



ارزیابی برهمکنش ژنوتیپ × محیط برای عملکرد و پایداری عملکرد علوفه هیبریدهای امیدبخش سورگوم علوفه‌ای (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) با استفاده از تجزیه AMMI

Evaluation of Genotype × Environment Interaction for Forage Yield and Yield Stability of Forage Sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) Promising Hybrids Using AMMI Analysis

عظیم خزائی^{۱*}، فرید گل زردی^۲، محمد تقی فیض بخش^۳، محمد شاهرودی^۴، حمیدرضا قربانی^۵ و احمدعلی شوشی دزفولی^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- دانشیار، بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان گلستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، گرگان، ایران.
- ۴- استادیار، بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان لرستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، بروجرد، ایران.
- ۵- استادیار، بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان مازندران، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ساری، ایران.
- ۶- استادیار، بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی صفا آباد، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، دزفول، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۱۰

چکیده

خزائی، ع.، گل زردی، ف.، فیض بخش، م. ت.، شاهرودی، م.، قربانی، ح. ر. و شوشی دزفولی، ا. ع. ۱۴۰۳. ارزیابی برهمکنش ژنوتیپ × محیط برای عملکرد و پایداری عملکرد علوفه هیبریدهای امیدبخش سورگوم علوفه‌ای (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) با استفاده از تجزیه AMMI. نهال و بذر ۴۰: ۵۷۵-۵۵۱

این پژوهش با هدف ارزیابی برهمکنش ژنوتیپ × محیط برای عملکرد و پایداری عملکرد علوفه‌ی یازده هیبرید امیدبخش سورگوم علوفه‌ای و رقم اسپیدفید (به عنوان شاهد) در پنج ایستگاه تحقیقات کشاورزی (کرج، بروجرد، گرگان، دزفول و ساری) در دو فصل رشد ۱۴۰۲ و ۱۴۰۳ در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. تجزیه واریانس مرکب داه‌ها نشان داد که برهمکنش ژنوتیپ × مکان × سال بر عملکرد علوفه تر و خشک در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. مقایسه میانگین‌ها نشان داد که هیبریدهای KHFS3 و KHFS10 به ترتیب با ۱۴۵/۵ و ۱۴۱/۳ تن در هکتار بیشترین عملکرد علوفه تر را داشتند. بیشترین عملکرد علوفه خشک (۳۵/۲) تن در هکتار نیز متعلق به هیبرید KHFS3 بود که ۱۲/۵ درصد نسبت به رقم شاهد (اسپید فید) برتری داشت. محیط، ژنوتیپ و برهمکنش آنها به ترتیب ۶۸/۵۷، ۹/۲۳ و ۲۲/۱۹ درصد از کل تغییرات مشاهده شده مربوط به عملکرد علوفه خشک و به ترتیب ۶۱/۴۶، ۲۰/۸۷ و ۱۷/۶۶ درصد از کل تغییرات مشاهده شده مربوط به عملکرد علوفه تر را توجیه کردند. بررسی برهمکنش ژنوتیپ × محیط با استفاده از روش تجزیه AMMI نشان داد که دو مؤلفه اصلی مدل معنی‌دار بودند و به ترتیب ۷۱/۴۰ و ۱۷/۶۱ درصد از واریانس برهمکنش را توجیه کردند. بر اساس ارزش پایداری امی (ASV) و میانگین وزنی نمرات مطلق (WAAS) هیبریدهای KHFS3 و KHFS5 به ترتیب بیشترین پایداری عملکرد علوفه خشک و تر را نشان دادند. بر اساس نتایج تجزیه گرافیکی، هیبریدهای KHFS3 و KHFS10 به ترتیب به عنوان ژنوتیپ‌های برتر برای عملکرد علوفه تر و علوفه خشک با پایداری عملکرد بالا شناسایی شدند. این هیبریدها با عملکرد علوفه و سازگاری بالا، گزینه‌های مناسبی برای کشت در اقلیم‌های هدف کشور می‌باشند و می‌توانند در برنامه‌های به‌نژادی سورگوم علوفه‌ای نیز برای بهبود عملکرد علوفه مورد استفاده قرار گیرند.

واژه‌های کلیدی: سورگوم، ارزش پایداری AMMI، عملکرد علوفه تر، عملکرد علوفه خشک، تجزیه گرافیکی.



مقدمه

بخش عمده‌ای از کشور ایران را مناطق خشک و نیمه‌خشک تشکیل می‌دهند. کمبود بارندگی و محدودیت منابع آب شیرین به عنوان اصلی‌ترین چالش پیش روی کشاورزان در این مناطق شناخته می‌شود (Feyzbakhsh *et al.*, 2016). بنابراین، به منظور بیشینه‌سازی بهره‌وری تولید محصولات زراعی با بهره‌گیری از منابع محدود آب و تأمین بخشی از نیازهای غذایی دام و طیور، توجه به کشت گیاهان زراعی پرمحصول و مقاوم به خشکی مانند سورگوم ضروری است (Gholami *et al.*, 2023). سورگوم (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) با ویژگی‌های منحصر به فرد خود، از جمله تحمل به تنش‌های محیطی به‌ویژه خشکی و گرما، سامانه ریشه عمیق و گسترده، و مسیر فتوسنتزی چهار کربنه، به عنوان یکی از گیاهان زراعی مناسب برای مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان مطرح است (Tavazoh *et al.*, 2024). تولید و معرفی ارقام پرمحصول و مقاوم به خشکی این گیاه، یکی از راهکارهای کاربردی برای تأمین بخشی از نیازهای غذایی دام و طیور و تولید پروتئین در کشور به شمار می‌رود (Feyzbakhsh, 2016; Khazaei *et al.*, 2023b).

به طور کلی، در برنامه به نژادی به رقمی سازگار گفته می‌شود که در دامنه وسیعی از محیط‌ها، علاوه بر عملکرد بالا، پایداری مناسبی نیز داشته باشد (Etaati *et al.*, 2023). ارقام با سازگاری وسیع در مجموعه‌ای از محیط‌ها عملکرد متوسط و پایداری دارند، در حالی

که ارقامی که منحصراً در شرایط مطلوب عملکرد بالایی نشان می‌دهند، در شرایط نامساعد عملکرد پایینی دارند و به عنوان ارقام با سازگاری خصوصی شناخته می‌شوند (Khazaei *et al.*, 2023b). عملکرد نهایی هر ژنوتیپ توسط ژنتیک، اثر محیط و برهمکنش ژنوتیپ × محیط تعیین می‌شود (Yan *et al.*, 2007). بر این اساس، در ارزیابی پایداری عملکرد، توجه به برهمکنش ژنوتیپ × محیط ضروری است.

در میان روش‌های چندمتغیره برای تجزیه اثر متقابل ژنوتیپ × محیط، مدل آثار اصلی افزایشی و اثر متقابل ضرب‌پذیر (Additive Main Effects and Multiplicative Interaction = AMMI) روشی کارآمد برای حذف خطا و آشکارسازی الگوی مناسب داده‌ها به شمار می‌رود (Yan *et al.*, 2007). این روش یکی از رویکردهای مناسب برای تجزیه و تحلیل آزمایش‌های سازگاری است و ترکیبی از تجزیه واریانس و تجزیه به مؤلفه‌های اصلی محسوب می‌شود (Pour-Aboughadareh *et al.*, 2022). در این روش، ابتدا با استفاده از تجزیه واریانس، آثار اصلی ژنوتیپ و محیط برآورد شده و سپس با بهره‌گیری از تجزیه به مؤلفه‌های اصلی، برهمکنش ژنوتیپ × محیط تحلیل می‌شود (Khazaei *et al.*, 2023a).

در صورتی که در تجزیه AMMI تنها مؤلفه اصلی اول معنی‌دار باشد و بیش از ۹۰ درصد تغییرات مشاهده شده را توجیه کند، مدل از نوع

همکاران (Basafa *et al.*, 2015) در ارزیابی برهمکنش ژنوتیپ × محیط بر عملکرد علوفه ۱۵ لاین سورگوم علوفه‌ای با استفاده از تجزیه AMMI و آماره‌های پایداری، آثار اصلی ژنوتیپ، محیط، برهمکنش آنها و دو مؤلفه اول برهمکنش را معنی‌دار گزارش کردند. در این مطالعه ژنوتیپ‌های KFS18 و KFS7 با عملکرد بالاتر از میانگین، بیشترین پایداری را نشان دادند، در حالی که ژنوتیپ‌های KFS1 و KFS3 به دلیل تأثیر بالا در برهمکنش، ناپایدارترین بودند.

شیری (Shiri, 2016) در بررسی هفت رقم سورگوم علوفه‌ای، بر اساس تغییرات ژنوتیپ و برهمکنش ژنوتیپ × محیط، رقم Nectar را از نظر عملکرد علوفه تر در هر دو کشت تابستانه و بهاره، و علوفه خشک در کشت تابستانه برتر دانست، رقم اسپیدفید نیز در کشت بهاره برتر بود. بر اساس بای‌پلات رقم ایده‌آل، Nectar با میانگین عملکرد و پایداری عملکرد بالا، سازگاری عمومی بیشتری داشت. ال-نگار و همکاران (Al-Naggar *et al.*, 2018) در مقایسه روش‌های برآورد پایداری عملکرد ژنوتیپ‌های سورگوم، در محیط‌های مختلف در مصر، با استفاده از تجزیه واریانس AMMI بیان کردند آثار ژنوتیپ، محیط و برهمکنش آنها در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. این پژوهشگران ژنوتیپ‌های BTX TSC-20 و ICSB-1808 را با عملکرد و پایداری عملکرد بالا شناسایی و معرفی کردند. در حالی که ژنوتیپ‌های ICSB-8001 و BTX-407 علی‌رغم پایداری عملکرد بالا، عملکرد متوسطی

AMMI1 خوانده می‌شود، و چنانچه دو مؤلفه اصلی اول بیش از ۹۰ درصد تغییرات را توضیح دهند، مدل AMMI2 نامیده می‌شود و به همین ترتیب برای مؤلفه‌های بعدی ادامه می‌یابد. در صورتی که هیچ کدام یا مجموع چند مؤلفه اصلی معنی‌دار نباشند، مدل AMMI0 خوانده می‌شود که فاقد محورهای تجزیه به مؤلفه‌های اصلی اثر متقابل (Interaction Principal Component Analysis = IPCA) است و معادل مدل تجزیه واریانس ساده محسوب می‌گردد (Gauch, 1992).

هرچه مقادیر IPCA به صفر نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده پایداری عملکرد بیشتر ژنوتیپ‌ها در محیط‌های مورد آزمون است. ژنوتیپ‌های دارای مقادیر IPCA1 بزرگ (مثبت یا منفی) برهمکنش بالایی با محیط دارند، در حالی که ژنوتیپ‌ها و محیط‌های با مقادیر IPCA1 نزدیک به صفر، برهمکنش پایینی با محیط نشان می‌دهند. ژنوتیپ‌های با IPCA منفی برهمکنش منفی ایجاد می‌کنند و ژنوتیپ‌های با IPCA مثبت، برهمکنش مثبت به وجود می‌آورند (Bocianowski *et al.*, 2019).

نجفیان و همکاران (Najafian *et al.*, 2010) در ارزیابی پایداری عملکرد دانه ژنوتیپ‌های گندم هگزاپلوئید کشت شده در مناطق معتدل ایران نشان دادند که روش تجزیه AMMI روشی مفید برای تجزیه پایداری و تعیین سازگاری است که می‌تواند در برنامه‌های به‌نژادی محصولات زراعی مورد استفاده قرار گیرد. باصفا و

داشتند.

پنج ایستگاه تحقیقات کشاورزی کرج، بروجرد، گرگان، ساری و دزفول ارزیابی شدند. هیبرید امیدبخش سورگوم علوفه‌ای KHFS1، KHFS2، KHFS3، KHFS4، KHFS5، KHFS6، KHFS7، KHFS8، KHFS9، KHFS10 و KHFS11 که همراه با رقم شاهد (اسپیدفید) ارزیابی شدند.

نخستین تلاقی این هیبریدها در سال ۱۳۹۶ در مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر واقع در کرج انجام شد. با استفاده از لاین‌های نرعیتم (جفت لاین‌ها) و ارقام و لاین‌های نربارور و گرده‌دهنده، تعداد زیادی هیبرید F1 ایجاد شد و در سال بعد، در ارزیابی مقدماتی مورد مطالعه و سنجش قرار گرفتند. هیبریدهای مناسب از لحاظ خصوصیات مطلوب زراعی برای مرحله بعد انتخاب شدند، و در نهایت ۱۱ هیبرید سورگوم علوفه‌ای همراه با هیبرید شاهد (اسپیدفید) وارد آزمایش‌های سازگاری شدند (جدول ۱).

هر چند روش‌های مختلفی برای شناسایی ارقام با عملکرد پایدار توسط پژوهشگران بررسی شده‌اند، اما روش کاملاً قابل قبول و قطعی برای این منظور وجود ندارد. بنابراین، هر گروه از پژوهشگران از یکی از روش‌ها یا ترکیبی از آنها برای شناسایی ارقام پایدار و پرمحصول استفاده می‌کنند.

این پژوهش با هدف ارزیابی برهمکنش ژنوتیپ × محیط بر عملکرد و پایداری عملکرد علوفه هیبریدهای امیدبخش سورگوم علوفه‌ای با استفاده از روش تجزیه AMMI برای شناسایی هیبریدهای با عملکرد علوفه و پایداری عملکرد بالا اجرا شد.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش ۱۱ هیبرید امیدبخش سورگوم علوفه‌ای در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در دو فصل رشد (۱۴۰۲-۱۴۰۳) در

جدول ۱- شماره، نام و نام تلاقی هیبریدهای امیدبخش سورگوم علوفه‌ای

Table 1. Name and cross name of evaluated forage sorghum promising hybrids

شماره	نام هیبرید	نام تلاقی
Number	Hybrid name	Cross name
1	KHFS1	AICS88005 × cv. Behesht
2	KHFS2	AICS88005 × Zabol landrace
3	KHFS3	AICS88005 × cv. Pegah
4	KHFS4	AICS11 × Rsp
5	KHFS5	AS9 × cv. Behesht
6	KHFS6	AICS84 × Rsp
7	KHFS7	A3 × Rsp
8	KHFS8	A18 × R109
9	KHFS9	A1 × R109
10	KHFS10	A2 × R109
11	KHFS11	F2(M) × R109
12	Speedfeed	Check

هر کرت آزمایشی شامل چهار خط چهار متری با فاصله ردیف‌ها ۶۰ سانتی‌متر و فاصله بوته‌ها روی ردیف‌های کاشت هشت سانتی‌متر بود. کود فسفات آمونیوم به میزان ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار و اوره به میزان ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار در زمان کاشت به زمین اضافه شد. همچنین زمانی که ارتفاع بوته‌ها به ۳۵ تا ۴۰ سانتی‌متر رسید، ۱۰۰ کیلوگرم کود اوره در هکتار به صورت سرک مصرف شد. پس از برداشت چین اول نیز ۱۰۰ کیلوگرم کود اوره در هر هکتار همزمان با آبیاری توزیع شد.

در طول دوره رویشی، خصوصیات مهم زراعی شامل ارتفاع گیاه، قطر ساقه و وزن علوفه تر و خشک اندازه‌گیری و ثبت شد. پس از ثبت داده‌ها و اطمینان از برقراری پیش فرض‌های تجزیه واریانس، تجزیه واریانس مرکب داده‌ها انجام شد. برای تجزیه پایداری عملکرد علوفه از تجزیه AMMI استفاده گردید. روش AMMI در واقع ترکیبی از مدل تجزیه واریانس (ANOVA) و تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA) است که مدل آن بر اساس رابطه ۱ می‌باشد (Gauch, 1992):

(رابطه ۱)

$$Y_{ger} = \mu + \alpha g + \beta e + \sum \lambda \gamma \eta \gamma \eta \delta \eta + p g e + e g e r$$

در این رابطه، Y_{ger} عملکرد ژنوتیپ g ام در محیط e ام در تکرار r ام است، μ میانگین کل آزمایش؛ αg و βe به ترتیب اثر اصلی ژنوتیپ و محیط، $\lambda \eta$ مقدار ویژه برای محور مؤلفه اصلی η ام، $\gamma \eta$ بردار ویژه ژنوتیپ برای محور η ام،

$p g e$ مقدار باقیمانده یا نویز (Noise) و $e g e r$ مربوط به خطا است. بخش اول مدل AMMI ($\mu + \alpha g + \beta e$) یعنی بخش جمع‌پذیر از تجزیه واریانس معمولی استفاده می‌کند، که در آن میانگین کل با اثر ژنوتیپی (αg) به صورت انحراف ژنوتیپ از میانگین کل و اثر محیطی (βe) به صورت انحراف محیط از میانگین کل برآورد می‌شود (Gauch, 1992). بخش دوم ($\sum \lambda \eta \gamma \eta \delta \eta$)، یعنی قسمت ضربه‌پذیر مدل، از تجزیه به مؤلفه‌های اصلی برای تجزیه برهمکنش ژنوتیپ × محیط به یک تا N مؤلفه اصلی بهره می‌گیرد، اما باید توجه داشت که در روش AMMI، محاسبات بر روی مقادیر برهمکنش ژنوتیپ × محیط صورت می‌گیرد، در حالی که در مؤلفه‌های اصلی، محاسبات بر روی تفاوت داده‌های اصلی از میانگین کل داده‌ها انجام می‌شود (Gauch, 1988). برای محاسبه ارزش پایداری امی (ASV) از رابطه ۲ استفاده شد (Purchase, 1997):

(رابطه ۲)

$$ASV = \sqrt{\left[\frac{SSIPCA1}{SSIPCA2} (IPCA1) \right]^2 + (IPCA2)^2}$$

در این معادله، $SSIPCA1$ و $SSIPCA2$ مجموع مربعات مؤلفه‌های اصلی اول و دوم و $IPCA1$ و $IPCA2$ نمرات ژنوتیپی مؤلفه‌های اصلی اول و دوم در مدل AMMI هستند. تجزیه واریانس داده‌ها و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS 9.0 انجام شد. به منظور

تجزیه واریانس مرکب داده‌ها، سال و مکان به عنوان اثر تصادفی و ژنوتیپ به عنوان اثر ثابت در نظر گرفته شد. برای تجزیه پایداری از بسته metan 1.19.0 در محیط نرم‌افزار R (Olivoto R and Lúcio, 2020) استفاده شد.

نتایج و بحث

تجزیه واریانس مرکب داده‌های صفات زراعی هیبریدهای سورگوم علوفه‌ای در دو فصل رشد و پنج ایستگاه تحقیقات کشاورزی نشان داد که اثر اصلی سال و مکان و برهمکنش آنها بر صفات مورد مطالعه (بجز قطر ساقه) در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). بین ژنوتیپ‌ها از نظر قطر ساقه (میانگین دو چین)، عملکرد علوفه تر (میانگین دو چین و مجموع دو چین) و عملکرد علوفه خشک (مجموع دو چین) تفاوت معنی‌داری وجود داشت که نشان‌دهنده تغییرات ژنتیکی قابل توجه میان هیبریدهای مورد بررسی بود. برهمکنش ژنوتیپ × مکان بر ارتفاع گیاه (میانگین دو چین) و قطر ساقه (میانگین دو چین) معنی‌دار بود. همچنین، برهمکنش ژنوتیپ × مکان × سال بر کلیه صفات مورد بررسی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۲).

این نتایج تجزیه واریانس بر اهمیت برهمکنش ژنوتیپ × محیط در تعیین عملکرد نهایی تأکید دارد و با گزارش‌های ال-نگار

و همکاران (Al-Naggar *et al.*, 2018) و خزائی و همکاران (Khazaeei *et al.*, 2023a) همخوانی دارد که بر نقش غالب محیط و برهمکنش ژنوتیپ × محیط در واریانس عملکرد سورگوم اشاره کرده‌اند.

میانگین مجموع عملکرد علوفه تر در کلیه محیط‌ها ۱۲۸/۲ تن در هکتار بود. بیشترین عملکرد علوفه تر کل (۱۴۵/۵ تن در هکتار) متعلق به هیبرید KHFS3 بود که نسبت رقم شاهد (با عملکرد ۱۲۲/۶ تن در هکتار) حدود ۱۸/۷ درصد برتری داشت (جدول ۳). هیبریدهای KHFS10، KHFS1، KHFS2 و KHFS9 نیز به ترتیب با ۱۴۱/۳، ۱۳۳/۸، ۱۳۳/۶ و ۱۳۳/۱ تن در هکتار عملکرد علوفه تر، تفاوت معنی‌داری با هیبرید KHFS3 نشان ندادند. پنج هیبرید مذکور به‌طور معنی‌داری برتر از رقم شاهد و سایر هیبریدها بودند. پایین‌ترین عملکرد علوفه تر (۱۰۶/۱ تن در هکتار) به هیبرید KHFS7 تعلق داشت که حدود ۱۳/۵ درصد کمتر از شاهد بود (جدول ۳).

هیبرید KHFS3 در بروجرد و دزفول بیشترین عملکرد علوفه تر را در بین هیبریدها نشان داد و کمترین میانگین رتبه (۲/۲) را داشت. هیبرید KHFS10 نیز در کرج از نظر عملکرد علوفه تر برتری داشت و پس از KHFS3، دارای کمترین میانگین رتبه (۳/۶) بود. هیبرید KHFS9 در ساری و گرگان ژنوتیپ برتر بود و میانگین رتبه ۵ را به خود اختصاص داد (جدول ۳).

جدول ۲- تجزیه واریانس مرکب برای ارتفاع گیاه، قطر ساقه و عملکرد علوفه هیبریدهای امیدبخش سورگوم علوفه‌ای در دو سال و پنج مکان

Table 2. Combined analysis of variance for plant height, stem diameter and forage yield of forage sorghum promising hybrids in two years and five locations

S.O.V.	منبع تغییرات	درجه آزادی d.f.	ارتفاع گیاه Plant height	قطر ساقه Stem diameter	عملکرد علوفه تر Fresh forage yield		عملکرد علوفه خشک Dry forage yield	
					میانگین دو چین Mean of two cuts	مجموع دو چین Total of two cuts	میانگین دو چین Mean of two cuts	مجموع دو چین Total of two cuts
Year (Y)	سال	1	33650**	0.01	2746**	10985**	167.4**	669.1**
Location (L)	مکان	4	18090**	5.27**	7683**	30734**	683.6**	2734.4**
Y × L	سال × مکان	4	33525**	0.88**	1684**	6735**	32.6**	130.3**
Error 1	خطای ۱	20	532	0.03	55	221	5.5	21.9
Genotype (G)	ژنوتیپ	11	561	1.23**	949**	3795**	33.5	133.9*
Y × G	سال × ژنوتیپ	11	225	0.04 ^{ns}	201	803	17.5	69.9
L × G	مکان × ژنوتیپ	44	1227*	0.15**	201	803	20.1	80.5
Y × L × G	سال × مکان × ژنوتیپ	44	689**	0.05**	156**	622**	13.4**	53.5**
Error 2	خطای ۲	220	190	0.03	48	193	3.7	14.8
C.V. (%)	ضریب تغییرات (%)		6.37	10.75	10.70	10.83	12.17	12.29

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

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

جدول ۳- مقایسه میانگین مجموع عملکرد علوفه تر (تن در هکتار) هیبریدهای امیدبخش سورگوم علوفه‌ای
Table 3. Mean comparison of the total fresh forage yield ($t\ ha^{-1}$) of forage sorghum promising hybrids

هیبرید Hybrid	کرج Karaj	بروجرد Borujerd	دزفول Dezful	گرگان Gorgan	ساری Sari	میانگین Mean	رتبه Rank
KHFS1	137.35	161.01	143.23	115.93	111.56	133.8	5.6
KHFS2	139.01	164.34	139.21	117.18	108.13	133.6	4.8
KHFS3	152.90	181.83	158.03	117.49	117.42	145.5	2.2
KHFS4	144.55	161.28	101.95	107.03	87.83	120.5	8.0
KHFS5	141.89	161.03	129.19	109.44	106.01	129.5	6.4
KHFS6	131.03	139.89	103.20	94.64	93.75	112.5	10.2
KHFS7	118.34	133.84	100.63	89.58	87.88	106.1	11.6
KHFS8	131.38	141.62	152.20	115.95	110.25	130.3	6.4
KHFS9	114.86	163.42	127.72	131.76	127.94	133.1	5.0
KHFS10	174.57	146.17	145.86	128.02	111.83	141.3	3.6
KHFS11	135.35	154.82	137.91	121.25	97.74	129.4	6.6
Speedfeed	153.67	155.06	117.88	96.66	89.54	122.6	7.6
LSD5%	25.80	18.30	21.68	13.17	16.43	12.98	-

میانگین مجموع عملکرد علوفه خشک ۳۱/۳ تن در هکتار بود. هیبرید KHFS3 با ۳۵/۲ تن در هکتار بالاترین عملکرد خشک را داشت و ۱۲/۵ درصد برتر از رقم شاهد (۳۱/۳ تن در هکتار) بود (جدول ۴). هیبریدهای KHFS8، KHFS10، KHFS9، KHFS2 و KHFS11 نیز به ترتیب با ۳۳/۸، ۳۳/۲، ۳۲/۰، ۳۱/۶ و ۳۱/۴ تن در هکتار عملکرد علوفه خشک، تفاوت معنی داری با هیبرید KHFS3 نشان ندادند. این هیبریدها به طور معنی داری برتر از شاهد و سایر هیبریدها بودند. هیبرید KHFS7 با ۲۷/۲ تن در هکتار حداقل عملکرد علوفه خشک را داشت (جدول ۴).

جدول ۴- مقایسه میانگین مجموع عملکرد علوفه خشک (تن در هکتار) هیبریدهای امیدبخش سورگوم علوفه‌ای
Table 4. Mean comparison of the total dry forage yield ($t\ ha^{-1}$) of forage sorghum promising hybrids

هیبرید Hybrid	کرج Karaj	بروجرد Borujerd	دزفول Dezful	گرگان Gorgan	ساری Sari	میانگین Mean	رتبه Rank
KHFS1	28.38	27.80	37.97	24.44	34.04	30.52	7.4
KHFS2	30.03	32.08	39.35	23.54	32.97	31.59	5.6
KHFS3	32.42	28.20	50.85	24.86	39.49	35.16	4.0
KHFS4	34.54	28.58	36.82	22.19	27.46	29.92	7.6
KHFS5	29.67	29.41	37.61	22.26	34.07	30.60	6.6
KHFS6	30.50	31.50	36.11	18.67	29.54	29.26	7.8
KHFS7	27.94	30.71	33.47	17.67	26.26	27.21	10.2
KHFS8	28.13	26.95	46.58	25.51	38.74	33.18	6.2
KHFS9	24.84	28.35	40.52	26.35	39.90	31.99	5.4
KHFS10	35.19	27.09	44.08	26.88	35.71	33.79	4.2
KHFS11	29.43	27.75	43.17	26.09	30.43	31.37	6.6
Speedfeed	37.38	34.62	36.31	20.30	27.85	31.29	6.4
LSD5%	6.13	3.44	6.63	2.96	7.30	3.81	-

وسیع‌تری را با محیط‌های مختلف دارا باشد، بایستی سازگاری ژنوتیپ‌ها و پایداری عملکرد آن‌ها در محیط‌های مختلف بررسی شود.

تجزیه AMMI برای عملکرد علوفه خشک

بررسی سهم منابع تغییر در تجزیه واریانس مرکب عملکرد علوفه خشک نشان داد که اثر اصلی محیط ۶۸/۵۷ درصد از واریانس کل را به خود اختصاص داد، در حالی که اثر ژنوتیپ و برهمکنش ژنوتیپ × محیط به ترتیب ۹/۲۳ و ۲۲/۱۹ درصد بود (جدول ۵). این نتیجه بیانگر تفاوت‌های زیاد محیط‌های آزمایشی و بر تاثیر آنها بر عملکرد علوفه خشک است و بر غالب بودن عوامل محیطی در عملکرد علوفه خشک سورگوم تأکید دارد و با یافته‌های خزائی و همکاران (Khazaei et al., 2023b) که سهم محیط را بیش از ۹۰ درصد گزارش کردند، همسو بود. معنی‌دار بودن برهمکنش ژنوتیپ × محیط، ضرورت استفاده از مدل‌های پیشرفته‌تر مانند AMMI را برای تفکیک الگوی پیچیده برهمکنش و شناسایی ژنوتیپ‌های با عملکرد پایدار علوفه خشک را توجیه کرد.

برای تجزیه برهمکنش ژنوتیپ × محیط، از مدل AMMI استفاده شد که دو مؤلفه اصلی نخست (IPCA1 و IPCA2) معنی‌دار بودند و به ترتیب ۷۱/۴۰ و ۱۷/۶۱ درصد و در مجموع ۸۹/۰۱ درصد از واریانس مشاهده شده برهمکنش را توجیه کردند (جدول ۵)، که با گزارش خزائی و همکاران (Khazaei et al., 2022) در ارزیابی لاین‌های سورگوم قابل مقایسه

هیبرید KHFS3 در دزفول بیشترین عملکرد علوفه خشک را در بین هیبریدها نشان داد و کمترین میانگین رتبه (۴) داشت. هیبرید KHFS10 نیز در گرگان بیشترین عملکرد علوفه خشک را تولید کرد و پس از KHFS3، دارای کمترین میانگین رتبه (۴/۲) بود. هیبرید اسپیدفید در کرج و بروجرد و هیبرید KHFS9 در ساری ژنوتیپ‌های برتر بودند (جدول ۴).

هیبرید KHFS3 نه تنها بالاترین میانگین عملکرد تر و خشک را داشت، بلکه دارای کمترین میانگین رتبه در محیط‌های مختلف بود. هیبرید KHFS10 نیز از پایداری عملکرد بالایی برخوردار و بویژه در مناطق گرم عملکردی نزدیک به KHFS3 داشت. در مقابل، هیبریدهای KHFS4، KHFS6 و KHFS7 میانگین رتبه بالایی داشتند و عمدتاً در مناطق مرطوب شمالی (گرگان و ساری) عملکرد علوفه تر و خشک پایین‌تری داشتند (جدول ۳ و ۴).

تجزیه واریانس مرکب داده‌ها فقط اطلاعاتی در مورد وجود یا عدم وجود برهمکنش ژنوتیپ × محیط ارائه می‌دهد. بنابراین، تجزیه پایداری عملکرد برای شناسایی ژنوتیپ‌های دارای عملکرد پایدار سودمند است. در چنین شرایطی انتخاب بر اساس عملکرد مطلوب نیاز به ژنوتیپ‌هایی است که سازگاری خوبی با شرایط محیطی مورد آزمایش داشته باشند. برای تشخیص ژنوتیپی که در تمام مناطق عملکرد قابل قبولی داشته و سازگاری

است و نشان‌دهنده الگوی ساختاریافته برهمکنش است (Gauch, 1992).

جدول ۵- تجزیه واریانس AMMI برای عملکرد علوفه خشک هیبریدهای سورگوم علوفه‌ای

Table 5. AMMI analysis of variance for dry forage yield of forage sorghum hybrids

S.O.V.	منبع تغییرات	درجه آزادی d.f.	میانگین مربعات Mean squares	درصد توجیه واریانس کل Variance explained (%)	درصد توجیه واریانس برهمکنش G × E variance explained (%)
Environment (E)	محیط	4	2734.38**	68.57	
Genotype (G)	ژنوتیپ	11	133.90**	9.23	
G × E	ژنوتیپ × محیط	44	80.46**	22.19	
IPCA1	مؤلفه اول	14	180.54**		71.40
IPCA2	مؤلفه دوم	12	51.95**		17.61
Residuals	باقیمانده	18	21.63		10.99
Error	خطا	275	23.22		

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

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

KHFS10 با عملکرد بالاتر برترین هیبرید بود (جدول ۶).

نتایج مشابهی توسط شیری (Shiri, 2016) گزارش شده است، جایی که رقم Nectar با ASV پایین و سازگاری عمومی برتر بود. به طور مشابه، محققین زیادی از روش AMMI برای شناسایی و معرفی ژنوتیپ‌های گندم با عملکرد دانه پایدار استفاده کرده‌اند (Farshadfar and Sutka, 2006; Tarakanovas and Ruzgas, 2006; Mohammadi *et al.*, 2007; Jahromi *et al.*, 2011).

ارزیابی هیبریدهای برتر در هر محیط بر اساس عملکرد علوفه خشک پیش‌بینی شده توسط روش AMMI نشان داد که در منطقه کرج و بروجرد هیبریدهای اسپیدفید، KHFS4، KHFS10 و KHFS2 و در منطقه دزفول، گرگان و ساری

هیبریدهای KHFS3، KHFS8، KHFS9 و اسپیدفید با مقادیر بالای IPCA1 (مثبت یا منفی) برهمکنش زیادی با محیط نشان دادند، در حالی که هیبریدهای KHFS1، KHFS2، KHFS5، KHFS10 و KHFS11 با IPCA1 نزدیک به صفر و کمترین مقدار شاخص‌های ASV، WAAS و ZA (جدول ۶)، و دارای عملکرد علوفه خشک پایدارتری بودند (Yan *et al.*, 2007). بر اساس شاخص‌های EV و DZ هیبریدهای KHFS1، KHFS2 و KHFS5 و پس از آن‌ها KHFS11 و KHFS6 به ترتیب بیشترین پایداری عملکرد علوفه خشک را داشتند. به نظر می‌رسد هیبریدهای KHFS1، KHFS2، KHFS5، KHFS10 و KHFS11 در محیط‌های متغیر، کاهش عملکرد اندک و سازگاری عمومی بالایی دارند و برای کشت در شرایط نامساعد قابل توصیه هستند. در بین هیبریدهای با عملکرد علوفه خشک پایدار،

هیبریدهای KHFS3، KHFS8، KHFS9 و ژنوتیپ‌های BTX TSC-20 و ICSB-1808 را برای محیط‌های گرم مصر توصیه کردند و بر لزوم انتخاب هیبریدهای سازگار با شرایط محلی تأکید نمودند. (Al-Naggar *et al.*, 2018) است که

جدول ۶- مقادیر مؤلفه‌های اصلی اول و دوم و شاخص‌های پایداری برای عملکرد علوفه خشک هیبریدهای سورگوم علوفه‌ای

Table 6. Values of the first and second principal components and stability indices for dry forage yield of forage sorghum hybrids

هیبرید Hybrid	عملکرد علوفه خشک (تن در هکتار)							
	Dry forage yield (t ha ⁻¹)	مؤلفه اول IPCA1	مؤلفه دوم IPCA2	WAAS	ASV	DZ	EV	ZA
KHFS1	30.52	-0.404	-0.653	0.453	1.764	0.223	0.025	0.100
KHFS2	31.59	0.309	-0.684	0.383	1.428	0.225	0.025	0.086
KHFS3	35.16	-1.666	1.312	1.596	6.880	0.551	0.152	0.335
KHFS4	29.92	1.300	0.967	1.234	5.360	0.417	0.087	0.258
KHFS5	30.60	0.045	-0.708	0.176	0.731	0.222	0.025	0.046
KHFS6	29.26	1.137	-0.452	1.001	4.631	0.288	0.042	0.204
KHFS7	27.21	1.371	-0.700	1.239	5.605	0.374	0.070	0.255
KHFS8	33.18	-1.867	0.205	1.538	7.572	0.417	0.087	0.306
KHFS9	31.99	-1.686	-1.731	1.695	7.050	0.658	0.216	0.361
KHFS10	33.79	-0.514	1.267	0.663	2.439	0.413	0.085	0.151
KHFS11	31.37	-0.443	0.821	0.518	1.974	0.275	0.038	0.115
Speedfeed	31.29	2.417	0.356	2.009	9.806	0.545	0.149	0.401

WAAS: میانگین وزنی نمرات مطلق، ASV: ارزش پایداری امی، DZ: ضریب فاصله، EV: مقدار ویژه پارامتر پایداری امی، ZA: قدر مطلق سهم نسبی مؤلفه‌های اصلی در برهمکنش ژنوتیپ × محیط.

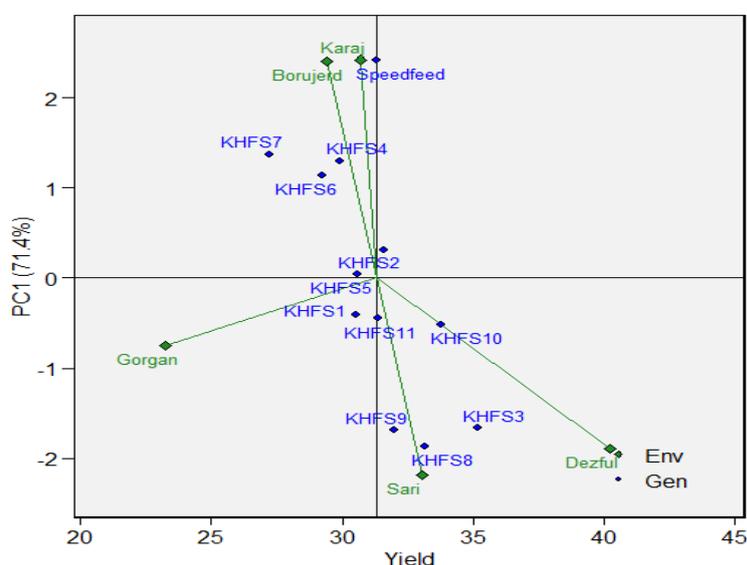
WAAS: weighted average of absolute scores, ASV: AMMI stability value, DZ: distance coefficient, EV: Eigen value of stability parameter of AMMI, ZA: absolute value of the relative contribution of IPCAs to the genotype × environment interaction.

جدول ۷- انتخاب چهار هیبرید برتر بر اساس عملکرد علوفه خشک پیش‌بینی شده توسط مدل AMMI
Table 7. Selection of the top four hybrids based on predicted dry forage yield using the AMMI model

محیط Environment	عملکرد علوفه خشک (تن در هکتار) Dry forage yield (t ha ⁻¹)	اولین هیبرید انتخابی 1st selected hybrid			
		دومین هیبرید انتخابی 2nd selected hybrid	سومین هیبرید انتخابی 3rd selected hybrid	چهارمین هیبرید انتخابی 4th selected hybrid	
Karaj	30.70	Speedfeed	KHFS4	KHFS10	KHFS2
Borujerd	29.42	Speedfeed	KHFS4	KHFS10	KHFS2
Dezful	40.23	KHFS3	KHFS8	KHFS9	KHFS10
Gorgan	23.23	KHFS3	KHFS8	KHFS10	KHFS9
Sari	33.04	KHFS3	KHFS8	KHFS9	KHFS10

میانگین عملکرد از حدود ۲۰ تا ۴۵ تن در هکتار اختصاص داده و محور عمودی IPCA1 را با تبیین ۷۱/۴ درصد از واریانس برهمکنش ژنوتیپ × محیط نشان می‌دهد. هیبریدهایی با IPCA1 نزدیک به صفر همچون KHFS2 و KHFS5 برهمکنش نزدیک به صفر و پایداری عملکرد علوفه خشک بالاتری دارند، در حالی که موقعیت سمت راست محور افقی عملکرد علوفه خشک برتر را نشان می‌دهد (شکل ۱).

برای ارزیابی روابط هیبریدها و محیط‌ها از نمایش گرافیکی بای پلات استفاده شد. در بای پلات AMMI1 محور افقی نمایانگر اثر اصلی جمع‌پذیر یا میانگین عملکرد علوفه خشک بر حسب تن در هکتار و محور عمودی اثر متقابل ضربی یا مقادیر اولین مؤلفه اصلی (IPCA1) یعنی ضرایب عاملی، برای هیبریدها و محیط‌ها به‌طور جداگانه می‌باشد (شکل ۱). بای پلات AMMI1 برای عملکرد علوفه خشک محور افقی را به



شکل ۱- نمودار پراکندگی هیبریدهای سورگوم علوفه ای و محیط‌های آزمایشی با استفاده از میانگین عملکرد علوفه خشک و اولین مؤلفه اصلی برهمکنش بر اساس مدل AMMI1

Fig. 1. Scattered plot of tested forage sorghum hybrids and environments using mean dry forage yield and the first principal component of interaction based on the AMMI1 model

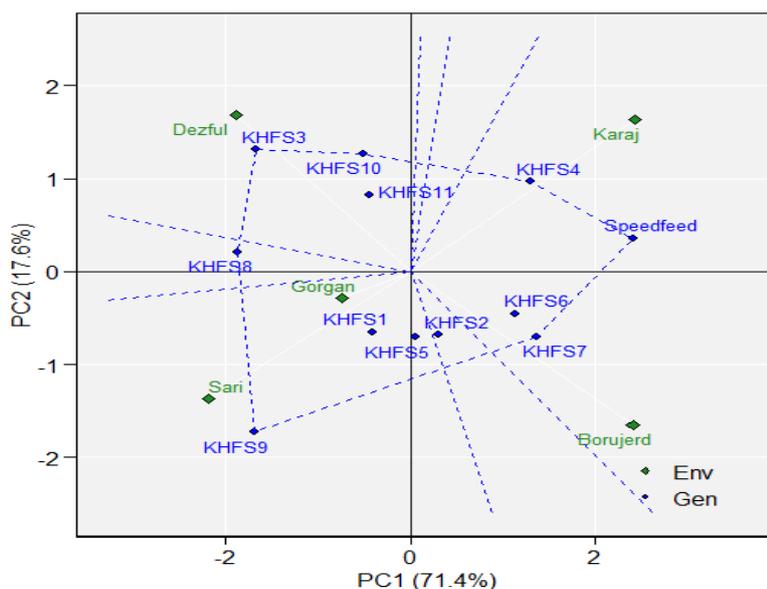
قرار گرفتند، برهمکنش نزدیک به صفر داشتند و دارای پایداری عملکرد بیشتری بودند. هیبرید KHFS3 با عملکرد ۳۵/۱۶ تن در هکتار علوفه خشک و مؤلفه اول منفی و دور از مبدأ، عملکرد بالایی داشت اما از پایداری عملکرد متوسطی

خزائی و همکاران (Khazaei et al., 2023b) نیز با استفاده از بای پلات AMMI1، ژنوتیپ‌های سورگوم علوفه‌ای سازگار به محیط‌های مختلف را معرفی کردند و نشان دادند که ژنوتیپ‌هایی که در مرکز بای پلات

برهمکنش را توضیح می‌دهند (شکل ۲). هرچه فاصله ژنوتیپ یا محیط از مبدأ بیشتر باشد، سهم آن در برهمکنش بیشتر و در نتیجه پایداری عملکرد علوفه آن کمتر بود. نزدیکی ژنوتیپ‌ها و محیط‌ها در یک جهت نشان‌دهنده سازگاری خاص آن ژنوتیپ با آن محیط‌ها است (Khazaei *et al.*, 2023b). ژنوتیپ‌ها و محیط‌هایی که در یک ربع مشابه نمودار قرار گرفته‌اند، الگوی سازگاری مشابهی دارند. ژنوتیپ‌هایی نزدیک به مبدأ دارای واکنش یکنواخت‌تری به محیط‌ها هستند (شکل ۲).

برخوردار بود. هیبرید KHFS10 هر چند عملکرد علوفه خشک کمتری نسبت به KHFS3 داشت، اما از پایداری عملکرد نسبی بیشتری برخوردار بود. رقم شاهد ناپایداری عملکرد بالایی نشان داد. هیبریدهای KHFS1، KHFS2، KHFS5 و KHFS11 پایداری عملکرد بالایی بودند، هر چند عملکرد علوفه خشک آن‌ها متوسط بود (شکل ۱).

در بای‌پلات AMMI2 محور افقی و عمودی به ترتیب مؤلفه‌های اصلی اول و دوم را نشان می‌دهند که مجموعاً حدود ۸۹ درصد از



شکل ۲- نمودار پراکنندگی هیبریدهای سورگوم علوفه‌ای و محیط‌های آزمایشی با استفاده از اولین و دومین مؤلفه اصلی برهمکنش (علوفه خشک) بر اساس مدل AMMI2

Fig. 2. Scattered plot of tested forage sorghum hybrids and environments using the first and second principal components of interaction (dry forage) based on the AMMI2 model

در محیط‌های مختلف برخوردار بودند. هیبرید KHFS3 و پس از آن هیبریدهای KHFS11 و

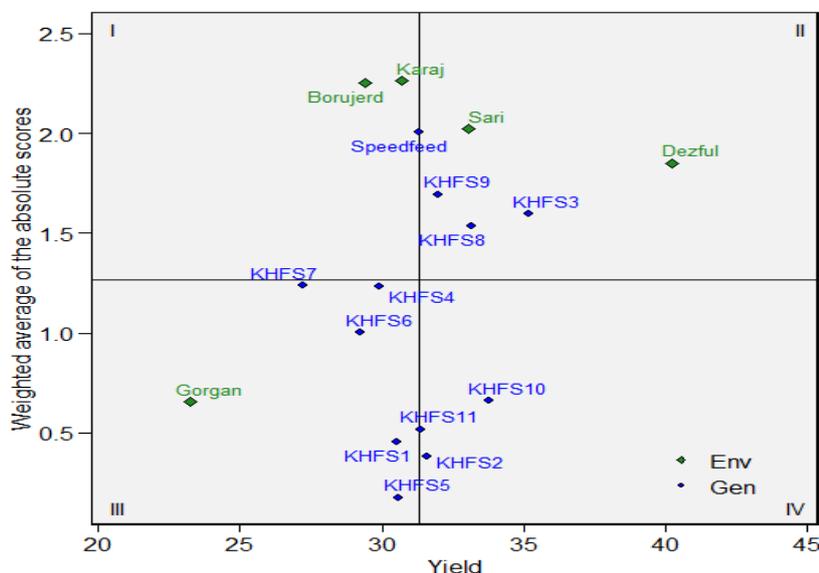
هیبریدهای KHFS1، KHFS2، KHFS5 و KHFS11 از پایداری عملکرد خشک مناسبی

پایین-راست (ربع چهارم با عملکرد علوفه خشک بالا و پایداری عملکرد بالا) است (Olivoto and Lúcio, 2020).

هیبریدهایی که در ربع چهارم قرار دارند شامل هیبریدهای KHFS10 و KHFS2، بهترین گزینه برای سازگاری عمومی و عملکرد علوفه خشک بالا بودند (شکل ۳). هیبریدهای ربع دوم، عملکرد علوفه خشک بالا ولی ناپایدار داشتند (هیبریدهای KHFS3، KHFS8، و KHFS9) و برای مناطق خاص قابل توصیه هستند. هیبریدهای ربع سوم، شامل هیبریدهای KHFS1، KHFS4، KHFS5، KHFS6، و KHFS7 عملکرد علوفه خشک پایین و پایداری عملکرد بالا داشتند و برای کشت در شرایط محیطی نامساعد مناسب تر هستند (Olivoto and Lúcio, 2020).

KHFS10 با محیط دزفول سازگاری خصوصی داشتند که برتر بودن این هیبریدها در شرایط گرم را نشان می دهد. هیبرید KHFS4 و پس از آن هیبرید اسپیدفید با محیط کرج بیشترین سازگاری را داشت که بیانگر سازگاری خصوصی این ژنوتیپ با این منطقه بود. هیبریدهای KHFS7 و KHFS6 با محیط بروجرد و هیبریدهای KHFS9 و KHFS1 با محیط ساری سازگاری خصوصی خوبی نشان دادند (شکل ۲).

بای پلات $Y \times WAAS$ با استفاده از عملکرد علوفه خشک و میانگین وزنی نمرات مطلق (WAAS) رسم شد (شکل ۳). مقدار WAAS کمتر در این بای پلات به معنای پایداری بیشتر و برهمکنش کمتر با محیط است. بنابراین، ناحیه مطلوب در این بای پلات قسمت



شکل ۳- نمودار پراکنندگی هیبریدهای سورگوم علوفه ای و محیط های آزمایشی با استفاده از میانگین عملکرد علوفه خشک و میانگین وزنی نمرات مطلق (WAAS)

Fig. 3. Scattered plot of tested forage sorghum hybrids and environments using mean dry forage yield and the weighted average of absolute scores (WAAS)

تجزیه AMMI بر اساس عملکرد علوفه تر

تجزیه واریانس با استفاده از مدل AMMI برای عملکرد علوفه تر نشان داد که محیط ۶۱/۴۶ درصد از واریانس کل را توجیه کرد، در حالی که ژنوتیپ و برهمکنش ژنوتیپ × محیط به ترتیب ۲۰/۸۷ و ۱۷/۶۶ درصد سهم داشتند (جدول ۸).

سهم اثر محیط و برهمکنش ژنوتیپ × محیط بر عملکرد علوفه تر کمتر از عملکرد علوفه خشک بود (جدول ۵). به نظر می‌رسد عملکرد علوفه خشک به دلیل تأثیر عوامل اقلیمی بر درصد ماده خشک، حساسیت بیشتری به برهمکنش‌های محیطی داشت.

جدول ۸- تجزیه واریانس AMMI برای عملکرد علوفه تر هیبریدهای سورگوم علوفه‌ای

Table 8. AMMI analysis of variance for fresh forage yield of forage sorghum hybrids

S.O.V.	منبع تغییرات	درجه آزادی d.f.	میانگین مربعات Mean squares	درصد توجیه واریانس کل Variance explained (%)	درصد توجیه واریانس برهمکنش G × E variance explained (%)
Environment (E)	محیط	4	30735.06**	61.46	
Genotype (G)	ژنوتیپ	11	3794.93**	20.87	
G × E	ژنوتیپ × محیط	44	803.01**	17.66	100
IPCA1	مؤلفه اول	14	1264.01**		50.08
IPCA2	مؤلفه دوم	12	889.04**		30.19
Residuals	باقیمانده	18	387.11		19.72
Error	خطا	275	285.95		

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

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

به نظر می‌رسد هیبریدهای KHFS3، KHFS7، KHFS5، KHFS2 و KHFS11 در محیط‌های متغیر، کاهش عملکرد اندک و سازگاری عمومی بالایی داشتند و برای تولید علوفه تازه و سیلویی در شرایط نامساعد قابل توصیه هستند. در بین هیبریدهای دارای پایداری عملکرد علوفه تر، هیبرید KHFS3 با عملکرد بالاتر برترین ژنوتیپ بود (جدول ۹).

بر اساس عملکرد علوفه تر پیش‌بینی شده توسط روش AMMI هیبرید KHFS3 در بروجرد، دزفول، گرگان و ساری به‌عنوان اولین و در کرج به‌عنوان دومین گزینه انتخاب شد و

برهمکنش ژنوتیپ × محیط به چهار مؤلفه اصلی تجزیه شد که IPCA1 و IPCA2 معنی‌دار بودند و در مجموع بیش از ۸۰ درصد تغییرات مشاهده شده را توجیه نمودند (جدول ۸). هیبریدهای KHFS5، KHFS3، KHFS7، KHFS2 و KHFS11 با IPCA1 نزدیک به صفر و کمترین مقدار شاخص‌های WAAS، ASV و ZA را داشتند (جدول ۹)، از پایداری عملکرد علوفه تر بیشتری برخوردار بودند (Yan *et al.*, 2007). بر اساس شاخص‌های EV و DZ هیبریدهای KHFS3، KHFS5، KHFS2 و بیشترین پایداری عملکرد علوفه تر را نشان دادند.

جدول ۹- مقادیر مؤلفه‌های اصلی اول و دوم و شاخص‌های پایداری برای عملکرد علوفه تر هیبریدهای سورگوم علوفه‌ای

Table 9. Values of the first and second principal components and stability indices for fresh forage yield of forage sorghum hybrids

هیبرید Hybrid	عملکرد علوفه تر (تن در هکتار) Fresh forage yield (t ha ⁻¹)	مؤلفه اول IPCA1	مؤلفه دوم IPCA2	WAAS	ASV	DZ	EV	ZA
KHFS1	133.81	1.251	0.590	1.002	2.157	0.193	0.019	0.112
KHFS2	133.57	0.739	-0.061	0.484	1.227	0.101	0.005	0.053
KHFS3	145.53	0.248	0.403	0.306	0.576	0.071	0.002	0.036
KHFS4	120.52	-2.725	-2.990	2.825	5.419	0.591	0.174	0.324
KHFS5	129.51	-0.322	-0.574	0.417	0.784	0.099	0.005	0.049
KHFS6	112.50	-1.048	-1.095	1.066	2.055	0.221	0.024	0.122
KHFS7	106.05	-0.106	-0.937	0.419	0.953	0.145	0.011	0.051
KHFS8	130.28	2.384	3.372	2.756	5.197	0.612	0.187	0.319
KHFS9	133.14	4.516	-2.641	3.811	7.943	0.736	0.271	0.430
KHFS10	141.29	-2.401	3.341	2.755	5.199	0.609	0.185	0.319
KHFS11	129.41	0.785	0.854	0.811	1.558	0.169	0.014	0.093
Speedfeed	122.56	-3.321	-0.262	2.170	5.515	0.452	0.102	0.238

WAAS: میانگین وزنی نمرات مطلق، ASV: ارزش پایداری امی، DZ: ضریب فاصله، EV: مقدار ویژه پارامتر پایداری امی، ZA: قدر مطلق سهم نسبی مؤلفه‌های اصلی در برهمکنش ژنوتیپ × محیط.

WAAS: weighted average of absolute scores, ASV: AMMI stability value, DZ: distance coefficient, EV: Eigen value of stability parameter of AMMI, ZA: absolute value of the relative contribution of IPCAs to the genotype × environment interaction.

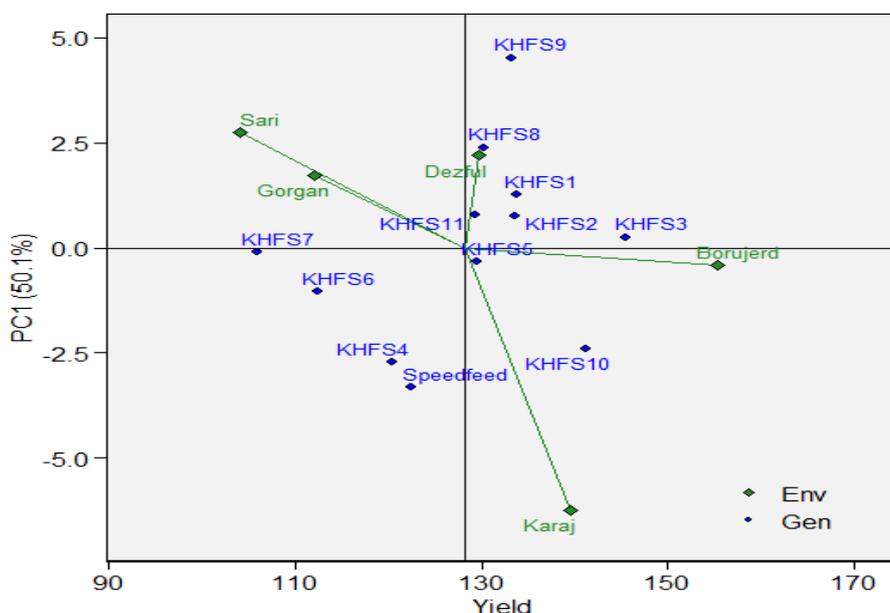
میانگین عملکرد ۱۴۵/۵ تن علوفه تر در هکتار را داشت، که نشان‌دهنده سازگاری عمومی خوب آن در محیط‌های مختلف بود (جدول ۱۰). هیبرید KHFS10 در کرج، بروجرد، گرگان و دزفول به ترتیب اولین تا چهارمین ژنوتیپ انتخابی بود. هیبرید KHFS9 در دزفول، گرگان و ساری به عنوان دومین گزینه انتخاب شد. بنابراین، KHFS3 به عنوان هیبرید ایده آل برای تولید علوفه سیلویی و تازه در تمام مناطق هدف قابل توصیه است.

جدول ۱۰- انتخاب چهار هیبرید برتر بر اساس عملکرد علوفه تر پیش‌بینی شده توسط روش AMMI
Table 10. Selection of the top four hybrids based on predicted fresh forage yield using the AMMI method

محیط Environment	عملکرد علوفه تر (تن در هکتار) Fresh forage yield (t ha ⁻¹)	اولین هیبرید انتخابی 1st selected hybrid	دومین هیبرید انتخابی 2nd selected hybrid	سومین هیبرید انتخابی 3rd selected hybrid	چهارمین هیبرید انتخابی 4th selected hybrid
Karaj	139.57	KHFS10	KHFS3	Speedfeed	KHFS4
Borujerd	155.36	KHFS3	KHFS10	KHFS1	KHFS2
Dezful	129.75	KHFS3	KHFS9	KHFS1	KHFS10
Gorgan	112.08	KHFS3	KHFS9	KHFS10	KHFS1
Sari	104.15	KHFS3	KHFS9	KHFS1	KHFS8

کمتری نسبت به KHFS3 نشان داد. هیبرید KHFS7 کمترین مقدار مطلق IPCA1 را داشت، ولی حداقل عملکرد علوفه تر را در میان هیبریدها داشت. در میان محیط‌ها بروجرد بیشترین عملکرد علوفه تر و کمترین مقدار مطلق IPCA1 را داشت، در مقابل کرج با وجود عملکرد علوفه تر بالا، بیشترین مقدار مطلق IPCA1 را نشان داد و پایداری عملکرد پائینی داشت (شکل ۴).

بای‌پلات AMMI1 میانگین عملکرد علوفه تر (بین ۹۰ تا ۱۷۰ تن در هکتار) را در برابر IPCA1 (توجیه کننده ۵۰/۱ درصد از برهمکنش ژنوتیپ × محیط) نشان می‌دهد (شکل ۴). هیبرید KHFS3 با میانگین عملکرد ۱۴۵/۵ تن در هکتار و IPCA1 نزدیک به صفر (۰/۲۵) همزمان عملکرد و پایداری عملکرد بالایی نشان داد. هیبرید KHFS10 نیز با وجود عملکرد علوفه تر بالا، پایداری عملکرد



شکل ۴- نمودار پراکنندگی هیبریدهای سورگوم علوفه ای و محیط‌های آزمایشی با استفاده از میانگین عملکرد علوفه تر و اولین مؤلفه اصلی اثر متقابل بر اساس مدل AMMI1

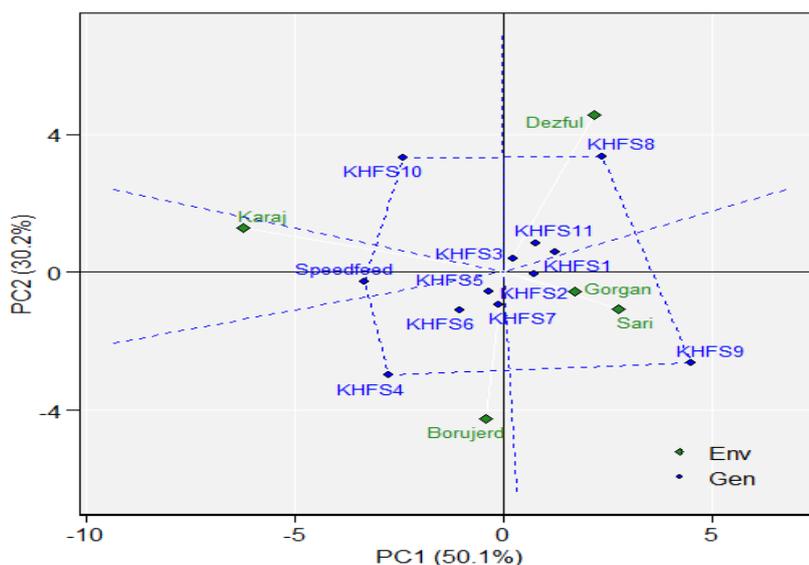
Fig. 4. Scattered plot of tested forage sorghum hybrids and environments using mean fresh forage yield and the first principal component of interaction based on the AMMI1 model

ژنوتیپ × محیط) رسم شد (شکل ۵). هیبریدهای KHFS9، KHFS8، KHFS10، KHFS4 و اسپیدفید با بیشترین فاصله از مبدأ

بای‌پلات AMMI2 عملکرد علوفه تر با استفاده از IPCA1 و IPCA2 (به ترتیب توجیه کننده ۵۰/۱ و ۳۰/۲ درصد از برهمکنش

کرج و هیبریدهای KHFS9 و KHFS2 با محیط ساری و گرگان سازگاری خصوصی داشتند. به طور کلی هیبریدهای KHFS2، KHFS3 و KHFS5 از پایداری عملکرد علوفه تر بالاتری را برخوردار بودند (شکل ۵).

بای پلات، سهم بالایی در برهمکنش ژنوتیپ × محیط داشتند. هیبریدهای KHFS3، KHFS8 و KHFS11 با محیط دزفول سازگاری خصوصی داشتند که برتر بودن این هیبریدها در شرایط گرم را نشان می دهد. هیبریدهای KHFS7 و KHFS5 با محیط بروجرد، اسپدیفید با

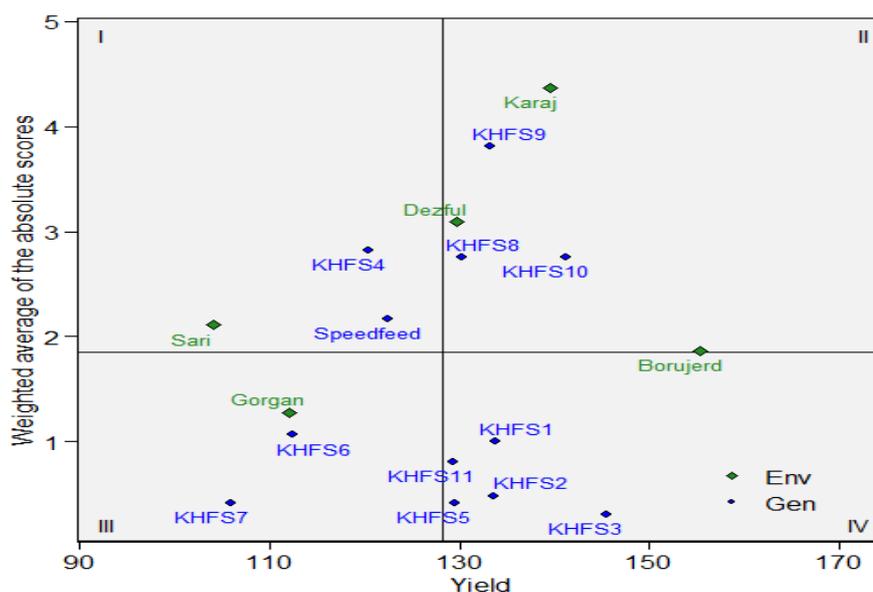


شکل ۵- نمودار پراکنندگی هیبریدهای سورگوم علوفه ای و محیط های آزمایشی با استفاده از اولین و دومین مؤلفه اصلی برهمکنش (علوفه تر) بر اساس مدل AMMI2

Fig. 5. Scattered plot of tested forage sorghum hybrids and environments using the first and second principal components of interaction (fresh forage) based on the AMMI2 model

مناطق خاص قابل توصیه هستند. هیبریدهای KHFS6 و KHFS7 عملکرد علوفه تر پایین و پایداری عملکرد بالاتری داشتند و برای کشت در شرایط نامساعد محیطی مناسب تر هستند (Olivoto and Lúcio, 2020). هیبریدهای واقع در ربع اول شامل KHFS4 و اسپدیفید عملکرد علوفه تر پائین و ناپایدار داشتند (شکل ۶).

بر اساس بای پلات $Y \times WAAS$ (شکل ۶)، هیبریدهای واقع در ربع چهارم شامل هیبریدهای KHFS1، KHFS2، KHFS3 و KHFS5 و عملکرد عمومی و سازگاری عمومی و عملکرد بالایی برخوردار بودند (به خصوص KHFS3 با بیشترین عملکرد علوفه تر و کمترین WAAS). هیبریدهای KHFS8، KHFS9، KHFS10 و عملکرد بالا ولی ناپایدار داشتند و برای



شکل ۶- نمودار پراکنندگی هیبریدهای سورگوم علوفه ای و محیط‌های آزمایشی با استفاده از میانگین عملکرد علوفه تر و میانگین وزنی نمرات مطلق (WAAS)

Fig. 6. Scattered plot of tested forage sorghum hybrids and environments using mean fresh forage yield and the weighted average of absolute scores (WAAS)

را شناسایی کردند.

سپاسگزاری

نگارندگان بدین وسیله از پشتیبانی‌های مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر و سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی برای اجرای این پروژه تحقیقاتی با شماره مصوب ۰۲۰۳۸۶-۰۲۳-۰۳-۰۳- سپاسگزاری می‌کنند.

عدم تعارض منافع

نگارندگان اعلام می‌دارند که هیچگونه تعارض منافی باهم و سایر اشخاص حقوقی/حقیقی ندارند.

به‌طور کلی، هیبرید KHFS3 به‌عنوان

هیبرید برتر در تولید علوفه تر و هیبرید KHFS10 به‌عنوان ژنوتیپ برتر در تولید علوفه خشک با عملکرد و پایداری عملکرد بالا شناسایی شدند. این دو هیبرید با عملکرد علوفه تر و خشک برتر و پایداری عملکرد قابل قبول، گزینه‌های مناسبی برای کشت در مناطق هدف هستند. علاوه بر این، هیبریدهای KHFS2، KHFS5 و KHFS11 نیز از نظر عملکرد علوفه تر و عملکرد علوفه خشک پایداری عملکرد بالایی نشان دادند. مدل‌های AMMI و شاخص‌های پایداری عملکرد نیز هیبریدهایی با سازگاری وسیع مانند KHFS3 برای عملکرد علوفه تر و KHFS5 برای عملکرد علوفه خشک

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
- Basafa, M. , Taherian, M. and Beheshti, A. 2015.** Stability analysis for forage yield in sorghum lines. *Applied Field Crops Research*, 28(107), pp.99-107. (in Persian). DOI: 10.22092/aj.2015.105710
- Bocianowski, J., Warzecha, T., Nowosad, K. and Bathelt, R. 2019.** Genotype by environment interaction using AMMI model and estimation of additive and epistasis gene effects for 1000-kernel weight in spring barley (*Hordeum vulgare* L.). *Journal of Applied Genetics*, 60(2), pp.127-135. DOI: 10.1007/s13353-019-00490-2
- 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
- Farshadfar, E. and Sutka, J. 2006.** Biplot analysis of genotype-environment interaction in durum wheat using the AMMI model. *Acta Agronomica Hungarica*, 54(4), pp.459-467. DOI: 10.1556/AAgr.54.2006.4.8
- Feyzbakhsh, M.T. 2016.** Effect of plant density on some morphological traits and quantitative and qualitative yield of forage sorghum hybrids in Golestan province. *Seed and Plant Production Journal*, 32(2), pp.223-237. (in Persian). DOI: 10.22092/sppj.2016.113080
- Gauch, H.G. 1988.** Model selection and validation for yield trials with interaction. *Biometrics*, 44(3), pp.705-715. DOI: 10.2307/2531585
- Gauch, H.J., 1992.** Statistical analysis of regional yield trials: AMMI analysis of factorial designs. Elsevier Science. Amsterdam, Netherlands. 278 pp.
- Gholami, H., Khazaei, A., Golzardi, F. and Amirsadeghi, M. 2023.** Evaluation of forage yield and quality in the local and foreign cultivars, lines, and hybrids of forage sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench]. *Animal Science Research*, 32(4), pp.133-156. (in Persian). DOI: 10.22034/as.2021.13882
- Jahromi, M.H.M.A., Khodarahmi, M., Mohammadi, A.R. and Mohammadi, A. 2011.** Stability analysis for grain yield of promising durum wheat genotypes in

- southern warm and dry agro-climatic zone of Iran. *Iranian Journal of Crop Sciences*, 13(3), pp.565-579. (in Persian).
- Khazaei, A., Golzardi, F., Shahverdi, M., Nazari, L., Ghasemi, A., Tabatabaei, S.A., Shariati, A. and Mokhtarpour, H. 2022.** Evaluation of genotype × 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
- Mohammadi, R., Armion, M., Shabani, A. and Daryaei, A. 2007.** Identification of stability and adaptability in advanced durum genotypes using AMMI analysis. *Asian Journal of Plant Sciences*, 6(8), pp.1261-1268.
- Najafian, G., Kaffashi, A. K. and Jafar-Nezhad, A. 2010.** Analysis of grain yield stability in hexaploid wheat genotypes grown in temperate regions of Iran using additive main effects and multiplicative interaction. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 12(2), pp. 213-222.
- Olivoto, T., and Lúcio, A. D. C. 2020.** Metan: An R package for multi-environment trial analysis. *Methods in Ecology and Evolution*, 11(6), pp.783-789. DOI: 10.1111/2041-210X.13384
- Pour-Aboughadareh, A., Khalili, M., Pocza, P. and Olivoto, T. 2022.** Stability indices to deciphering the genotype-by-environment interaction (GEI) effect: An applicable review for use in plant breeding programs. *Plants*, 11(3), 414. DOI: 10.3390/plants11030414
- Purchase, J.L. 1997.** Parametric analysis to describe genotype x environment interaction and yield stability in winter wheat. Ph.D. Thesis. University of the Free State. Bloemfontein, South Africa. 84 pp.

- Shiri, M. 2016.** Evaluation of fresh and dry forage yield stability of forage sorghum varieties (*Sorghum bicolor* L. moench) in different conditions. *Journal of Crop Breeding*, 8(19), pp.101-108. (in Persian). DOR: 20.1001.1.22286128.1395.8.19.13.8
- Tarakanovas, P. and Ruzgas, V. 2006.** Additive main effect and multiplicative interaction analysis of grain yield of wheat varieties in Lithuania. *Agronomy Research*, 4(1), pp.91-98.
- 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, e286121. DOI: 10.1590/1519-6984.286121
- 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/cropsci2006.06.0374

RESEARCH ARTICLE

Evaluation of Genotype × Environment Interaction for Forage Yield and Yield Stability of Forage Sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) Promising Hybrids Using AMMI Analysis

A. Khazaei^{1*} , F. Golzardi² , M. T. Feyzbakhsh³ , M. Shahverdi⁴, H. R. Ghorbani⁵ and A. A. Shoushi Dezfuli⁶

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. Associate Professor, Field and Horticultural Sciences Crops Research Department, Golestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Gorgan, Iran.

4. Assistant Professor, Field and Horticultural Sciences Crops Research Department, Lorestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Borujerd, Iran.

5. Assistant Professor, Field and Horticultural Sciences Crops Research Department, Mazandaran Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Sari, Iran.

6. Assistant Professor, Field and Horticultural Sciences Crops Research Department, Safiabad Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Dezful, Iran.

ABSTRACT

Khazaei, A., Golzardi, F., Feyzbakhsh, M. T., Shahverdi, M., Ghorbani, H. R. and Shoushi Dezfuli, A. A. 2025. Evaluation of genotype × environment interaction for forage yield and yield stability of forage sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) promising hybrids using AMMI analysis. *Seed and Plant*, 40, pp.527-575 (in Persian).

This study evaluated genotype × environment interaction for forage yield and yield stability of 11 promising hybrids of forage sorghum along with Speedfeed cultivar (as commercial check) using randomized complete block design with three replications in five locations; Karaj, Borujerd, Gorgan, Dezful, and Sari in 2023 and 2024 growing seasons. Combined analysis of variance showed significant genotype × location × year interaction ($P \leq 0.01$) for fresh and dry forage yield. Hybrids KHFS3 and KHFS10 had the highest total fresh forage yield of 145.5 and 141.2 t ha⁻¹, respectively. The maximum dry forage yield (35.2 t ha⁻¹) was also belonged to hybrid KHFS3, represented 12.5% relative advantage compared to the check cultivar. Environment, genotype, and genotype × environment (G × E) interaction explained 68.57%, 9.23%, and 22.19% of the total observed variation in dry forage yield, and 61.46%, 20.87%, and 17.66% of the total variation in fresh forage yield, respectively. Examination of the genotype × environment interaction using AMMI analysis revealed that the first two principal components interaction were significant, explaining 71.40% and 17.61% of the G×E variation, respectively. Based on the AMMI stability value (ASV) parameter and weighted average of absolute scores (WAAS), hybrids KHFS5 and KHFS3 exhibited the highest stability for dry and fresh forage yield, respectively. According to results of graphical analysis, hybrids KHFS3 and KHFS10 were identified as superior hybrids for fresh and dry forage production, respectively, with high yield and yield stability. These hybrids, with high adaptability and forage yield were identified suitable for being grown in target environments in Iran, and can also be utilized in forage sorghum breeding programs to improve forage yield.

Keywords: Sorghum, AMMI stability value, dry forage yield, fresh forage yield, graphical analysis.

Introduction

Forage sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) is an important summer forage crop used for fresh and dry forage and silage, and its productivity is highly influenced by genotype \times environment (G \times E) interactions (Khazaei *et al.*, 2023b). Multivariate approaches such as AMMI (Additive Main effects and Multiplicative Interaction) and AMMI-based stability parameters (e.g. ASV) are widely used to dissect these interactions and identify high-yielding and yield-stable genotypes (e.g., Al-Naggar *et al.*, 2018; Pour-Aboughadareh *et al.*, 2022). Recent studies comparing AMMI and GGE biplot approaches have emphasized AMMI's effectiveness at partitioning main effects and revealing interaction structure, while combined ANOVA remains essential to detect significance of G, E and G \times E components (Pour-Aboughadareh *et al.*, 2022; Khazaei *et al.*, 2023a). However, few studies have evaluated newly bred forage sorghum hybrids across different agro-ecological zones of Iran to identify hybrids with both high forage yield and yield stability in contrasting environments. The present study aimed to evaluate G \times E interaction patterns and to identify promising and yield-stable of forage sorghum hybrids in five locations using combined analysis of variance and AMMI model.

Materials and Methods

Eleven promising forage sorghum hybrids (KHFS1-KHFS11) and Speedfeed as commercial check cultivar were evaluated using randomized complete block design with three replications at five locations; Karaj, Borujerd, Gorgan, Dezful and Sari in two growing seasons (2023 and 2024). Each experimental plot consisted of four four meters long rows with 60 centimeters row spacing and eight centimeters, within-row, plant spacing. Fresh and dry forage yield (first and second cuts and total), plant height and stem diameter in the first and second cuts were measured and recorded. Combined analysis of variance across years and locations quantified main and interaction effects. AMMI model was used to characterize interaction patterns. The AMMI stability value (ASV) was computed to rank hybrids yield stability. Data processing and analysis of variance were performed using SAS 9.0. The AMMI analysis and biplots were generated using the “metan” package in R software.

Results and Discussion

Combined analysis of variance showed significant genotype \times location \times year interaction ($P \leq 0.01$) for fresh and dry forage yield, indicating substantial differences in performance of hybrids across sites and growing seasons. For dry forage yield, environment accounted for 68.57% of total observed variance, while genotype and G \times E contributed 9.23% and 22.19%, respectively; and for fresh forage yield, these values were 61.46%, 20.87%, and 17.66%, respectively. Mean forage yield ranking identified KHFS3 and KHFS10 as top hybrids for total fresh forage yield (145.5 and 141.2 t ha⁻¹, respectively), compared to cv. Speedfeed (122.6 t ha⁻¹). For total dry forage yield KHFS3 attained the highest mean yield (35.2 t ha⁻¹) compared to 31.3 t ha⁻¹ for the check cultivar.

The AMMI model identified the first two IPCAs as significant, explaining 71.40% and

17.61% of $G \times E$ variance for dry yield, and 50.08% and 30.19% for fresh yield, confirming a structured interaction suitable for biplot examination and interpretation (Khazaei *et al.*, 2023b). Based on AMMI stability value (ASV) and weighted average of absolute scores (WAAS), hybrid KHFS5 exhibited the highest yield stability for dry forage yield (ASV = 0.731, WAAS = 0.176), whereas KHFS3 was the most yield-stable hybrid for fresh yield (ASV = 0.576, WAAS = 0.306). In addition, the hybrids KHFS2, KHFS5, and KHFS11 showed high yield stability for both fresh and dry forage yield.

Environment-specific rankings identified KHFS3 as the top hybrid in four locations for fresh forage yield, underscoring the utility of integrating mean performance, ASV, and WAAS for selection (Al-Naggar *et al.*, 2018; Khazaei *et al.*, 2023a). Biplots highlighted KHFS3 and KHFS10 as superior genotypes for fresh and dry forage yield, respectively, with high yield and yield stability. Overall, the ANOVA-AMMI framework effectively delineated high-yielding and yield stable forage sorghum hybrids. The hybrids with high adaptability and forage yield were identified suitable for being grown in target environments in Iran, and can also be utilized in forage sorghum breeding programs to improve forage yield.

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., 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., 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
- Pour-Aboughadareh, A., Khalili, M., Poczai, P. and Olivoto, T. 2022.** Stability indices to deciphering the genotype-by-environment interaction (GEI) effect: An applicable review for use in plant breeding programs. *Plants*, 11(3), 414. DOI: 10.3390/plants11030414

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

Tel.: +982634852052

Received: 10 December 2024

Accepted: 29 January 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.