{ij} : میانگین اَلمین ژنوتیپ در اَلمین محیط، μ : میانگین کل، β_j : میانگین اثر محیط اَلم، λ_1 و λ_2 : مقادیر ویژه برای اولین و دومین مؤلفه، ξ_{i1} و ξ_{i2} : بردارهای ویژه ژنوتیپی، η_{j1} و η_{j2} : بردارهای محیطی مؤلفه اول و دوم و ε_{ij} : مقدار باقیمانده برای ژنوتیپ اَلم در محیط اَلم هستند.

جدول ۱- مختصات جغرافیایی و اطلاعات اقلیمی ایستگاه‌های محل اجرای آزمایش

مکان	ارتفاع از سطح دریا (متر)	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	بارندگی (میلی‌متر) ۱۴۰۱	بارندگی (میلی‌متر) ۱۴۰۲	میانگین دمای سالیانه
گرگان	۵	36°54'N	54°25'E	۳۶۹	۴۵۹	۱۸/۶
کرج	۱۳۲۱	35°47'N	50°55'E	۲۴۵	۲۵۱	۱۴/۱

جدول ۲- نام، کد، منشاء و شجره هیبریدهای سورگوم علوفه‌ای مورد ارزیابی

ردیف	کد موسسه	شجره	کد
۱	KHFS1	بهشت × AICS88005	G1
۲	KHFS2	محلی زابل × AICS88005	G2
۳	KHFS3	پگاه × AICS88005	G3
۴	KHFS4	AICS11 × Rsp	G4
۵	KHFS5	بهشت × AS9	G5
۶	KHFS6	AICS84 × Rsp	G6
۷	KHFS7	A3 × Rsp	G7
۸	KHFS8	A18×R109	G8
۹	KHFS10	A2×R109	G9
۱۰	KHFS11	F2(M)×R109	G10
۱۱	شاهد	اسپیدفید	G11

نتایج و بحث

تجزیه واریانس ساده بین محیط‌ها نشان داد که اختلاف بین هیبریدهای مورد بررسی از نظر عملکرد علوفه تر در کرج سال دوم (E2) و همچنین برای عملکرد علوفه خشک در کرج سال دوم (E2) معنی‌دار نبود (جدول ۳)، مقایسه میانگین هیبریدها در محیط‌های مختلف نشان داد که هیبریدهای KHFS3 و KHFS10 در هر دو سال اجرای آزمایش بیشترین عملکرد علوفه تر را به خود اختصاص دادند و بالاتر از شاهد G11 (اسپیدفید) قرار گرفتند. به استثنای سال اول در منطقه کرج (E1) در سایر محیط‌ها هیبریدهای KHFS3 و KHFS10 از نظر عملکرد علوفه خشک نسبت به هیبرید شاهد G11 (اسپیدفید) برتری داشتند.

آزمون بارتلت خطاهای آزمایشی برای محیط‌های مختلف ($X^2_{df=7} = 10.51^{ns}$)، فرض یکنواختی واریانس خطای آزمایشی را در بین محیط‌های مختلف تایید کرد. نتایج تجزیه واریانس مرکب بر اساس داده‌های چهار محیط برای عملکرد علوفه خشک و تر نشان داد که اثر اصلی ژنوتیپ، محیط و برهمکنش ژنوتیپ و محیط، در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بودند. این نتایج نشان‌دهنده تنوع بین ژنوتیپ‌های سورگوم بود. معنی‌دار شدن برهمکنش

ژنوتیپ و محیط نیز نشان دهنده تظاهر متفاوت ژنوتیپ‌های سورگوم در محیط‌های مختلف است. برهمکنش ژنوتیپ و محیط نشان داد که محیط بخش عمده تغییرات عملکرد علوفه هیبریدهای سورگوم را توجیه می‌کند. در پژوهش حاضر واریانس محیط ۴۷/۵ درصد، واریانس بین ژنوتیپ‌ها ۱۸/۹ درصد و برهمکنش ژنوتیپ و محیط ۱۶/۲ درصد از تغییرات کل واریانس داده‌ها برای صفت عملکرد علوفه خشک و واریانس محیط ۵۰/۵ درصد، واریانس بین ژنوتیپ‌ها ۹/۷ درصد و برهمکنش ژنوتیپ و محیط ۲۰/۲ درصد تغییرات کل واریانس داده‌ها را برای عملکرد علوفه خشک را توجیه کردند (جدول ۴). نتایج سایر تحقیقات روی سورگوم نیز نشان داده است که تغییرات محیطی بخش عمده واریانس را تشکیل می‌دهد (Batista et al., 2017; Yan et al., 2000; Demelash, 2024). به‌طور کلی در کلیه آزمایش‌های منطقه‌ای، محیط پدیده غالب در منبع تغییرات عملکرد است و اثر ژنوتیپ و برهمکنش هیبرید × محیط نسبتاً کوچک هستند (Yan & Kang, 2003). بزرگی اثر محیط نشان دهنده تنوع محیط‌ها است و این موضوع به علت تفاوت اقلیم، حداقل و حداکثر دمای هوا و خاک، تفاوت دمایی شب و روز، میزان بارندگی و پراکنش آن، اسیدیته خاک، خصوصیات خاک، طول و عرض جغرافیایی و ارتفاع از سطح دریا در محیط‌های مورد

تفاوت بین هیبریدهای سورگوم در این مطالعه از لحاظ عملکرد علوفه تر و خشک معنی‌دار بود (جدول ۳). در نتایج سایر تحقیقات نیز تنوع بالایی بین هیبریدهای سورگوم گزارش شده است (Khazaei *et al.*, 2021). تفاوت بودن عملکرد علوفه تر و خشک هیبریدهای سورگوم در محیط‌های مختلف و وجود برهمکنش ژنوتیپ $\times$ محیط نشان می‌دهد که پایداری عملکرد، سهم زیادی در عملکرد علوفه دارد و باعث جابجا شدن ترتیب جایگاه هیبریدها در محیط‌های مختلف می‌شود، بنابراین گزینش ژنوتیپ‌ها بر پایه عملکرد آن‌ها در یک مکان نمی‌تواند دقیق باشد و برای توصیه یک ژنوتیپ مناسب باید ارزیابی ژنوتیپ‌ها در چندین سال و مکان انجام شود و ژنوتیپ‌های برتر براساس پایداری عملکرد شناسایی شوند (Figueir, Sheikh 2015; Rakshit *et al.*, 2017; Rao *et al.*, 2011; *et al.*, 2022a). عدم توجه به معنی‌دار بودن برهمکنش ژنوتیپ $\times$ محیط باعث کاهش کارایی گزینش ژنتیکی و بهره‌مندی به‌نژادی می‌شود. در سال‌های اخیر پژوهشگران از روش GGE بای‌پلات برای شناسایی هیبریدهای پایدار سورگوم استفاده کرده‌اند (Rao *et al.*, 2011; 2017).

بررسی می‌باشد (جدول ۱). در آزمایش حاضر برهمکنش هیبرید $\times$ محیط و تفاوت بین عملکرد هیبریدهای سورگوم علوفه‌ای از محیطی به محیط دیگر معنی‌دار بود. با توجه به معنی‌دار بودن برهمکنش ژنوتیپ $\times$ محیط برش‌دهی انجام شد تا در هر محیط بهترین هیبریدها شناسایی شود (جدول ۳). دامنه تغییرات میانگین عملکرد علوفه تر ژنوتیپ‌های سورگوم از ۸۰ تن در هکتار برای ژنوتیپ KHFS7 در گرگان سال ۱۴۰۲ (E4) تا ۱۹۸ تن در هکتار برای ژنوتیپ KHFS10 در کرج سال ۱۴۰۲ (E2) متغیر بود (جدول ۳). کمترین و بیشترین میانگین عملکرد علوفه خشک بر اساس میانگین دو ساله در دو ایستگاه مربوط به ژنوتیپ‌های KHFS7 و KHFS3 (به ترتیب ۲۲/۷ و ۲۸/۶ تن در هکتار) بود (جدول ۳). براساس میانگین عملکرد علوفه تر، هیبریدهای KHFS6، KHFS7 و KHFS8 نسبت به هیبرید اسپیدفید (شاهد) برتری داشتند. در ایستگاه گرگان میانگین عملکرد علوفه تر و خشک کمتر از میانگین کرج بود. میانگین دمای پایین‌تر و تشعشع خورشیدی کمتر و همچنین روزهای ابری بیشتر در مراحل رشدی گیاه، دلایل احتمالی کاهش عملکرد دانه در این ایستگاه هستند (جدول ۱).

تغییر منابع	محیط اول (وزن تر)	محیط دوم (وزن تر)	محیط سوم (وزن تر)	محیط چهارم (وزن تر)	میانگین وزن تر علوفه	محیط اول (وزن خشک)	محیط دوم (وزن خشک)	محیط سوم (وزن خشک)	محیط چهارم (وزن خشک)	میانگین وزن خشک
	E1	E2	E3	E4		E1	E2	E3	E4	
میانگین مربعات ژنوتیپ	۱۰۷۸/۹۴**	۹۹۱/۹ ^{NS}	۵۶۴/۱**	۷۳۵/۵**	---	۵۴/۴۷**	۴۹/۸۹ ^{NS}	۳۰/۹۵**	۴۷/۹**	---
میانگین مربعات خطا	۱۶۷۸۵/۴	۵۶۸/۵	۵۰/۳	۷۷/۱	---	۹۸۱/۴	۳۰/۲۴	۲/۱	۳/۳۹	---
ضریب تغییرات	۱۲/۹	۱۵/۱	۶/۲	۸/۱	---	۱۶/۸	۱۵/۸	۶/۲	۸/۱	---
هیبریدهای سورگوم					---					
KHFS1	۱۳۱/۴	۱۴۳	۱۲۷/۷	۱۰۴	۱۲۶/۵	۲۶/۷	۲۹/۹	۲۶/۸	۲۲	۲۶/۳
KHFS2	۱۱۴/۳	۱۶۳/۷	۱۲۸	۱۰۶/۲	۱۲۸	۲۴/۱	۳۵/۸	۲۵/۶	۲۱/۴	۲۶/۷
KHFS3	۱۵۵/۴	۱۵۰/۳	۱۲۳	۱۱۱/۳	۱۳۵	۳۲/۶	۳۲/۲	۲۵/۹	۲۳/۷	۲۸/۶
KHFS4	۱۴۰	۱۴۹	۹۴/۵	۱۱۹/۴	۱۲۵/۷	۳۵/۹	۳۳/۱	۱۸/۹	۲۵/۴	۲۸/۳
KHFS5	۱۳۱/۴	۱۵۲/۳	۹۹	۱۱۹/۸	۱۲۵/۶	۲۵/۹	۳۳/۳	۱۹/۸	۲۴/۷	۲۵/۹
KHFS6	۹۸/۲	۱۶۳/۷	۱۰۳/۳	۸۵/۹	۱۱۲/۷	۲۳/۷	۳۷/۲	۲۰/۶	۱۶/۶	۲۴/۵
KHFS7	۱۱۱/۵	۱۲۵/۱	۹۹	۸۰/۱	۱۰۳/۹	۲۵/۸	۳۰	۱۹/۸	۱۵/۵	۲۲/۷
KHFS8	۱۰۶/۹	۱۵۵/۷	۱۱۲/۴	۱۱۹/۴	۱۲۳/۶	۲۲/۷	۳۳/۴	۲۴/۷	۲۶/۳	۲۶/۷
KHFS10	۱۵۱	۱۹۸	۱۲۹/۵	۱۲۶/۹	۱۵۱/۳	۲۹/۲	۴۱/۱	۲۵/۹	۲۷/۸	۳۱
KHFS11	۱۱۰	۱۶۰/۶	۱۲۴	۱۱۸/۴	۱۲۸/۲	۲۵/۳	۳۳/۵	۲۷/۳	۲۴/۸	۲۷/۷
شاهد	۱۳۶/۷	۱۷۰/۵	۱۰۲/۸	۹۰/۵	۱۲۵/۱	۲۳/۳	۴۲/۴	۲۱/۶	۱۹	۲۶/۵
میانگین	۱۲۶/۱	۱۵۷/۴	۱۱۳	۱۰۷/۴	۱۲۵/۹	۲۷/۷	۳۴/۷	۲۳/۴	۲۲/۵	۲۷
حداقل اختلاف معنی دار	۲۷/۸	۴۰/۶	۱۲/۰۹	۱۴/۹۶	۲۳/۸	۷/۹۵	۹/۳	۲/۵	۳/۱	۵/۷

LSD_{0.05}

[illegible]

جدول ۴- تجزیه واریانس مرکب برای عملکرد علوفه تر و علوفه خشک ژنوتیپ‌های سورگوم ارزیابی شده در چهار محیط

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات	علوفه تر درصد توجیه واریانس کل	میانگین مربعات	علوفه خشک درصد توجیه واریانس کل
محیط	۳	۱۶۵۳۳/۹۷ ^{**}	۴۷/۵	۱۰۳۴/۲ ^{**}	۵۰/۷
خطای ۱	۸	۲۱۳/۴	---	۴/۰۱	---
ژنوتیپ	۱۰	۱۶۷۹/۳ ^{**}	۱۸/۹	۵۹/۵۳ ^{**}	۹/۷
اثر متقابل	۳۰	۵۶۳/۶ ^{**}	۱۶/۲	۴۱/۲۴ ^{**}	۲۰/۲
خطای ۲	۸۰	۲۴۱/۰۱	---	۱۴/۳۸	---
کل	۱۳۱	---	---	---	---

^{ns}، *، ** به ترتیب عدم معنی‌داری و معنی‌دار در سطوح احتمال ۰/۰۵ و ۰/۰۱

عملکرد علوفه تر از پایداری عمومی بالایی برخوردار هستند.

بر اساس عملکرد علوفه خشک ۷۸/۳ درصد از تغییرات توسط دو مؤلفه اول (۵۸/۷ درصد) و دوم (۲۰/۱ درصد) توجیه شد، در چندضلعی بای‌پلات سه محیط کلان شناسایی شد، محیط کلان اول E1 (کرج ۱۴۰۱)، دوم E2 (کرج ۱۴۰۲) و محیط کلان سوم شامل محیط‌های E3 و E4 (گرگان ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲) بود. هیبریدهای KHFS4 و KHFS3 به ترتیب هیبریدهای برتر محیط کلان اول و دوم و KHFS10، ژنوتیپ برتر و KHFS1 و KHFS10 هیبریدهای سازگار با محیط کلان سوم (گرگان ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲) محسوب می‌شوند (شکل ۱-ب). بر پایه نزدیکی هیبرید KHFS5 به مبدأ بای‌پلات، به‌عنوان هیبرید با پایداری عمومی بالا به محیط‌های آزمایشی شناسایی شد. هیبریدهای KHFS2، KHFS6، KHFS7 و KHFS8 در هیچ‌یک از محیط‌های کلان قرار نگرفتند که نشان‌دهنده عدم سازگاری آن‌ها در کلیه محیط‌های آزمایشی است.

بر اساس مدل GGE (اثر ژنوتیپ + اثر متقابل ژنوتیپ × محیط (G + GE)) در تجزیه بای‌پلات ژنوتیپ‌های دارای پایداری بالا شناسایی شدند (شکل ۲ الف و ب). شکل ۲- الف رتبه‌بندی هیبریدها را بر اساس رقم ایده‌آل نشان می‌دهد. بدین منظور از مبدا مختصات خطی به نقطه میانگین‌ها وصل می‌شود و به طرفین ادامه پیدا می‌کند. هیبریدهایی که در مرکز دوایر متحدالمرکز قرار دارند، در کلیه محیط‌ها بالاترین عملکرد را داشته و مطلقاً پایدار بوده و ژنوتیپ مطلوب محسوب می‌شوند.

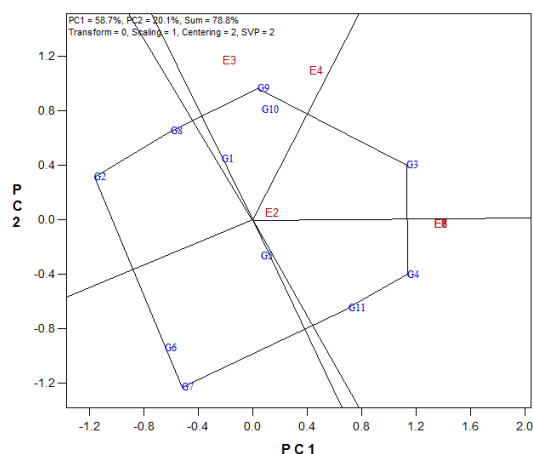
بر اساس مدل GEI، چندضلعی GGE بای‌پلات بر اساس داده‌های عملکرد علوفه تر، ۶۳ درصد از تغییرات کل مربوط به مؤلفه اصلی اول و ۲۰/۱ درصد از تغییرات کل مربوط به مؤلفه اصلی دوم بود که در مجموع ۸۳/۱ درصد از تغییرات کل را توجیه کردند (شکل ۱-الف). نمودار چندضلعی از بهم پیوستن دورترین ژنوتیپ‌ها از مبدأ بای‌پلات ایجاد می‌شود و برخی از ژنوتیپ‌ها در رأس و برخی دیگر در درون چندضلعی قرار می‌گیرند (Yan & Kang, 2003). از مبدأ روی هر ضلع چندوجهی خطی عمود می‌شود تا شکل به چند قسمت تقسیم شود دورترین ژنوتیپ‌ها از مبدأ بای‌پلات، بهترین یا ضعیف‌ترین ژنوتیپ در برخی یا تمام محیط‌ها هستند، به‌طوری که در هر بخش بهترین ژنوتیپ قرار گرفته در رأس آن بخش بهترین ژنوتیپ برای محیط‌های واقع در آن است (Yan et al., 2000). ژنوتیپ‌های KHFS3 و KHFS10 که در رأس چند ضلعی قرار دارند، به‌عنوان ژنوتیپ‌های برتر برای عملکرد علوفه تر شناخته شدند. به‌علاوه دو محیط کلان نیز شناسایی شدند. محیط کلان اول شامل سه محیط E2 (کرج ۱۴۰۲)، E3 (گرگان ۱۴۰۱) و E4 (گرگان ۱۴۰۲) بود که هیبرید KHFS10 برتر و تنها ژنوتیپ سازگار با این محیط‌ها بود (شکل ۱). این محیط کلان دوم شامل محیط E1 (کرج ۱۴۰۱)، بود و هیبریدهای KHFS3، به‌عنوان هیبرید برتر این محیط شناسایی شد. ژنوتیپ‌های KHFS1، KHFS2 و KHFS4 هیبریدهای سازگار با این محیط بودند. هیبریدهایی که نزدیک مبدأ قرار دارند به عوض شدن محیط واکنش زیادی نشان نمی‌دهند بنابراین هیبریدهای G1 برای عملکرد علوفه خشک و G3 برای

ژنوتیپ‌های باقلا نداشته و اجرای آزمایش در این محیط توصیه نمی‌شود. زاویه حاده بین محیط‌های E2، E3 و E4 نشان‌دهنده همبستگی بالا بود.

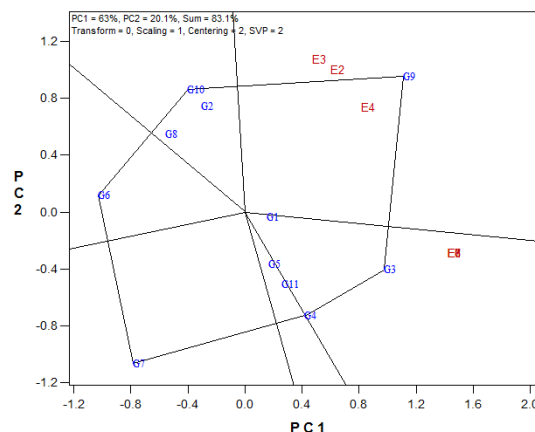
برای تعیین ژنوتیپ مطلوب دو معیار پایداری و عملکرد بالا مورد نظر هستند، بنابراین ژنوتیپی مطلوب است که دارای حداکثر عملکرد و حداکثر پایداری باشد و هر ژنوتیپی که نزدیک‌ترین فاصله را با ژنوتیپ مطلوب داشته باشد در رتبه‌های بعدی مطلوبیت قرار دارد (Yan & Kang, 2003). در پژوهش حاضر با توجه به اینکه ژنوتیپ‌های KHFS3 و KHFS10 دارای عملکرد علوفه تر و پایداری متوسط به بالا هستند و قابل توصیه برای کشت در مناطق مورد مطالعه (گرگان و کرج) هستند. ژنوتیپ‌های KHFS1، KHFS4، KHFS5 و KHFS11 در رتبه دوم قرار گرفتند. از لحاظ عملکرد علوفه خشک نیز هیبریدهای KHFS3 و KHFS4 در رتبه بالاتری نسبت به سایر هیبریدها قرار گرفتند و هیبریدهای KHFS10 و KHFS11 در جایگاه بعدی قرار گرفتند (شکل ۴).

خزایی و همکاران (۲۰۱۹) (Khazaei et al., 2019) نیز با استفاده از روش بای‌پلات ژنوتیپ‌های سورگوم علوفه‌ای سازگار به محیط‌های مختلف را شناسایی و ژنوتیپ‌های واقع در مرکز بای‌پلات را دارای اثر متقابل نزدیک به صفر و پایداری عمومی بیشتر معرفی کردند. غفار و همکاران (2023) (Ghaffar et al., 2023) نیز با استفاده از روش گرافیکی GGE بای‌پلات از بین ژنوتیپ‌های عدس مورد مطالعه در هفت محیط، ژنوتیپ G6 را به‌عنوان ژنوتیپ مطلوب با عملکرد پایدار و چهار ژنوتیپ G2، G4، G5 و G7 را به‌عنوان ژنوتیپ مطلوب معرفی کردند. آل-ناگار و همکاران (۲۰۱۸) در مقایسه روش‌های مختلف برای ارزیابی پایداری عملکرد ژنوتیپ‌های مختلف سورگوم در محیط‌های مختلف در مصر گزارش نمودند که روش GGE-Biplot مناسب‌ترین مدل برای ارزیابی اثرات متقابل ژنوتیپ × محیط است.

بنابراین، مبنای رتبه‌بندی ژنوتیپ‌ها مبتنی بر میانگین عملکرد و پایداری است (Yan et al., 2000). ژنوتیپ‌هایی که فاصله کمتری از ژنوتیپ مطلوب دارند، ژنوتیپ مطلوب با عملکرد بالا و پایدار هستند. بر اساس عملکرد علوفه سبز هیبرید KHFS10 در مرکز دواپر متحدالمرکز قرار داشته و پایدار محسوب می‌شود (شکل ۲). پس از آن ژنوتیپ KHFS3، به ژنوتیپ مطلوب نزدیک‌تر بود و در رتبه بعدی قرار داشت. بر اساس عملکرد علوفه خشک هیچ کدام از هیبریدها در مرکز دواپر متحدالمرکز قرار نگرفت و نزدیک‌ترین هیبرید به دایره مرکزی هیبرید KHFS3 بود (شکل ۲ ب). برای نشان دادن رابطه بین محیط‌های آزمایشی از نمودار بای‌پلات که در آن محیط‌ها توسط بردارهایی به مبدأ وصل می‌شوند، استفاده شد (شکل ۳ الف و ب). کوسینوس زاویه بین دو بردار محیطی به‌عنوان ضریب همبستگی بین محیط‌ها شناخته می‌شود (Yan & Kang, 2003). ارتباط مثبت نزدیک بین محیط‌های آزمایش نشان می‌دهد که اطلاعات مشابه در مورد ژنوتیپ‌ها می‌تواند از محیط‌های آزمایشی کمتری به‌دست آید، بنابراین می‌توان آزمایشات را در یکی از آن محیط‌ها انجام داد تا هزینه ارزیابی ژرم‌پلاسم کاهش و کارایی اصلاح افزایش یابد (Azon et al., 2023). در این شکل طول بردار هر محیط، نشان‌دهنده توانایی تمایز آن محیط است و انحراف معیار درونی آن محیط را نشان می‌دهد (Yan & Kang, 2003). بررسی بای‌پلات همبستگی بین محیط‌ها برای هر دو صفت عملکرد علوفه تر و خشک نشان‌دهنده قدرت تمایز بالای محیط کرج در سال ۱۴۰۱ (E1) بود (شکل ۳ الف و ب). از بین محیط‌های آزمایش، محیط کرج در سال ۱۴۰۱ توانایی بیشتری در جداسازی و تمایز بین ژنوتیپ‌ها داشته و مکان مناسبی برای گزینش هیبریدهای برتر سورگوم علوفه‌ای شناخته شد. محیط E2 (کرج ۱۴۰۲) کمترین طول بردار را داشت. بر این اساس این محیط قدرت تمایز بالایی برای

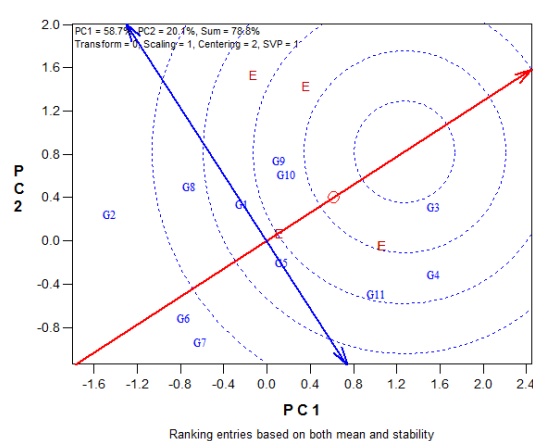


ب- علوفه خشک



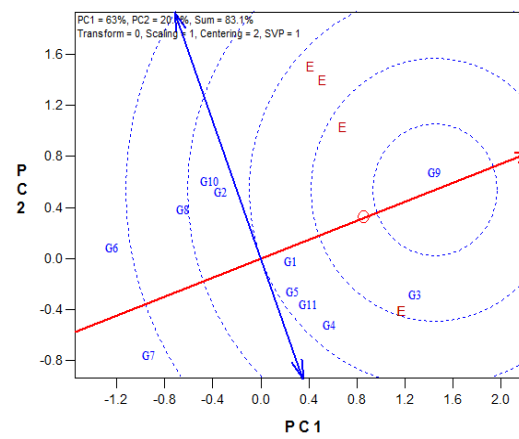
الف- علوفه تر

شکل ۱- چندضلعی GGE بای پلات بر اساس داده‌های عملکرد علوفه تر و خشک ژنوتیپ‌های سورگوم در چهار محیط شماره ژنوتیپ‌ها بر اساس جدول ۱ است و کد محیط‌ها به ترتیب E1: کرج ۱۴۰۱، E2: کرج ۱۴۰۲، E3: گرگان ۱۴۰۱، E4: گرگان ۱۴۰۲ می‌باشد.



Ranking entries based on both mean and stability

ب- علوفه خشک

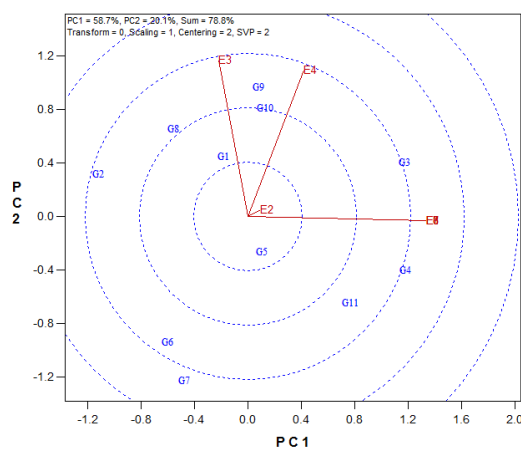


Ranking entries based on both mean and stability

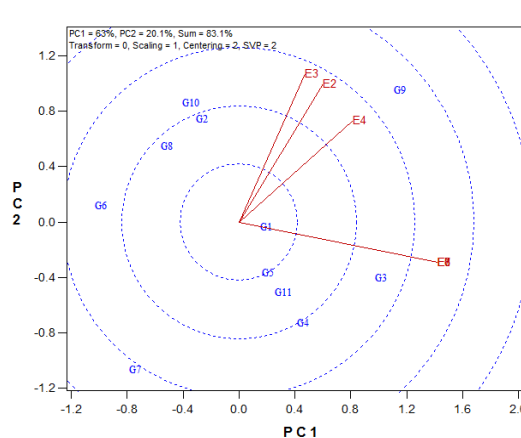
الف- علوفه تر

شکل ۲- بای پلات مقایسه ژنوتیپ‌های سورگوم با ژنوتیپ مطلوب

شماره ژنوتیپ‌ها بر اساس جدول ۱ است و کد محیط‌ها به ترتیب E1: کرج ۱۴۰۱، E2: کرج ۱۴۰۲، E3: گرگان ۱۴۰۱، E4: گرگان ۱۴۰۲ می‌باشد.



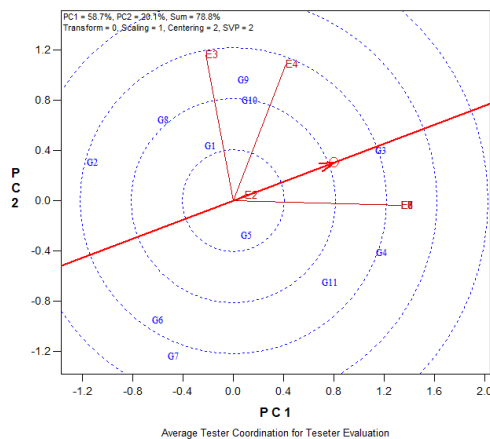
ب- علوفه خشک



الف- علوفه تر

شکل ۳- بای پلات بررسی روابط بین محیط‌های آزمایشی

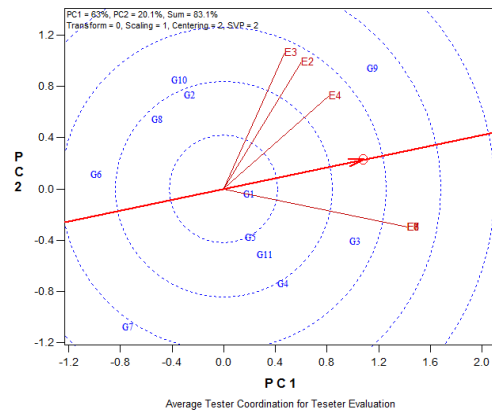
شماره ژنوتیپ‌ها همانند جدول ۱ و کد محیط‌ها به ترتیب E1: کرج ۱۴۰۱، E2: کرج ۱۴۰۲، E3: گرگان ۱۴۰۱، E4: گرگان ۱۴۰۲ می‌باشد.



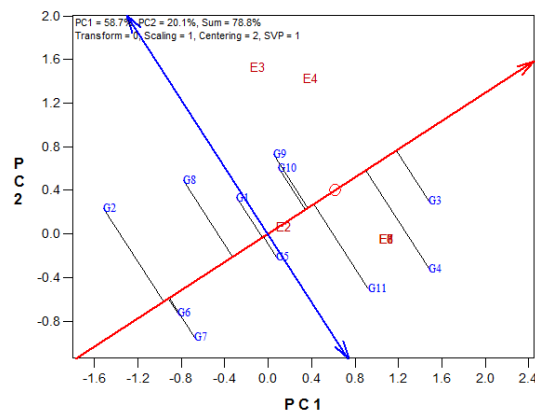
ب- علوفه خشک

شکل ۴- بای پلات برای مقایسه محیط‌های مورد مطالعه با محیط ایده‌آل

شماره ژنوتیپ‌ها همانند جدول ۱ و کد محیط‌ها به ترتیب E1: کرج ۱۴۰۱، E2: کرج ۱۴۰۲، E3: گرگان ۱۴۰۱، E4: گرگان ۱۴۰۲ می‌باشد.



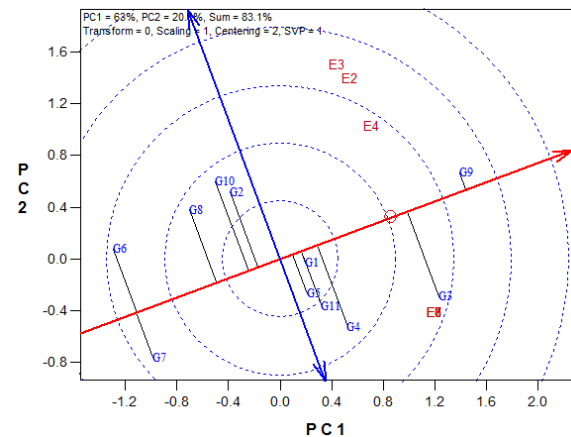
الف- علوفه تر



ب- علوفه خشک

شکل ۵- مقایسه عملکرد ژنوتیپ‌های سورگوم با ژنوتیپ مطلوب بر اساس میانگین عملکرد و پایداری

شماره ژنوتیپ‌ها همانند جدول ۱ و کد محیط‌ها به ترتیب E1: کرج ۱۴۰۱، E2: کرج ۱۴۰۲، E3: گرگان ۱۴۰۱، E4: گرگان ۱۴۰۲ می‌باشد.



الف- علوفه تر

دارای یک پیکان است که از مبدا مختصات می‌گذرد و بردار محیط متوسط (Average Tester) ATC (coordinate) نامیده می‌شود، ژنوتیپ‌هایی که سمت راست محور عمود بر این بردار قرار گرفته‌اند، عملکرد بیشتر از میانگین و ژنوتیپ‌های سمت چپ عملکرد کمتر از میانگین داشتند و تصویر ژنوتیپ‌ها روی محور ATC نشان‌دهنده پایداری عملکرد ژنوتیپ‌ها است (Temesgen *et al.*, 2015). فاصله کمتر از محور عملکرد نشانگر پایداری ژنوتیپ است (Rezene, 2019). براساس اطلاعات ارائه شده در شکل ۵ -الف هیبریدهای $G4 < G3 < G9$ و $G5 < G11 < G1$ بیشترین عملکرد و هیبریدهای $G6$ و $G7$ کمترین عملکرد علوفه تر را داشتند.

بای پلات GGE محیط‌ها را از طریق بردارهایی به مبدا بای پلات وصل می‌کند. هر محیطی که کمترین زاویه را با بردار افقی داشته باشد، به محیط مطلوب نزدیک‌تر و به‌عنوان محیط نماینده محسوب خواهد شد. بنابراین محیط‌های نزدیک به محیط مطلوب و دارای طول بردار بلندتر، توانایی تمایز و قدرت نمایندگی بیشتری دارند. بر اساس اطلاعات ارائه شده در شکل ۴-الف و ب، محیط E1 کمترین فاصله را با محیط مطلوب دارد. محیط‌های E1، E3 و E4 با داشتن طول بردار بلندتر از قدرت تمایز بالاتری نسبت به سایر محیط‌ها برخوردار بوده و می‌توان از آن‌ها برای تفکیک و تمایز ژنوتیپ‌های پایدار از ژنوتیپ‌های ناپایدار استفاده کرد. در شکل ۵ محور افقی

پایداری، از عملکرد علوفه بیشتری نیز برخوردار بودند. وجود ژنوتیپ‌های پایدار با عملکرد بالاتر از ارقام شاهد، نشان‌دهنده بهبود ژنتیکی در برنامه‌های به‌نژادی سورگوم کشور است. در آزمایش حاضر، ایستگاه کرج توانایی بیشتری در جداسازی و تمایز بین ژنوتیپ‌ها داشت و به‌عنوان مکان آزمایش مناسب برای گزینش ژنوتیپ‌های برتر شناخته شد. براساس نتایج مقایسه عملکرد علوفه و ارزیابی سازگاری، ژنوتیپ‌های سورگوم به تفکیک انتخاب شدند. هیبرید KHFS10 ($A2 \times R109$) مناسب علوفه تر و خشک برای گرگان و مناطق دارای اقلیم مشابه مناسب شناخته شد. هیبریدهای KHFS3 (پگاه $\times$ AICS88005) و KHFS10 ($A2 \times R109$) برای علوفه تر و هیبرید KHFS3 از نظر علوفه خشک در کرج مناسب شناخته شدند. این ژنوتیپ‌ها از سازگاری خصوصی بالایی برخوردار بودند. با توجه به تغییرات اقلیمی و خلا هیبرید مناسب سورگوم علوفه‌ای می‌توان این هیبریدها را جهت معرفی به کشاورزان توصیه نمود.

سپاسگزاری

نگارندگان از موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر برای تامین هزینه‌های اجرایی تحقیق در قالب پروژه پژوهشی به شماره مصوب ۰۲۰۳۸۶-۰۲۳-۰۳-۰۳، سپاسگزاری می‌کنند. همچنین از همکاران مراکز تحقیقاتی محل اجرای پروژه که در اجرای این پژوهش با مجریان همکاری و مساعدت لازم را مبذول داشتند، تشکر و قدردانی می‌شود.

هیبریدهای G1، G5 و G9 به دلیل اینکه کمترین فاصله را با محور افقی داشتند، دارای کمترین طول تصویر روی محور عمودی بوده و دارای بیشترین پایداری محسوب می‌شوند. شکل ۵-ب نشان می‌دهد که هیبریدهای $G3 < G4 < G11 < G9$ و $G10$ بیشترین عملکرد علوفه خشک و هیبریدهای G6، G7 و G2 کمترین عملکرد علوفه خشک را داشتند. هیبرید G3 دارای بیشترین پایداری از نظر عملکرد علوفه خشک محسوب می‌شود.

نتیجه‌گیری کلی

در آزمایش حاضر براساس نتایج تجزیه واریانس، محیط به ترتیب ۴۷/۵ و ۵۰/۷ درصد از مجموع مربعات تغییرات عملکرد علوفه تر و خشک را به خود اختصاص داد که نشان‌دهنده حساسیت بالای عملکرد علوفه هیبریدهای سورگوم به تغییرات محیط است. برهمکنش ژنوتیپ $\times$ محیط به ترتیب ۱۶/۲ و ۲۰/۲ درصد از کل تغییرات عملکرد علوفه تر و خشک را توجیه کردند. واکنش عملکرد علوفه تر و خشک هیبریدهای سورگوم به محیط‌های مختلف متفاوت بود. در صورتی که عوامل محیطی مانند اثر سال و تغییرات آب و هوایی باعث ایجاد برهمکنش ژنوتیپ و محیط شوند، الگوهای پیش‌بینی ژنوتیپ مختص هر محیط در همه سال‌ها تکرار پذیر نخواهد بود، بنابراین باید با انتخاب ژنوتیپ پایدار و پرمحصول، به حداکثر تولید محصول دست یافت. در این تحقیق ژنوتیپ‌های KHFS6، KHFS10، KHFS2 و KHFS4 در نمودارهای مختلف بای‌پلات، علاوه بر

منابع

- Al-Naggar, A. M. M., Abd El-Salam, R. M., Asran, M. R., & Yaseen, Y. S. (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), 1-16. <https://doi.org/10.9734/ARRB/2018/39491>
- Arif, A., Parveen, N., Waheed, M. Q., Atif, R. M., Waqar, I., & Shah, T. M. (2021). A comparative study for assessing the drought-tolerance of chickpea under varying natural growth environments. *Frontiers in Plant Science*, 11, 22-28. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.607869>
- Azon, C. F., Hotegni, V. N. F., Sogbohossou, D. E. O., Gnanglè, L. S., Bodjrenou, G., Adjé, C. O., Dossa, Bangar, S.P., & Kajla, P. (2022). Introduction: Global Status and Production of Faba Bean. In: Punia Bangar, S. and Bala Dhull, S. (Eds) Faba Bean: Chemistry, Properties and Functionality. Springer, Cham. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e21656>
- Batista, P. S. C., Menezes, C. B., Carvalho, A. J., Portugal, A. F., Bastos, E. A., Cardoso, M. J., Santos, C.V., & Julio M. P. M. (2017). Performance of grain sorghum hybrids under drought stress using GGE biplot analyses. *Genetics and Molecular Research*, 16(3), 111-135. <https://doi.org/10.4238/gmr16039761>
- Demelash, H. (2024). Genotype by environment interaction, AMMI, GGE biplot, and mega environment analysis of elite Sorghum *Sorghum bicolor* (L.) Moench genotypes in humid lowland areas of Ethiopia. *Heliyon*, 10 (2024) 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26528>
- Enyew, M., Feyissa, T., Geleta, M., Tesfaye, K., Hammenhag, C., & 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), 0258211. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0258211>
- Feyzbakhsh, M. T. (2017). Effect of plant density on some morphological traits and quantitative and qualitative yield of forage sorghum hybrids in golestan province. *Seed and plant production*, 32(2), 223-237. (In Persian). <https://doi.org/22092/SPPJ.2016.113080>
- Figueiredo, U. J., Nunesl, J. A. R., Parrella, R. A. C., Souza, E. D., Silva, A. R., Emygdio, B. M., Machado, J. R. A., & Tardin, F. D. (2015). Adaptability and stability of genotypes of sweet sorghum by GGE Biplot and Toler methods. *Genetics and Molecular Research*, 14(3), 11211-11221. <https://doi.org/10.4238/2015.September.22.15>
- Ghaffar, M., Asghar, M. J., & Shahid, M. (2023). Estimation of G × E interaction of lentil genotypes for yield using AMMI and GGE biplot in Pakistan. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 23, 2316–2330. (In Persian). <https://doi.org/10.1007/s42729-023-01182-x>
- Greveniotis, V., Bouloumpasi, E., Zotis, S., Korkovelos, A., Kantas, D., & Ipsilandis, C. G. (2023). Genotype-by-environment interaction analysis for quantity and quality traits in faba beans using AMMI, GGE models, and stability indices. *Plants*, 12, 3769. <https://doi.org/10.3390/plants12213769>
- Khan, M. M. H., Rafii, M. Y., Ramlee, S. I., Jusoh, M., & Mamun, A. M. (2021). AMMI and GGE biplot analysis for yield performance and stability assessment of selected Bambara groundnut (*Vigna subterranean* L. Verdc.) genotypes under the multi-environmental trials (METs). *Scientific Reports*, 11, 22791. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-01411-2>
- Khazaei, A., Torabi, M., Feyzbakhsh, M. T., & Azari Nasrabad, A., (2021). Analysis of grain yield stability and assessment of genotype × environment interaction for grain sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] genotypes. *Iranian Journal of Crop Sciences*, 23(3), 211-222. (In Persian). <https://doi.org/20.1001.1.15625540.1400.23.3.2.0>
- Khazaei, A., Torabi, M., Mokhtarpour, H., & Beheshti, A. R. (2019). Evaluation of yield stability of forage sorghum *Sorghum bicolor* (L.) Moench using AMMI analysis. *Iranian Journal of Crop Sciences*, 21(3), 225-236 (In Persian). <https://doi.org/10.29252/abj.21.3.225>
- Mohammadi, R., Jafarzadeh, J., Poursiahbidi, M. M., & Hatamzadeh, H. (2023). Genotype-by-environment interaction and stability analysis for grain yield in durum wheat using GGE biplot and genotypic and environmental covariates. *Agricultural Research*, 12, 364–374 (In Persian). <https://doi.org/10.1007/s40003-023-00661-y>
- Rakshit, S., Ganapathy, K. N., Gomanshe, S. S., Dhandapani, A., Swapna, M., Ehtre, S. P., & Gadakh, S. R. (2017). Analysis of Indian post-rainy sorghum multi-location trial data reveals complexity of genotype × environment interaction. *The Journal of Agricultural Science*, 155(1), 44-59. <https://doi.org/10.1017/S0021859616000137>
- Rao, P. S., Reddy, P. S., Rathore, A., & Reddy, B. V. S., (2011). Application GGE biplot and AMMI model to evaluate sweet sorghum (*Sorghum bicolor*) hybrids for genotype x environment interaction and seasonal adaptation. *Indian Journal Agricultural Sciences*, 81, 438-444.
- 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, 35. <https://doi.org/10.5539/jps.v8n1p35>

- Sheikh, F., Nazari, H., & Fanaei, H. (2022)a. Graphic analysis of trait relations and stability of faba bean genotypes using the biplot method. *Journal of Crop Production*, 15(2), 117-135 (In Persian). <https://doi.org/10.22069/ejcp.2022.19563.2457>
- Sheikh, F., Sekhavat, R., Asteraki, H., Parkasi, A., & Aghajani, M. A. (2021)a. Evaluation of seed yield stability of faba bean (*Vicia faba* L.) genotypes using GGE biplot analysis. *Journal of Crop Production and Processing*, 11(3), 85-99 (In Persian). <https://doi.org/10.47176/jcpp.11.3.36412>
- Sheikh, F., Sharifi, P., Asteraki, H., Miri, K., & Sekhavat, R. (2021)b. Evaluation stability of seed yield of faba bean (*Vicia faba* L.) genotypes by parametric and non-parametric methods. *Journal of Crop Production*, 14(3), 125-144. (In Persian). <https://doi.org/10.22069/EJCP.2022.18908.2411>
- Sheikh, F., Sekhavat, R., & Aghajani, M. (2022)b. Evaluation of resistance to leaf spot diseases and yield characteristics in faba bean genotypes through cluster analysis and Genotype by Trait Biplot. *Journal of Crop Breeding*, 14(44), 131-147 (In Persian). <https://doi.org/10.52547/jcb.14.44.131>
- Singh, C., Gupta, A., Gupta, V., Kumar, P., Sendhil, R., Tyagi, B. S. Singh, G., Chatrath, R., & Singh, G. P. (2019). Genotype×environment interaction analysis of multi-environment wheat trials in India using AMMI and GGE biplot models. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, 19, 309-318. <https://doi.org/10.1590/1984-70332019v19n3a43>
- Tavazoh, M., Habibi, D., Golzardi, F., Ilkaee, M. N., & Paknejad, F. 2022. Evaluation of yield, water productivity, and drought tolerance of forage sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] cultivars under different irrigation methods and regimes. *Cereal Research*, 12 (2), 115-133. <https://doi.org/10.22124/CR.2023.23165.1744>
- Tolessa, T., Gemechu, K., Tadesse, G., Jarso, M., & Bekele, Y. (2013). Genotype × environment interaction and performance stability for grain yield in field pea (*Pisum sativum* L.) genotypes. *International Journal of Plant Breeding*, 7, 116-123. <https://doi.org/10.1002/agj2.21268>
- Tolessa, T.T., Keneni, G., Mohammed, H., & Ahmed, S. K. (2019). Decades of faba bean (*Vicia faba* L.) breeding for better grain yield and seed size has inadvertently reduced G × E interaction and increased inter-temporal performance stability. *Journal of Crop Science and Biotechnology*, 22, 265–274. <https://doi.org/10.1007/s12892-019-0071-0>
- Yan, W. (2016). Analysis and handling of G×E in a practical breeding program. *Crop Science*, 56, 2106-2118. <https://doi.org/10.2135/cropsci2015.06.0336>
- Yan, W., & Kang, M. S. (2003). GGE biplot analysis: a graphical tool for breeders, geneticists and agronomists, CRC Press LLC., Boca Raton, Florida, USA. <https://doi.org/10.1201/9781420040371>
- Yan, W., Hunt, L. A., Sheng Q., & Szlavnic, Z. (2000). Cultivar evaluation and mega environment investigations based on the GGE biplot. *Crop Science*, 40, 597-605. <https://doi.org/10.2135/cropsci2000.403597x>

Interaction of genotype $\times$ environment on new hybrids yeild of forage sorghoum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) using GGE biplot method

Mohammad Taghi Feyzbakhsh^{1*}, Azim Khazaei²

1. Associate Professor, Field and Horticultural Crops Science Research Department, Golestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Gorgan, Iran

2. Associate Professor, Seed and Plant Improvement Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran

Received: 25-02-2025

Accepted: 14-06-2025

Abstract

In this study, ten forage sorghum hybrids and the control hybrid (Speedfeed) were evaluated in two regions, Karaj and Gorgan, over two growing seasons 2023-2024 and 2022-2023. The experiment was conducted using a randomized complete block design with three replications. Each plot consisted of 4 rows, each 4 meters long, with row spacing of 60 centimeters and plant spacing of 8 centimeters within the rows. The results of combine variance analysis showed that the effects of genotype, environment and their interaction on wet and dry forage yield and other studied traits were significantly different. According to the GEI model for wet forage, 63% and 20.1% of the total variations were described by the first and second component, respectively which totally explained 83.1% of the total variations. Based on the analysis of GEI and GGE-Biplot, the experimental environment of Karaj had a good separation power in both years of the experiment and was recognized as a suitable place for selecting superior hybrids. Based on the data, hybrid KHFS10 (A2 $\times$ R109) was suitable for wet forage (129.5- and 126.9-tons ha⁻¹ in the first and second year, respectively) and dry forage yield (25.9- and 27.8-ton ha⁻¹ in the first and second year, respectively) in Grogan and similar climates. KHFS3 (Pegah $\times$ AICS88005) and KHFS10 (A2 $\times$ R109) hybrids were suitable for wet forage and hybrid KHFS3 (Pisgah $\times$ AICS88005) for dry forage (first and second year, respectively, 32.4 and 32.2 ton. ha⁻¹) in Karaj.

Keywords Genotype $\times$ environment interaction (GEI), Ideal genotype, Mega environment, Yield stability

Citation: Feyzbakhsh, M. T., & Khazaei, A. (2025). Interaction of genotype $\times$ environment on new hybrids yeild of forage sorghoum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) using GGE biplot method. *Plant Production and Genetics*, 6(1), 87-100. <https://doi.org/10.22034/PLANT.2025.143212.1151>

Copyrights:

Copyrights rights for this article is retained by the author (s), with publication rights granted to Plant Production and Genetics. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.



*Corresponding Author Email: Feyz_54@areeo.ac.ir