Vol. 7, No. 2, Autumn & Winter, 2026, p. 201-216

Plant Production and Genetics

https://doi.org/10.22034/plant.2025.144872.1178

Evaluation of yield stability in promising forage sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) hybrids using AMMI analysis

Azim Khazaei[*1], Farid Golzardi[1], Mohamad Taghi Feyzbakhsh[2], Mohammad Shahverdi[3], Hamidreza Ghorbani[4], Ahmad Ali Shoushi Dezfuli[5]

1. Seed and Plant Improvement Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran
2. Crop and Horticultural Science Research Department, Golestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Gorgan, Iran
3.Crop and Horticultural Science Research Department, Lorestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Borujerd, Iran
4. Crop and Horticultural Science Research Department, Mazandaran Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Sari, Iran
5. Crop and Horticultural Science Research Department, Safiabad Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Dezful, Iran

[*]Corresponding Author Email: a.khazaei@areeo.ac.ir

Received: 08-11-2025 **revised:** 07-12-2025 **Accepted**: 30-12-2025

Abstract

Introduction: Water scarcity in the arid and semi-arid regions of Iran has challenged sustainable forage production. Forage sorghum, due to its C4 photosynthetic pathway, extensive root system, and favorable tolerance to heat and drought, is a strategic option for forage supply; however, genotype performance depends on genetic potential, environmental conditions, and genotype × environment interaction. Therefore, selection based solely on mean yield cannot guarantee cultivar adaptation. Given the limited information on the stability of new and domestic forage sorghum hybrids, this study aimed to evaluate genotype × environment interaction, determine forage yield stability, and identify high-yielding hybrids with general or specific adaptation across different regions of Iran.

Materials and Methods: The experiment was conducted during the 2023 and 2024 growing seasons at five locations (Karaj, Borujerd, Gorgan, Sari, and Dezful) using a randomized complete block design with three replications. Eleven promising forage sorghum hybrids, designated KHFS1 through KHFS11, were evaluated together with the check cultivar Speedfeed. Each experimental plot consisted of four 4-m-long rows, with inter-row and intra-row spacings of 60 and 8 cm, respectively. The number of leaves and tillers per plant and fresh and dry forage yields were measured over two cuts. After verifying data normality and variance homogeneity, combined analysis of variance was performed, and means were compared using the least significant difference (LSD) test at the 5% probability level. Forage yield stability was assessed using the additive main effects and multiplicative interaction (AMMI) model, AMMI stability value (ASV), and weighted average of absolute scores (WAAS) index.

Results: The hybrids differed significantly ($p\leq0.01$) in leaves and tillers per plant and fresh and dry forage yields in both cuts and their totals. The year × location × genotype interaction was significant ($p\leq0.01$) for all traits except leaves per plant in the first cut, demonstrating differential hybrid responses across environments. The main effect of environment accounted for 69.27% of the total variation in dry forage yield, whereas genotype and genotype × environment interaction accounted for 2.93% and 27.81% of the variation, respectively. Analysis of the genotype × environment interaction using the AMMI model identified four significant interaction principal components, which explained 43.45%, 27.12%, 11.16%, and 6.78% of the interaction variance, respectively. Hybrid KHFS3 produced the highest total fresh and dry forage yields, amounting to 145.5 and 35.2 t ha^{-1}, respectively, and exceeded Speedfeed by 18.7% in fresh forage yield and 12.5% in dry forage yield. This hybrid showed specific adaptation to the humid environments of northern Iran. Hybrid KHFS10, with approximately 141.3 t ha^{-1} fresh forage and 33.8 t ha^{-1} dry forage, combined high productivity with a relatively consistent response across environments. Hybrid KHFS11 was the most stable genotype, although its yield was below the overall experimental mean. The biplot analyses and WAAS index confirmed the desirable combination of high yield and stability in KHFS10 and the high yield potential of KHFS3, whereas KHFS5 and Speedfeed exhibited specific adaptation to hot and dry environments.

Conclusion: Because of its combination of high forage yield and desirable stability, KHFS10 is a promising candidate for cultivation in the central and western semi-arid regions of Iran. Hybrid KHFS3 is recommended for the humid and temperate regions of northern Iran, whereas KHFS11 may be suitable for unfavorable and high-risk environments. These findings facilitate the targeted selection of forage sorghum hybrids, and the superior hybrids identified in this study could be considered for the release of domestic cultivars and incorporated into breeding programs aimed at improving forage yield stability.

Keywords: Adaptability, Forage yield, Genotype × environment interaction, Leaves per plant, Tillers per plant

Citation: Khazaei, A., olzardi., F., Feyzbakhsh., M. T., Shahverdi, M., Ghorbani, H., & Shoushi Dezfuli, A. A. (2026). Evaluation of yield stability in promising forage sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) hybrids using AMMI analysis. *Plant Production and Genetics*, *7*(2), 201-216. https://doi.org/10.22034/plant.2025.144872.1178

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.

تولید و ژنتیک گیاهی

https://doi.org/10.22034/plant.2025.144872.1178

ارزیابی پایداری عملکرد هیبریدهای امیدبخش سورگوم علوفه‌ای (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) به روش تجزیه امی

عظیم خزائی[*1]، فرید گل‌زردی[1]، محمدتقی فیض‌بخش[2]، محمد شاهوردی[3]، حمیدرضا قربانی[4]، احمدعلی شوشی دزفولی[5]

۱. مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران

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

۳. بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان لرستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، بروجرد، ایران

۴. بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان مازندران، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ساری، ایران

۵. بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی صفی‌آباد، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، دزفول، ایران

*ایمیل نویسنده مسئول: a.khazaei@areeo.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۱۷ **تاریخ بازنگری:** ۱۴۰۴/۰۹/۱۶ **تاریخ پذیرش:** ۱۴۰۴/۱۰/۰۹

چکیده

مقدمه: محدودیت آب در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک ایران، تولید پایدار علوفه را با چالش روبه‌رو کرده است. سورگوم علوفه‌ای با مسیر فتوسنتزی چهارکربنه، ریشه‌های گسترده و تحمل مطلوب به گرما و خشکی، گزینه‌ای راهبردی است؛ اما عملکرد ژنوتیپ‌ها به ظرفیت ژنتیکی، شرایط محیطی و برهم‌کنش ژنوتیپ × محیط وابسته است و انتخاب بر پایه میانگین عملکرد به‌تنهایی سازگاری را تضمین نمی‌کند. بنابراین، این پژوهش با هدف ارزیابی برهم‌کنش ژنوتیپ × محیط، تعیین پایداری عملکرد علوفه و شناسایی هیبریدهای پرمحصول با سازگاری عمومی یا اختصاصی در مناطق مختلف ایران انجام شد.

مواد و روش‌ها: آزمایش طی سال‌های زراعی ۱۴۰۲ و ۱۴۰۳ در پنج منطقه (کرج، بروجرد، گرگان، ساری و دزفول) در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. در این مطالعه، یازده هیبرید امیدبخش سورگوم علوفه‌ای شامل KHFS1 تا KHFS11 همراه با رقم شاهد (اسپیدفید) مورد بررسی قرار گرفتند. هر کرت شامل چهار خط چهار متری با فاصله بین ردیف ۶۰ سانتی‌متر و فاصله بین بوته هشت سانتی‌متر بود. تعداد برگ و پنجه در بوته و عملکرد علوفه تر و خشک در دو چین اندازه‌گیری شد. پس از تأیید نرمال‌بودن پراکنش داده‌ها و همگنی واریانس‌ها، تجزیه واریانس مرکب انجام شد و مقایسه میانگین‌ها بر اساس آزمون حداقل تفاوت معنادار (LSD) در سطح احتمال پنج درصد صورت گرفت. پایداری عملکرد علوفه با استفاده از مدل اثرات اصلی افزایشی و اثر متقابل ضرب‌پذیر (AMMI)، ارزش پایداری امی (ASV) و شاخص میانگین وزنی نمرات مطلق (WAAS) ارزیابی شد.

نتایج: بین هیبریدهای مورد بررسی تفاوت معنی‌داری ($p\leq0.01$) از نظر تعداد برگ در بوته، تعداد پنجه در بوته و عملکرد علوفه تر و خشک دو چین و مجموع آن‌ها وجود داشت. اثر متقابل سال × مکان × ژنوتیپ نیز بر همه صفات به جز تعداد برگ در بوته چین اول معنی‌دار بود ($p\leq0.01$) که پاسخ متفاوت هیبریدهای مورد بررسی به محیط‌ها را نشان داد. سهم اثر اصلی محیط در تغییرات کل عملکرد علوفه خشک ۶۹/۲۷ درصد بود، در حالی که اثرات ژنوتیپ و برهمکنش ژنوتیپ × محیط به‌ترتیب ۲/۹۳ و ۲۷/۸۱ درصد از تغییرات را به خود اختصاص دادند. تحلیل برهمکنش ژنوتیپ × محیط با مدل AMMI چهار مؤلفه اصلی معنی‌دار را شناسایی کرد که به‌ترتیب ۴۳/۴۵، ۲۷/۱۲، ۱۱/۱۶ و ۶/۷۸ درصد از واریانس برهمکنش را توضیح دادند. هیبرید KHFS3 با مجموع عملکرد علوفه تر و خشک به‌ترتیب ۱۴۵/۵ و ۳۵/۲ تن در هکتار، بالاترین عملکرد را داشت و در مقایسه با اسپیدفید به‌ترتیب ۱۸/۷ و ۱۲/۵ درصد برتری نشان داد. این هیبرید با محیط‌های مرطوب شمالی سازگار بود. هیبرید KHFS10 با حدود ۱۴۱/۳ تن علوفه تر و ۳۳/۸ تن علوفه خشک در هکتار، هم‌زمان عملکرد بالا و واکنش یکنواختی در محیط‌های مختلف داشت. هیبرید KHFS11 پایدارترین ژنوتیپ بود، اما عملکردی کمتر از میانگین آزمایش نشان داد. نتایج بای‌پلات‌ها و شاخص WAAS، برتری هم‌زمان عملکرد و پایداری هیبرید KHFS10 و عملکرد بالای KHFS3 را تأیید کرد؛ درحالی‌که هیبریدهای KHFS50 و اسپیدفید سازگاری اختصاصی با محیط‌های گرم و خشک نشان دادند.

نتیجه‌گیری: هیبرید KHFS10 به‌دلیل ترکیب عملکرد بالا و پایداری مناسب، گزینه‌ای امیدبخش برای کشت در نواحی نیمه‌خشک مرکزی و غربی کشور است. هیبرید KHFS3 برای مناطق مرطوب و معتدل شمالی و KHFS11 برای شرایط نامساعد و پرریسک توصیه می‌شوند. این یافته‌ها انتخاب هدفمند هیبریدها را تسهیل می‌کند و هیبریدهای برتر می‌توانند در معرفی ارقام داخلی و برنامه‌های اصلاحی با هدف افزایش پایداری تولید علوفه به‌کار گرفته شوند.

کلیدواژگان: برهمکنش ژنوتیپ × محیط، تعداد برگ در بوته، تعداد پنجه در بوته، سازگاری، عملکرد علوفه

منبع: خزائی، ع.، گل‌زردی، ف.، فیض‌بخش، م. ت.، عباسی، س.، و زارعی، ل. (۱۴۰۵). ارزیابی پایداری عملکرد هیبریدهای امیدبخش سورگوم علوفه‌ای (*Sorghum bicolor* L.) Moench) به‌روش تجزیه امی، *مجله تولید و ژنتیک گیاهی*، *۷*(۲) ، ۲۱۶-۲۰۱. https://doi.org/10.22034/plant.2025.144872.1178

CC BY

مقدمه

با توجه به قرارگیری بخش عمده‌ای از کشور در مناطق خشک و نیمه‌خشک، کمبود بارندگی و محدودیت منابع آب شیرین اصلی‌ترین چالش کشاورزان در این مناطق است (Baghdadi *et al*., 2023). بنابراین، برای بیشینه‌سازی بهره‌وری محصولات زراعی با منابع محدود آب و تأمین نیازهای غذایی دام و طیور، کشت گیاهان پرمحصول و متحمل به خشکی مانند سورگوم ضروری است (Gholami *et al*., 2023). سورگوم با تحمل بالا به تنش‌های خشکی و گرما، سیستم ریشه‌ای گسترده و مسیر فتوسنتزی چهارکربنه، گیاهی کلیدی در مناطق خشک جهان محسوب می‌شود (Tavazoh *et al*., 2024). معرفی هیبریدهای سازگار و پرمحصول این گیاه، راهکاری اساسی برای تأمین علوفه دام در ایران به شمار می‌رود (Feyzbakhsh, 2016; Khazaei *et al*., 2021a). ژنوتیپ‌های سازگار در دامنه وسیعی از محیط‌ها عملکرد بالا و پایداری مناسبی نشان می‌دهند (Etaati *et al*., 2023). در مقابل، ژنوتیپ‌های با سازگاری محدود تنها در شرایط مطلوب عملکرد بالایی دارند (Khazaei *et al*., 2023b).

عملکرد نهایی هر ژنوتیپ تحت تأثیر ظرفیت ژنتیکی، عوامل محیطی و برهمکنش ژنوتیپ × محیط قرار می‌گیرد (Yan *et al*., 2007). بنابراین، ارزیابی پایداری عملکرد نیازمند بررسی این برهمکنش است. روش‌های متنوعی برای تجزیه برهمکنش ژنوتیپ × محیط پیشنهاد شده که مدل اثرات اصلی افزایشی و اثر متقابل ضرب‌پذیر (AMMI) از کارآمدترین روش‌های چندمتغیره است و ترکیبی از تجزیه واریانس و تجزیه به مؤلفه‌های اصلی محسوب می‌شود (Gauch, 1992; Khazaei *et al*., 2022). در مطالعات متعددی برای ارزیابی برهمکنش ژنوتیپ × محیط و پایداری عملکرد ژنوتیپ‌های سورگوم از روش تجزیه AMMI استفاده شده است (Al-Naggar *et al*., 2018; Khazaei *et al*., 2021b; Khazaei *et al*., 2023b). Basafa و همکاران (2015) در ارزیابی برهمکنش ژنوتیپ و محیط بر عملکرد علوفه ۱۵ لاین سورگوم علوفه‌ای با استفاده از روش تجزیه AMMI و آماره‌های پایداری، اثرات اصلی ژنوتیپ، محیط، برهمکنش آن‌ها و دو مؤلفه اول اثر متقابل را معنی‌دار گزارش کردند. در این مطالعه ژنوتیپ‌های KFS18 و KFS7 با عملکرد بالاتر از میانگین، بیشترین پایداری را نشان دادند، در حالی که KFS1 و KFS3 به‌دلیل تأثیر بالا در برهمکنش، ناپایدارترین ژنوتیپ‌ها بودند. Shiri (2016) در بررسی هفت رقم سورگوم علوفه‌ای، بر اساس تغییرات ژنوتیپ و برهمکنش ژنوتیپ و محیط، رقم Nectar را برتر در عملکرد علوفه تر در هر دو کشت تابستانه و بهاره، و علوفه خشک در کشت تابستانه دانست؛ رقم Speedfeed نیز در کشت بهاره برتر بود. بر اساس بای‌پلات رقم ایده‌آل، Nectar با پایداری و میانگین عملکرد بالا، سازگاری عمومی بیشتری داشت. Al-Naggar و همکاران (2018) در ارزیابی پایداری عملکرد ژنوتیپ‌های سورگوم در مصر با روش تجزیه AMMI، ژنوتیپ‌های BTX TSC-20 و ICSB-1808 را با عملکرد و پایداری بالا معرفی کردند، در حالی که ICSB-8001 و BTX-407 علی‌رغم پایداری بالا، عملکرد متوسطی داشتند.

هر چند تحقیقات زیادی در مورد بررسی پایداری عملکرد ژنوتیپ‌های سورگوم انجام شده است اما مطالعات قبلی بر ارزیابی لاین‌های آزادگرده‌افشان (OP) تمرکز داشته‌اند و ارزیابی پایداری عملکرد هیبریدهای امیدبخش و جدید سورگوم علوفه‌ای در شرایط متنوع آب و هوایی ایران محدود بوده است. هیبریدهای سورگوم علوفه‌ای مورد بررسی در این آزمایش در داخل کشور تولید شده‌اند و ژنوتیپ‌های برتر آن‌ها می‌توانند به عنوان اولین هیبریدهای داخلی معرفی شوند. علاوه بر این، از ترکیب روش تجزیه AMMI با شاخص میانگین وزنی نمرات مطلق (WAAS) برای شناسایی ژنوتیپ‌های برتر سورگوم کمتر استفاده شده است. این مطالعه با هدف ارزیابی برهمکنش ژنوتیپ × محیط و پایداری عملکرد علوفه هیبریدهای امیدبخش سورگوم علوفه‌ای با استفاده از روش تجزیه AMMI، به منظور شناسایی هیبریدهای پایدار با عملکرد بالا در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران انجام شد. این رویکرد نوآورانه می‌تواند مبنایی برای برنامه‌های اصلاحی جهت افزایش بهره‌وری علوفه فراهم کند.

مواد و روش‌ها

آزمایش در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار، طی دو سال زراعی (۱۴۰۳-۱۴۰۲) در پنج منطقه کرج، بروجرد، گرگان، ساری و دزفول اجرا گردید. در این مطالعه، ۱۱ هیبرید امیدبخش سورگوم علوفه‌ای (KHFS1، KHFS2، KHFS3، KHFS4، KHFS5، KHFS6، KHFS7، KHFS8، KHFS9، KHFS10 و KHFS11)

همراه با رقم شاهد (اسپیدفید) مورد بررسی قرار گرفتند. نخستین تلاقی این هیبریدها در سال ۱۳۹۶ در مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر واقع در کرج انجام گرفت. با استفاده از لاین‌های نرعقیم (جفت لاین‌ها) و ارقام و لاین‌های نربارور و گرده‌دهنده، تعداد زیادی هیبرید F_1 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 گردیدند (جدول ۱).

جدول ۱- مشخصات هیبریدهای امیدبخش سورگوم علوفه‌ای و تلاقی والدین آن‌ها

شماره هیبرید	کد هیبرید	والدین
۱	KHFS1	♀ AICS88005 × ♂ رقم بهشت
۲	KHFS2	♀ AICS88005 × ♂ توده محلی زابل
۳	KHFS3	♀ AICS88005 × ♂ رقم پگاه
۴	KHFS4	♀ AICS11 × Rsp ♂
۵	KHFS5	♀ AS9 × ♂ رقم بهشت
۶	KHFS6	♀ AICS84 × Rsp ♂
۷	KHFS7	♀ A3 × Rsp ♂
۸	KHFS8	♀ A18 × R109 ♂
۹	KHFS9	♀ A1 × R109 ♂
۱۰	KHFS10	♀ A2 × R109 ♂
۱۱	KHFS11	♀ F2(M) × R109 ♂
۱۲	اسپیدفید	شاهد

هر کرت آزمایشی شامل چهار خط چهار متری با فاصله ردیف‌ها ۶۰ سانتی‌متر و فاصله بوته‌ها روی خطوط 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 در مرحله ۶-۴ برگی، 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.

صفات مهم زراعی شامل تعداد برگ در بوته، پنجه در بوته و عملکرد علوفه تر و خشک اندازه‌گیری و ثبت گردید. تعداد برگ در بوته و تعداد پنجه در بوته بر اساس شمارش مستقیم بر روی ده بوته تصادفی از دو ردیف میانی هر کرت در زمان برداشت هر چین (آغاز گلدهی) اندازه‌گیری شد. برای تعیین عملکرد علوفه تر، پس از حذف نیم متر ابتدایی و انتهایی هر کرت به عنوان اثرات حاشیه‌ای، دو ردیف میانی برداشت شد و کل زیست‌توده تازه در هر کرت با ترازوی دیجیتال وزن شد. سپس با توجه به مساحت زمین نمونه‌گیری‌شده (۳/۶ مترمربع)، عملکرد به تن در هکتار تبدیل گردید. برای محاسبه عملکرد علوفه خشک، از هر کرت سه بوته به طور تصادفی انتخاب و توزین شد و تا زمان رسیدن به وزن ثابت، درون آون ۶۵ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد. سپس وزن نمونه‌های خشک‌شده اندازه‌گیری و درصد ماده خشک محاسبه شد. در نهایت عملکرد علوفه خشک بر اساس درصد ماده خشک و وزن علوفه تر در هر کرت بر حسب تن در هکتار محاسبه گردید.

پس از ثبت داده‌ها و اطمینان از برقراری مفروضات تجزیه واریانس، تجزیه واریانس مرکب روی داده‌ها انجام شد. برای اطمینان از برقراری مفروضات آنالیز واریانس، نرمال بودن توزیع داده‌ها با استفاده از آزمون شاپیرو-ویلک (Shapiro-Wilk) و همگنی واریانس‌ها بین محیط‌های آزمایشی با آزمون بارتلت (Bartlett) بررسی شد. این بررسی‌ها برای هر دو تحلیل ANOVA و AMMI انجام شد تا اطمینان حاصل شود که باقی‌مانده‌ها از توزیع نرمال پیروی می‌کنند و واریانس‌ها همگن هستند. در این مطالعه نتایج آزمون‌ها نشان داد که توزیع داده‌ها به‌طور قابل‌قبول نرمال و واریانس‌ها همگن بوده‌اند و نیازی به تبدیل یا استانداردسازی داده‌ها نبود.

برای تجزیه پایداری از روش 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)

$$Y_{ger} = \mu + \alpha_g + \beta_e + \sum \lambda_n \gamma_{gn} \delta_{en} + p_{ge} + \varepsilon_{ger}$$

در این فرمول Y_{ger} عملکرد ژنوتیپ gام در محیط eام در تکرار rام است؛ μ میانگین کل آزمایش؛ α_g و β_e به‌ترتیب اثرات اصلی ژنوتیپ و محیط؛ λ_n مقدار ویژه برای محور مؤلفه اصلی nام؛ γ_{gn} بردار ویژه ژنوتیپ برای محور nام؛ δ_{en} امتیاز محیط برای محیط e روی محور nام؛ p_{ge} مقدار باقیمانده یا نویز(Noise) و ε_{ger} عبارت مربوط به خطاست. 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 (α_g) به‌صورت انحراف ژنوتیپ از میانگین کل و اثر محیطی (β_e) به‌صورت انحراف محیط از میانگین کل برآورد می‌شود (Gauch, 1992). بخش دوم ($\sum \lambda_n \gamma_{gn} \delta_{en}$)، یعنی قسمت ضرب‌پذیر مدل، از تجزیه به مؤلفه‌های اصلی برای تجزیه اثر متقابل ژنوتیپ و محیط به یک تا N مؤلفه اصلی بهره می‌گیرد، اما باید توجه داشت که در روش AMMI، محاسبات بر روی مقادیر اثرات متقابل ژنوتیپ و محیط صورت می‌گیرد، در حالی که در مؤلفه‌های اصلی، محاسبات بر روی تفاوت داده‌های اصلی از میانگین کل داده‌ها انجام می‌شود (Gauch,1988). تعداد مؤلفه‌های اصلی معنی‌دار (IPCAs) با استفاده از آزمون F متوالی (Sequential F-test) تعیین شد (Olivoto & Lúcio, 2020). همچنین، برای محاسبه آماره پایداری ASV از رابطه ۲ استفاده گردید (Purchase, 1997):

رابطه (۲)

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

برای تجزیه واریانس و مقایسه میانگین‌ها از نرم‌افزار SAS (۹/۰) و برای تجزیه پایداری از بسته Metan 1.19.0 در محیط نرم‌افزار R (Olivoto & Lúcio, 2020) استفاده شد. مقایسه میانگین‌ها بر اساس آزمون حداقل تفاوت معنادار (LSD) در سطح احتمال پنج درصد صورت گرفت.

نتایج و بحث

تجزیه واریانس مرکب صفات مورد بررسی در هیبریدهای امیدبخش سورگوم علوفه‌ای طی دو سال و پنج مکان در جدول ۲ ارائه شده است. اثر سال بر تمام صفات به جز تعداد برگ در چین دوم معنی‌دار ($p\leq0.01$) بود. اثر مکان و برهمکنش سال × مکان نیز بر تمام صفات مورد بررسی معنی‌دار ($p\leq0.01$) گردید. ژنوتیپ‌ها از نظر تمام صفات اندازه‌گیری‌شده (تعداد برگ، تعداد پنجه، عملکرد علوفه تر و خشک در چین‌های اول و دوم و مجموع آن‌ها) در سطح احتمال یک درصد اختلاف معنی‌داری نشان دادند. اثر متقابل سال × ژنوتیپ بر تعداد پنجه در چین دوم در سطح احتمال پنج درصد و بر سایر صفات در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار گردید (جدول ۲). اثر متقابل مکان × ژنوتیپ بر تمام صفات در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود، که نشان‌دهنده رفتار متفاوت هیبریدها در مناطق مختلف است. همچنین، اثر متقابل سال × مکان × ژنوتیپ بر تعداد برگ در چین اول غیرمعنی‌دار بود، اما برای سایر صفات در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۲). نتایج تجزیه واریانس مرکب وجود تنوع ژنتیکی قابل توجه میان هیبریدها را تأیید کرد که با گزارش Khazaei و همکاران (2023a) همخوانی دارد. همچنین، غالب بودن سهم محیط و برهمکنش ژنوتیپ × محیط با یافته‌های پیشین در سورگوم علوفه‌ای همخوانی دارد (Al-Naggar *et al*., 2018; Khazaei *et al*., 2023b) و نشان می‌دهد که انتخاب هیبریدهای پایدار در محیط‌های متنوع ایران ضروری است.

مقایسه میانگین اثر اصلی سال نشان داد که در سال ۱۴۰۳ تعداد پنجه در بوته، تعداد برگ در بوته و عملکرد علوفه تر و خشک نسبت به سال ۱۴۰۲ بالاتر بود، که احتمالاً به‌دلیل شرایط آب و هوایی مساعدتر در سال دوم است (جدول ۳). بیشترین و کمترین تعداد پنجه در چین اول (به‌ترتیب ۲/۵ و ۱/۲ پنجه در بوته) به‌ترتیب در دزفول و ساری ثبت گردید، درحالی‌که حداکثر و حداقل تعداد پنجه در چین دوم (به‌ترتیب ۴/۱ و ۲/۱ پنجه در بوته) به‌ترتیب در کرج و بروجرد مشاهده شد. به طور کلی تعداد پنجه در چین دوم بیشتر از چین اول بود که می‌تواند با تغییر غالبیت انتهایی در گیاه مرتبط باشد. برداشت چین اول می‌تواند باعث ایجاد اختلال در جریان هورمون اکسین از بخش‌های انتهایی گیاه به سمت پایین بوته شود. این هورمون به طور طبیعی رشد جوانه‌های جانبی (پنجه‌ها) را مهار می‌کند و با حذف بخش هوایی، این بازدارندگی کاهش یافته و جوانه‌ها فرصت بیشتری برای رشد پیدا می‌کنند (Mahrokh *et al*., 2023).

بیشترین تعداد برگ در چین اول و دوم (به‌ترتیب ۱۳/۸ و ۱۴/۴ برگ در بوته) در دزفول و کمترین تعداد (به‌ترتیب ۱۰/۵ و ۸/۹ برگ در بوته) در ساری ثبت گردید (جدول ۳). حداکثر عملکرد علوفه تر در چین اول و مجموع دو چین (به‌ترتیب ۹۰/۳ و ۱۵۵/۴ تن در هکتار) در بروجرد ثبت گردید، درحالی‌که بیشترین عملکرد علوفه خشک در چین دوم و مجموع دو چین (به‌ترتیب ۲۴/۴ و ۴۰/۲ تن در هکتار) در دزفول به‌دست آمد (جدول ۳). این برتری احتمالاً به شرایط اقلیمی گرم و خشک دزفول (دمای بالا و طول روز طولانی) مربوط است که رشد رویشی سریع‌تر، پنجه‌زنی بیشتر در چین دوم و تجمع بیوماس بالاتری را در سورگوم علوفه‌ای (با مسیر فتوسنتزی چهارکربنه و تحمل بالا به گرما) تسهیل می‌کند. در مقابل، محیط‌های شمالی مانند گرگان و ساری با رطوبت بالاتر و دمای معتدل‌تر، رشد اولیه خوبی فراهم کردند اما در چین دوم به‌دلیل کاهش دما و رطوبت نسبی، عملکرد کمتری نشان دادند (Khazaei *et al*., 2023b).

بر اساس نتایج مقایسه میانگین صفات مورد بررسی در هیبریدها، بیشترین تعداد پنجه در چین اول و دوم (به‌ترتیب ۲/۱ و ۳/۴ پنجه در بوته) در هیبرید KHFS7 ثبت شد، هر چند تفاوت معنی‌داری با هیبریدهای KHFS4، KHFS6 و اسپیدفید نداشت (جدول ۴). هیبریدهای KHFS2 و KHFS3 نیز کمترین تعداد پنجه را در هر دو چین نشان دادند. بیشترین تعداد برگ در چین اول (۱۲/۸ برگ در بوته) در هیبرید KHFS2 ثبت شد، هر چند تفاوت معنی‌داری با هیبریدهای KHFS1 و KHFS3 نداشت. هیبریدهای KHFS8، KHFS2 و KHFS10 نیز از نظر تعداد برگ در چین دوم برتری داشتند، درحالی‌که حداقل تعداد برگ در چین دوم در هیبریدهای KHFS7، KHFS6 و KHFS4 مشاهده شد (جدول ۴). هیبرید KHFS3 با عملکرد علوفه تر ۸۲/۳ تن در هکتار در چین اول و ۶۳/۳ تن در هکتار در چین دوم (در مجموع ۱۴۵/۵ تن در هکتار) و عملکرد علوفه خشک ۱۷/۵ تن در هکتار در چین اول و ۱۸/۰ تن در هکتار در چین دوم (در مجموع ۳۵/۲ تن در هکتار)، برترین ژنوتیپ از نظر عملکرد علوفه تر و خشک بود، که نسبت به هیبرید شاهد (با مجموع عملکرد علوفه تر و خشک به‌ترتیب ۱۲۲/۶ و ۳۱/۳ تن در هکتار) برتری ۱۸/۷ درصدی در تولید علوفه تر و ۱۲/۵ درصدی در تولید علوفه خشک نشان داد (جدول ۴). هیبرید KHFS10 نیز با تولید به‌ترتیب ۶۳/۳ و ۱۴۱/۳ تن علوفه تر در هکتار در چین دوم و مجموع دو چین، جزو ژنوتیپ‌های برتر قرار گرفت.

جدول ۲- تجزیه واریانس مرکب صفات مورد بررسی در هیبریدهای امیدبخش سورگوم علوفه‌ای در دو سال و پنج مکان

منبع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات								
		تعداد پنجه در بوته		تعداد برگ در بوته		عملکرد علوفه تر			عملکرد علوفه خشک		
		چین اول	چین دوم	چین اول	چین دوم	چین اول	چین دوم	مجموع	چین اول	چین دوم	مجموع
سال	۱	۰/۸۹**	۵/۵۸**	۱۳۱/۶**	۰/۳^{ns}	۲۷۷۸/۹**	۲۷۱۸**	۱۰۹۸۸**	۶۶/۱**	۳۱۴/۰**	۶۶۶**
مکان	۴	۱۸/۳۰**	۳۹/۵۲**	۱۱۲/۰**	۲۸۳/۷**	۱۱۹۵۰/۱**	۱۰۵۲۶**	۳۰۷۳۸**	۶۲/۴**	۲۵۸۳/۵**	۲۷۳۳**
سال×مکان	۴	۸/۲۹**	۲۱/۰۲**	۱۶/۹**	۸۵/۸**	۳۳۱۲/۶**	۲۶۸۱**	۶۷۳۸**	۱۵۸/۵**	۱۶۰/۵**	۱۳۱**
خطا ۱	۲۰	۰/۵۵	۰/۹۳	۱/۶	۱/۳	۸۷/۵	۶۷	۲۲۱	۵/۰	۸/۸	۲۲
ژنوتیپ	۱۱	۲/۱۹**	۳/۸۶**	۱۰/۸**	۲۱/۱**	۱۷۶۸/۱**	۵۷۸**	۳۷۹۵**	۴۳/۰**	۴۹/۷**	۱۳۴**
سال × ژنوتیپ	۱۱	۰/۲۹**	۰/۴۶*	۴/۳**	۵/۴**	۲۶۶/۹**	۳۹۴**	۸۰۲**	۱۵/۲**	۳۲/۰**	۷۰**
مکان × ژنوتیپ	۴۴	۰/۶۲**	۱/۱۲**	۴/۰**	۲/۳**	۳۴۹/۹**	۴۰۱**	۸۰۳**	۳۲/۳**	۴۵/۵**	۸۰**
سال × مکان × ژنوتیپ	۴۴	۰/۷۲**	۰/۸۷**	۰/۹^{ns}	۱/۹**	۲۴۷/۵**	۲۵۳**	۶۲۲**	۲۲/۳**	۲۷/۵**	۵۴**
خطا ۲	۲۲۰	۰/۱۳	۰/۲۳	۱/۰	۱/۰	۷۱/۳	۷۹	۱۹۳	۵/۴	۷/۳	۱۵

^{ns}، * و **: به‌ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد

جدول ۳- مقایسه میانگین اثرات اصلی سال و مکان بر صفات مورد بررسی در هیبریدهای امیدبخش سورگوم علوفه‌ای

فاکتورهای آزمایشی	تعداد پنجه در بوته		تعداد برگ در بوته		عملکرد علوفه تر (تن در هکتار)			عملکرد علوفه خشک (تن در هکتار)		
	چین اول	چین دوم	چین اول	چین دوم	چین اول	چین دوم	مجموع	چین اول	چین دوم	مجموع
سال										
۱۴۰۲	۱/۷b	۲/۸b	۱۱/۱b	۱۱/۱a	۶۷/۸b	۵۴/۸b	۱۲۲/۷b	۱۵/۵b	۱۴/۴b	۳۰/۰b
۱۴۰۳	۱/۸a	۳/۰a	۱۲/۴a	۱۱/۱a	۷۳/۴a	۶۰/۳a	۱۳۳/۷a	۱۶/۴a	۱۶/۳a	۳۲/۷a
مکان										
کرج	۱/۷b	۴/۱a	۱۱/۷b	۱۰/۸b	۷۳/۵b	۶۶/۱a	۱۳۹/۶b	۱۶/۶ab	۱۴/۱c	۳۰/۷c
بروجرد	۱/۷b	۲/۱c	۱۱/۰c	۱۰/۶b	۹۰/۳a	۶۵/۰a	۱۵۵/۴a	۱۷/۱a	۱۲/۳d	۲۹/۴c
دزفول	۲/۵a	۲/۹b	۱۳/۸a	۱۴/۴a	۶۲/۱c	۶۷/۶a	۱۲۹/۷c	۱۵/۸bc	۲۴/۴a	۴۰/۲a
گرگان	۱/۶b	۲/۴c	۱۱/۷b	۱۰/۸b	۷۰/۵b	۴۱/۶c	۱۱۲/۱d	۱۴/۷d	۸/۵e	۲۳/۲d
ساری	۱/۲c	۲/۹b	۱۰/۵d	۸/۹c	۵۶/۷d	۴۷/۵b	۱۰۴/۲e	۱۵/۶c	۱۷/۵b	۳۳/۰b

در هر ستون و برای هر عامل، میانگین‌هایی که دارای حروف مشترک هستند بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند.

جدول ۴- مقایسه میانگین صفات مورد بررسی در هیبریدهای امیدبخش سورگوم علوفه‌ای

ژنوتیپ	تعداد پنجه در بوته		تعداد برگ در بوته		عملکرد علوفه تر (تن در هکتار)			عملکرد علوفه خشک (تن در هکتار)		
	چین اول	چین دوم	چین اول	چین دوم	چین اول	چین دوم	مجموع	چین اول	چین دوم	مجموع
KHFS1	۱/۶de	۲/۷c-e	۱۲/۴a-c	۱۱/۶bc	۷۶/۳b	۵۷/۶b-d	۱۳۳/۸b	۱۶/۳a-d	۱۴/۲de	۳۰/۵d-f
KHFS2	۱/۴f	۲/۳f	۱۲/۸a	۱۲/۰ab	۷۷/۴b	۵۶/۲c-e	۱۳۳/۶b	۱۷/۵a	۱۴/۱de	۳۱/۶c-e
KHFS3	۱/۴f	۲/۳f	۱۲/۵ab	۱۱/۷bc	۸۲/۳a	۶۳/۳a	۱۴۵/۵a	۱۷/۲ab	۱۸/۰a	۳۵/۲a
KHFS4	۲/۰ab	۳/۳a	۱۱/۰h	۱۰/۲ef	۶۴/۰e	۵۶/۶cd	۱۲۰/۵d	۱۴/۶fg	۱۵/۳cd	۲۹/۹ef
KHFS5	۱/۵ef	۲/۷de	۱۲/۰b-d	۱۱/۳cd	۷۵/۱bc	۵۴/۴de	۱۲۹/۵bc	۱۶/۰b-e	۱۴/۶de	۳۰/۶d-f
KHFS6	۲/۰ab	۳/۳a	۱۱/۴f-h	۱۰/۰ef	۶۰/۸ef	۵۱/۷ef	۱۱۲/۵e	۱۵/۰ef	۱۴/۲de	۲۹/۳f
KHFS7	۲/۱a	۳/۴a	۱۱/۲gh	۹/۸f	۵۷/۰f	۴۹/۰f	۱۰۶/۱e	۱۳/۵g	۱۳/۷e	۲۷/۲g
KHFS8	۱/۸bc	۲/۹cd	۱۱/۹c-e	۱۲/۳a	۷۰/۰d	۶۰/۳a-c	۱۳۰/۳b	۱۶/۵a-c	۱۶/۷ab	۳۳/۲bc
KHFS9	۱/۶de	۲/۸c-e	۱۱/۲gh	۱۱/۱d	۷۱/۷cd	۶۱/۴ab	۱۳۳/۱b	۱۶/۷a-c	۱۵/۳cd	۳۲/۰b-d
KHFS10	۱/۶de	۲/۶e	۱۱/۹d-f	۱۱/۸ab	۷۸/۰b	۶۳/۳a	۱۴۱/۳a	۱۷/۲ab	۱۶/۶a-c	۳۳/۸ab
KHFS11	۱/۷cd	۳/۰bc	۱۱/۲gh	۱۱/۱d	۷۰/۱d	۵۹/۴a-c	۱۲۹/۴bc	۱۵/۹c-e	۱۵/۵b-d	۳۱/۴c-e
اسپیدفید	۲/۰ab	۳/۲ab	۱۱/۵e-g	۱۰/۳e	۶۴/۸e	۵۷/۸b-d	۱۲۲/۶cd	۱۵/۲d-f	۱۶/۱bc	۳۱/۳c-e

در هر ستون، میانگین‌هایی که دارای حروف مشترک هستند بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند.

بیشترین عملکرد علوفه خشک در چین اول و دوم (به‌ترتیب ۱۷/۵ تن در هکتار) در هیبرید KHFS2 ثبت شد که ۱۵ درصد بیشتر از هیبرید اسپیدفید بود. به طور کلی از لحاظ مجموع عملکرد علوفه تر و خشک، هیبریدهای KHFS3 و KHFS10 به عنوان برترین ژنوتیپ‌های آزمایش شناسایی شدند (جدول ۴).

بررسی سهم منابع تغییر در تجزیه واریانس مرکب عملکرد علوفه خشک نشان داد که اثر اصلی محیط ۶۹/۲۷ درصد از تغییرات کل را به خود اختصاص داد، در حالی که اثرات ژنوتیپ و برهمکنش ژنوتیپ × محیط به‌ترتیب ۲/۹۳ و ۲۷/۸۱ درصد بودند (جدول ۵). این توزیع واریانس بر غالب بودن عوامل محیطی در عملکرد سورگوم تأکید دارد و با یافته‌های Khazaei و همکاران (2023b) که سهم محیط را بیش از ۹۰ درصد گزارش کردند، همسو است. برای تجزیه برهمکنش ژنوتیپ × محیط، از مدل AMMI استفاده شد که چهار مؤلفه اصلی اول (IPCA1 تا IPCA4) معنی‌دار بودند و به‌ترتیب ۴۳/۴۵، ۲۷/۱۲، ۱۱/۱۶ و ۶/۷۸ درصد از واریانس برهمکنش را توجیه کردند (جدول ۵).

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

منبع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	درصد توجیه واریانس کل	درصد توجیه واریانس اثر متقابل
محیط	۹	۱۶۴۹۶	۱۸۳۲/۸۸**	۶۹/۲۷	
ژنوتیپ	۱۱	۶۹۷	۶۳/۳۶**	۲/۹۳	
ژنوتیپ × محیط	۹۹	۶۶۲۲	۶۶/۸۹**	۲۷/۸۱	۱۰۰
مؤلفه اول	۱۹	۲۸۷۷	۱۵۱/۴۴**		۴۳/۴۵
مؤلفه دوم	۱۷	۱۷۹۶	۱۰۵/۶۵**		۲۷/۱۲
مؤلفه سوم	۱۵	۷۳۹	۴۹/۲۹**		۱۱/۱۶
مؤلفه چهارم	۱۳	۴۴۹	۳۴/۵۳*		۶/۷۸
باقیمانده	۳۵	۷۶۰	۲۱/۷۱		
خطا	۲۴۰	۴۸۰۰	۲۰/۰۰		

* ، **: به‌ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد

دو مؤلفه اول در مجموع ۷۰/۵۷ درصد از تغییرات برهمکنش را توضیح دادند، که این میزان با گزارش Khazaei و همکاران (2022) در ارزیابی لاین‌های سورگوم قابل‌مقایسه است و نشان‌دهنده الگوی ساختاریافته برهمکنش است (Gauch, 1992). هیبریدهای KHFS3، KHFS5، KHFS7 و اسپیدفید با مقادیر بالای IPCA1 (مثبت یا منفی) اثر متقابل بالایی با محیط نشان دادند، در حالی که هیبریدهای KHFS2، KHFS4، KHFS10 و KHFS11 با مقادیر نزدیک به صفر IPCA1 و کمترین ASV (ارزش پایداری AMMI) پایدارترین ژنوتیپ‌ها (Yan *et al.*, 2007) بودند (جدول ۶). مولفه اصلی اول (IPCA1) با ۴۳/۵ درصد توجیه واریانس برهمکنش ژنوتیپ × محیط، بخش بزرگی از تفاوت‌های اقلیمی مناطق شمالی (مرطوب خزری) و جنوبی (گرم و خشک) را توضیح داد. محیط ساری ۱۴۰۲ با بیشترین IPCA1 مثبت (۳/۶۶+)، نماینده شرایط رطوبت بالا و دمای معتدل بود، در حالی که دزفول ۱۴۰۲ با بیشترین IPCA1 منفی (۲/۱۹-) نماینده گرمای شدید تابستانی و خشکی مناطق جنوبی کشور است. این محور باعث تغییر رتبه ژنوتیپ‌ها شد به‌نحوی‌که هیبریدهای با بیشترین IPCA1 مثبت مانند KHFS3 (۲/۱۲+) در ساری و گرگان برتر بودند. برعکس، هیبریدهای با IPCA1 منفی مانند KHFS5 (۲/۰۸-) و اسپیدفید (۲/۴۴-) در دزفول رتبه بالاتری کسب کردند. مولفه اصلی دوم (IPCA2) با ۲۷/۱ درصد توجیه واریانس برهمکنش ژنوتیپ × محیط، بیشتر نوسانات در محیط‌های معتدل کوهستانی و نیمه‌خشک مرکزی کشور را برجسته کرد. محیط ساری ۱۴۰۳ با بیشترین IPCA2 منفی (۳/۶۳-) و کرج ۱۴۰۳ با بیشترین IPCA2 مثبت (۱/۷۸+) در جهت مخالف قرار گرفتند، که احتمالاً به تفاوت در الگوی بارندگی و دما مربوط است. به‌نظر می‌رسد هیبریدهای KHFS2، KHFS4، KHFS10 و KHFS11 در محیط‌های متغیر، کاهش عملکرد اندک و سازگاری عمومی بالایی دارند و برای کشت در شرایط نامساعد قابل‌توصیه هستند. در بین هیبریدهای پایدار، KHFS10 با عملکرد بالاتر (تولید به‌ترتیب ۱۴۱ و ۳۳/۴ تن علوفه تر و خشک در هکتار) برترین ژنوتیپ بود (جدول ۶). نتایج مشابهی در مطالعه Shiri (2016) مشاهده

شد، 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 پایدار گندم استفاده کرده‌اند (Farshadfar & Sutka, 2006; Tarakanovas & Ruzgas, 2006; Mohammadi *et al*., 2007).

ارزیابی هیبریدهای برتر در هر محیط بر اساس عملکرد پیش‌بینی‌شده توسط مدل AMMI نشان داد که در مناطق مرطوب شمالی (گرگان و ساری)، هیبریدهای KHFS3، KHFS9 و KHFS8 برتری داشتند که می‌تواند به بهره‌برداری بهتر از رطوبت بالا و دمای معتدل برای رشد رویشی و پنجه‌زنی مربوط باشد (Khazaei *et al*., 2023b). در مناطق نیمه‌خشک مرکزی کشور مانند بروجرد و کرج، هیبرید اسپیدفید و KHFS5 عملکرد بالاتری نشان دادند، در حالی که هیبریدهای KHFS10 و KHFS3 در برخی سال‌ها رتبه‌های بالایی در این مناطق کسب کردند. در محیط گرم و خشک دزفول، هیبریدهای اسپیدفید و KHFS5 اغلب برتر بودند. برتری هیبریدهای اسپیدفید و KHFS5 در محیط‌های گرم و خشک احتمالاً به تحمل بالای این ژنوتیپ‌ها به گرمای شدید و خشکی مربوط است، که اجازه فتوسنتز کارآمد و تجمع بیوماس بیشتر در شرایط تنش گرمایی را می‌دهد (Baghdadi *et al*., 2023). این الگوها سازگاری اختصاصی برخی هیبریدها را برجسته می‌کنند (جدول ۷). هیبرید KHFS10 با حضور مکرر در رتبه‌های بالا در محیط‌های متنوع، سازگاری عمومی‌تری نشان داد که با نمرات IPCA نزدیک به صفر آن همخوانی دارد. این یافته‌ها بر لزوم انتخاب هیبرید بر اساس مگا-محیط‌های اقلیمی تأکید دارد به نحوی که هیبریدهای متحمل به گرما برای جنوب و هیبریدهای پرمحصول و رطوبت‌دوست برای شمال کشور قابل‌توصیه هستند (Khazaei *et al*., 2019). این رتبه‌بندی محیط‌محور، مشابه Al-Naggar و همکاران (2018) است که 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. در مطالعه حاضر، برتری محیط دزفول (گرم و خشک) در عملکرد چین دوم و مجموع، می‌تواند به تحمل بالای هیبریدهای برتر (مانند KHFS5 و اسپیدفید با نمرات IPCA1 منفی) به تنش گرمایی مربوط باشد؛ این هیبریدها احتمالاً از مکانیسم‌های فیزیولوژیکی مانند تعریق کارآمدتر، حفظ تورژسانس برگ و فتوسنتز بهینه در دماهای بالا بهره می‌برند (Tavazoh *et al*., 2024)، که مشابه ژنوتیپ‌های برتر در مصر است. در مقابل، هیبریدهای با سازگاری به محیط‌های مرطوب شمالی (مانند KHFS3 با IPCA1 مثبت) در دزفول عملکرد کمتری نشان دادند، که ممکن است به حساسیت نسبی به گرمای بیش از حد و کمبود رطوبت خاک در مراحل پایانی رشد مربوط باشد. این یافته‌ها بر اهمیت انتخاب هیبریدهای اختصاصی برای مگا-محیط‌های گرم و خشک (مانند جنوب ایران) تأکید دارد و می‌تواند مبنایی برای برنامه‌های اصلاحی هدفمند فراهم کند (Khazaei *et al*., 2023b).

جدول ۶- مقادیر مؤلفه‌های اصلی اول تا چهارم و ارزش پایداری امی برای عملکرد علوفه خشک هیبریدهای سورگوم علوفه‌ای

هیبرید	عملکرد علوفه خشک (تن در هکتار)	مؤلفه اول	مؤلفه دوم	مؤلفه سوم	مؤلفه چهارم	ارزش پایداری امی
KHFS1	۳۱/۰۴	۱/۶۷	۰/۹۷	-۰/۴۰	۰/۸۷	۲/۵۳
KHFS2	۳۲/۳۱	۰/۸۵	۱/۹۰	۲/۰۶	۰/۰۵	۱/۳۹
KHFS3	۳۳/۸۹	۲/۱۲	۰/۱۲	-۱/۰۶	۰/۵۹	۸/۹۵
KHFS4	۳۰/۶۵	-۰/۹۵	۰/۷۷	-۲/۸۲	۰/۳۵	۱/۳۵
KHFS5	۳۱/۹۷	-۲/۰۸	-۲/۸۲	۰/۰۱	-۰/۸۸	۲/۹۹
KHFS6	۲۹/۸۷	-۱/۱۷	۰/۴۴	۰/۸۳	-۰/۲۹	۲/۰۴
KHFS7	۲۹/۱۹	-۲/۱۱	-۰/۷۹	۰/۵۲	۱/۶۳	۳/۶۹
KHFS8	۳۲/۹۹	۱/۴۵	-۱/۵۲	۰/۵۱	-۰/۹۰	۲/۰۵
KHFS9	۳۳/۰۸	۱/۷۹	-۱/۵۲	۰/۷۰	۰/۹۵	۲/۵۵
KHFS10	۳۳/۳۶	۰/۸۰	۰/۷۹	-۰/۴۸	-۲/۳۹	۱/۱۸
KHFS11	۳۱/۷۶	۰/۰۷	-۰/۵۸	-۰/۲۹	۰/۱۶	۰/۲۰
اسپیدفید	۳۲/۶۶	-۲/۴۴	۲/۲۳	۰/۴۱	-۰/۱۴	۳/۴۵

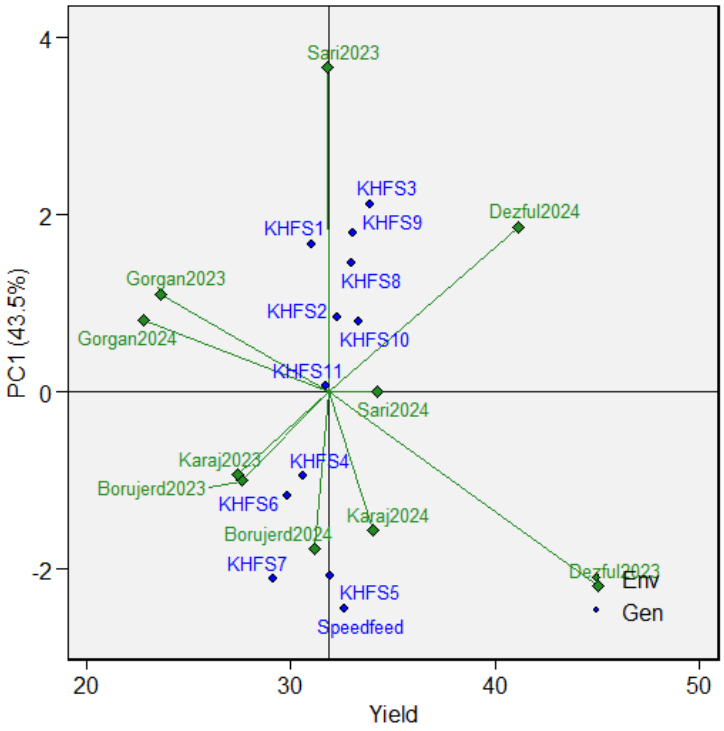
جدول ۷- انتخاب چهار هیبرید برتر در هر محیط بر اساس عملکرد پیش‌بینی‌شده توسط مدل امی

محیط	عملکرد علوفه خشک (تن در هکتار)	اولین هیبرید انتخابی	دومین هیبرید انتخابی	سومین هیبرید انتخابی	چهارمین هیبرید انتخابی
کرج ۱۴۰۲	۲۷/۴۰	اسپیدفید	KHFS5	KHFS10	KHFS3
کرج ۱۴۰۳	۳۴/۰۱	اسپیدفید	KHFS5	KHFS7	KHFS4
بروجرد ۱۴۰۲	۲۷/۶۴	اسپیدفید	KHFS5	KHFS10	KHFS3
بروجرد ۱۴۰۳	۳۱/۱۹	اسپیدفید	KHFS5	KHFS7	KHFS4
دزفول ۱۴۰۲	۴۵/۰۵	اسپیدفید	KHFS5	KHFS7	KHFS4
دزفول ۱۴۰۳	۴۱/۱۷	KHFS3	KHFS9	KHFS8	KHFS10
گرگان ۱۴۰۲	۲۳/۶۲	KHFS3	KHFS9	KHFS8	KHFS10
گرگان ۱۴۰۳	۲۲/۸۳	KHFS3	KHFS9	KHFS8	KHFS10
ساری ۱۴۰۲	۳۱/۸۳	KHFS3	KHFS9	KHFS8	KHFS1
ساری ۱۴۰۳	۳۴/۲۴	KHFS3	KHFS10	KHFS9	KHFS8
ساری ۱۴۰۳	۳۴/۲۴	KHFS3	KHFS10	KHFS9	KHFS8

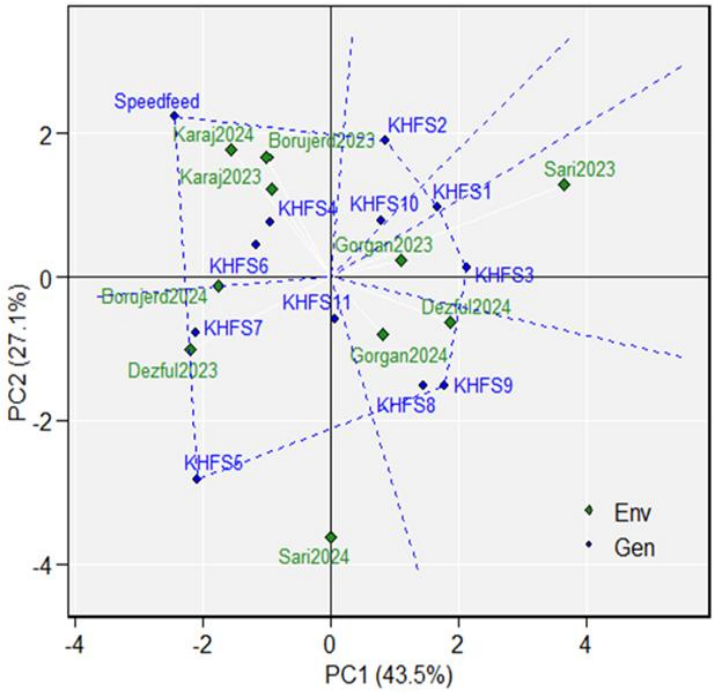
برای ارزیابی روابط ژنوتیپ‌ها و محیط‌ها از نمایش گرافیکی بای‌پلات استفاده شد (شکل ۱). در بای‌پلات AMMI1 محور افقی نشان‌دهنده میانگین عملکرد علوفه خشک ژنوتیپ‌ها است، به‌طوری‌که هرچه موقعیت ژنوتیپ به سمت راست باشد، عملکرد بالاتری دارد (Khazaei *et al.*, 2021b). محور عمودی بیانگر اثرات متقابل ضربی یا مقادیر اولین مؤلفه اصلی است که حدود ۴۳/۵ درصد از واریانس اثر متقابل ژنوتیپ × محیط را توضیح می‌دهد. ژنوتیپ‌های نزدیک به محور افقی (نمره PC1 نزدیک به صفر) همچون KHFS11، سهم کمتری در اثر متقابل داشته و به عنوان ژنوتیپ‌های پایدار شناخته می‌شوند (شکل ۱). Khazaei و همکاران (2019) نیز با استفاده از بای‌پلات AMMI1، ژنوتیپ‌های سورگوم علوفه‌ای سازگار به محیط‌های مختلف را معرفی کردند و نشان دادند که ژنوتیپ‌هایی که در مرکز بای‌پلات قرار گرفته‌اند، اثر متقابل نزدیک به صفر دارند و دارای پایداری عمومی بیشتری هستند. محیط‌های دزفول (سال اول) و ساری (سال اول) با مقادیر بزرگ مثبت یا منفی PC1 بیشترین نقش را در ایجاد اثر متقابل داشته و محیط‌های تفکیک‌کننده محسوب می‌شوند. در مقابل، محیط‌های کرج و بروجرد با نزدیکی به مبدأ، محیط‌هایی با اثر متقابل کم و شرایط نسبتاً پایدار محسوب می‌شوند (شکل ۱). ژنوتیپ‌هایی که در سمت راست نمودار و نزدیک محور افقی قرار دارند (همچون KHFS10)، ژنوتیپ‌های با عملکرد بالا و پایداری زیاد هستند. ژنوتیپ‌هایی که در سمت راست نمودار هستند ولی فاصله زیادی از محور افقی دارند (همچون اسپیدفید)، عملکرد خوبی در محیط‌های خاص داشته‌اند اما در سایر محیط‌ها افت عملکرد نشان داده‌اند. محیط‌هایی که نزدیک به مبدأ قرار گرفته‌اند (همچون سال دوم ساری)، محیط‌های میانگین و با اثر متقابل پایین هستند (شکل ۱).

در بای‌پلات AMMI2 محور افقی و عمودی به‌ترتیب مؤلفه‌های اصلی اول و دوم را نشان می‌دهند که مجموعاً حدود ۷۱ درصد از تغییرات اثر متقابل را توضیح می‌دهند (شکل ۲). هرچه فاصله ژنوتیپ یا محیط از مبدأ بیشتر باشد، سهم آن در اثر متقابل بیشتر و در نتیجه پایداری کمتر است. 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 (همچون هیبریدهای KHFS5 و KHFS7)، الگوی سازگاری مشابهی دارند. ژنوتیپ‌هایی نزدیک به مبدأ (با نمره‌های کوچک در هر دو محور) پایدارتر و دارای واکنش یکنواخت‌تری در میان محیط‌ها هستند. بنابراین هیبریدهای KHFS11، KHFS10، KHFS6، KHFS4 و KHFS3 از پایداری مناسبی در محیط‌های مختلف برخوردار بودند. در مقابل، هیبرید KHFS5 و رقم اسپیدفید در فاصله زیادی از مبدأ قرار دارند که نشان‌دهنده نوسان زیاد عملکرد و سازگاری اختصاصی آن‌ها با محیط‌های خاص است (Khazaei *et al.*, 2023a). محیط‌هایی که فاصله زیادی از مبدأ دارند (همچون ساری)، محیط‌های متمایز و مناسب برای غربال ژنوتیپ‌ها در آزمایش‌های آینده هستند (شکل ۲).

محیط‌های سال اول ساری و سال اول دزفول در دو جهت مخالف نسبت به مبدأ قرار داشتند و در نتیجه بیشترین اختلاف در پاسخ ژنوتیپ‌ها به این دو محیط مشاهده شد. محیط‌های گرگان و بروجرد در نزدیکی مبدأ بوده و محیط‌های پایدار با توان تمایز کمتر بین ژنوتیپ‌ها بودند (شکل ۲).



شکل ۱- بای‌پلات AMMI1 براساس میانگین عملکرد ۱۲ ژنوتیپ و مقادیر اولین مؤلفه اصلی در ۱۰ محیط مورد بررسی

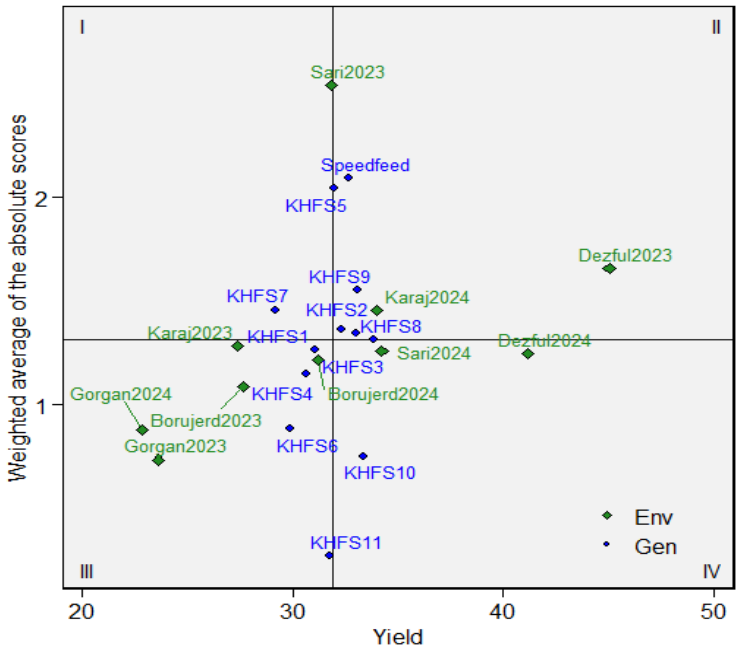


شکل ۲- بای‌پلات AMMI2 بر اساس مؤلفه‌های اصلی اول و دوم برای ۱۲ هیبرید سورگوم علوفه‌ای در ده محیط

بای‌پلات AMMI2 (شکل ۲) چهار ناحیه اصلی تشکیل داد که الگوی برهمکنش ژنوتیپ × محیط را به خوبی نشان می‌دهد. ناحیه اول (IPCA1 مثبت و IPCA2 مثبت) شامل هیبریدهای KHFS1، KHFS2، KHFS3 و KHFS10 که سازگاری اختصاصی با محیط‌های مرطوب شمالی مانند ساری ۱۴۰۲ و گرگان ۱۴۰۲ نشان دادند. ناحیه دوم (IPCA1 منفی و IPCA2 مثبت) شامل هیبریدهای KHFS4، KHFS6 و اسپیدفید که با محیط‌های نیمه‌خشک

مرکزی مانند کرج و بروجرد سازگاری اختصاصی داشتند. ناحیه سوم (IPCA1 منفی و IPCA2 منفی) شامل هیبریدهای KHFS5 و KHFS7 که سازگاری اختصاصی با محیط‌های گرم خشک مانند دزفول ۱۴۰۲ نشان دادند. ناحیه چهارم (IPCA1 مثبت و IPCA2 منفی) شامل هیبریدهای KHFS8، KHFS9 وKHFS11 که با دزفول ۱۴۰۳ و گرگان ۱۴۰۳ سازگاری اختصاصی داشتند. هیبریدهای نزدیک به مبدأ (مانند KHFS10 و KHFS11) کمترین برهمکنش را داشتند و لذا سازگاری عمومی نشان دادند. در مقابل، هیبریدهایی مانند KHFS3، KHFS5، KHFS7 و اسپیدفید که در نواحی دورتر قرار گرفتند، سازگاری اختصاصی به گروه خاصی از محیط‌ها داشتند (شکل ۲). محیط‌های ایجادکننده بیشترین برهمکنش، ساری ۱۴۰۲ (فاصله زیاد در ناحیه اول)، دزفول ۱۴۰۲ (فاصله زیاد در ناحیه سوم) و ساری ۱۴۰۳ (فاصله زیاد در ناحیه چهارم) بودند که به‌دلیل تفاوت‌های اقلیمی شدید (نوسانات رطوبت و دما) بیشترین تغییر رتبه ژنوتیپ‌ها را سبب شدند (شکل ۲). تفکیک چهار ناحیه در بای‌پلات AMMI2 تمایز واضحی بین ژنوتیپ‌های با سازگاری عمومی (نزدیک مبدأ، مانند KHFS10 و KHFS11 با نمرات IPCA نزدیک به صفر) و سازگاری اختصاصی (دور از مبدأ، مانند KHFS3 به محیط‌های مرطوب شمالی، KHFS5 به محیط‌های گرم جنوبی، و اسپیدفید به محیط‌های نیمه‌خشک مرکزی) فراهم کرد. این الگو با گزارش‌های پیشین در سورگوم (Al-Naggar *et al*., 2018; Khazaei *et al*., 2023a) همخوانی دارد و نشان می‌دهد که محیط‌های متضاد اقلیمی (مانند ساری و دزفول) اصلی‌ترین عامل تغییر رتبه ژنوتیپ‌ها هستند.

بای‌پلات عملکرد و میانگین وزنی نمرات مطلق (WAAS) پیشنهادی توسط Olivoto و همکاران (2019) نیز نتایج تجزیه AMMI را تأیید کرد (شکل ۳). مقدار WAAS کمتر در این بای‌پلات به معنای پایداری بیشتر و اثر متقابل کمتر است، در حالی‌که مقدار بالای WAAS نشان‌دهنده واکنش‌های متغیر و پایداری پایین‌تر است. بنابراین، ناحیه مطلوب در این بای‌پلات قسمت پایین-راست است (ربع چهارم با عملکرد بالا و پایداری زیاد) (Olivoto & Lúcio, 2020). ژنوتیپ‌هایی که در ناحیه پایین و سمت راست قرار دارند شامل هیبریدهای KHFS10 و KHFS3، بهترین گزینه برای سازگاری عمومی و عملکرد بالا هستند. ژنوتیپ‌هایی در قسمت بالا و راست (ربع دوم)، عملکرد بالا ولی ناپایدار دارند (شامل رقم اسپیدفید و هیبریدهای KHFS2، KHFS5، KHFS8 و KHFS9) و برای مناطق خاص توصیه می‌شوند. ژنوتیپ‌های سمت چپ پایین (ربع سوم)، شامل هیبریدهای KHFS1، KHFS4، KHFS6 و KHFS11 عملکرد پایین و پایداری بالا دارند و برای کشت در شرایط نامساعد مناسب‌تر هستند (Olivoto *et al*., 2019). ژنوتیپ‌های موجود در ربع اول همچون KHFS7 عملکرد پائین و ناپایدار دارند (شکل ۳).



شکل ۳- بای‌پلات عملکرد و میانگین وزنی نمرات مطلق برای ارزیابی همزمان عملکرد و پایداری ژنوتیپ‌ها

هیبرید KHFS3 علی‌رغم برخورداری از بالاترین میانگین عملکرد علوفه خشک، پایداری نسبی کمتری در قیاس با هیبرید KHFS10 نشان داد (شکل ۳). هیبرید KHFS3 با نمره IPCA1 مثبت بالا (+۲/۱۲) سازگاری اختصاصی به محیط‌های مرطوب شمالی نشان داد، جایی که عملکرد برتر آن احتمالاً به استفاده بهتر از رطوبت بالا و دمای معتدل تابستانی مربوط است. با این حال، حساسیت به گرمای شدید محیط‌های جنوبی مانند دزفول (با عملکرد پایین‌تر در سال اول) باعث ناپایداری کلی آن گردید. در مقابل، هیبرید KHFS10 با عملکرد و پایداری بالا (شکل ۳)، سازگاری عمومی‌تری داشت. این هیبرید در محیط‌های نیمه‌خشک مرکزی مانند کرج و بروجرد عملکرد ثابتی نشان داد، که می‌تواند به تحمل بهتر نوسانات دمایی (دمای تابستانی تا ۳۵ درجه با بارندگی محدود کمتر از ۳۰۰ میلی‌متر) و شرایط کوهستانی-دشتی این مناطق مربوط باشد. این تفاوت‌ها بر لزوم انتخاب هیبرید بر اساس شرایط اقلیمی محلی تأکید دارد به نحوی که هیبرید KHFS3 برای مناطق مرطوب شمالی و KHFS10 برای مناطق نیمه‌خشک قابل‌توصیه هستند.

در میان محیط‌ها، دزفول بیشترین میانگین عملکرد را داشت ولی مقدار نوسان بالایی نشان داد. بیشترین نوسان عملکرد در سال اول ساری مشاهده شد، در حالی‌که گرگان و بروجرد محیط‌هایی با عملکرد پایین‌تر ولی ثبات بالاتر بودند. دزفول، کرج و ساری توان تمایز بیشتری را نسبت به بروجرد و گرگان نشان دادند (شکل ۳). به طور کلی، نتایج نشان داد که استفاده همزمان از مدل AMMI و شاخص WAAS می‌تواند اطلاعات دقیق‌تری درباره رفتار پایداری و سازگاری ژنوتیپ‌ها در محیط‌های مختلف فراهم آورد و مبنایی مناسب برای انتخاب ژنوتیپ‌های برتر در برنامه‌های اصلاحی فراهم کند (Olivoto *et al.*, 2019).

نتیجه‌گیری کلی

این پژوهش با استفاده از مدل AMMI، برهمکنش ژنوتیپ × محیط را در عملکرد علوفه خشک ۱۱ هیبرید امیدبخش سورگوم علوفه‌ای همراه با رقم شاهد اسپیدفید در شرایط متنوع اقلیمی ایران ارزیابی کرد. نتایج نشان داد که اثر محیط غالب‌ترین منبع تغییرات (۶۹/۲۷ درصد) بود و برهمکنش ژنوتیپ × محیط با سهم ۲۷/۸۱ درصد، نقش مهمی در عملکرد نهایی ایفا کرد. چهار مؤلفه اصلی اول مدل AMMI بیش از ۸۸ درصد واریانس برهمکنش را توضیح دادند که بیانگر پیچیدگی الگوی سازگاری در محیط‌های مورد مطالعه است. هیبرید KHFS3 با بالاترین میانگین عملکرد علوفه خشک شناسایی شد، اما پایداری نسبی کمتری داشت و سازگاری اختصاصی به مناطق مرطوب شمالی نشان داد. در مقابل، هیبرید KHFS10 با عملکرد و پایداری بالا، سازگاری عمومی‌تری داشت. بیشترین پایداری عملکرد در هیبرید KHFS11 مشاهده شد، هر چند عملکرد آن کمتر از میانگین ژنوتیپ‌ها بود. به طور کلی، هیبرید KHFS3 برای کشت در مناطق مرطوب و معتدل شمالی

(مانند استان‌های گلستان و مازندران) و هیبرید KHFS10 برای مناطق نیمه‌خشک مرکزی و غربی (مانند البرز و لرستان) قابل‌توصیه می‌باشد. هیبرید KHFS11 نیز با پایداری بالا اما عملکرد پایین‌تر، گزینه مناسبی برای کشت در شرایط نامساعد و پرریسک است. یافته‌های حاضر می‌توانند در برنامه‌های اصلاحی سورگوم علوفه‌ای مورد استفاده قرار گیرند. این رویکرد به افزایش پایداری تولید علوفه در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران تحت شرایط تغییرات اقلیمی کمک شایانی خواهد نمود.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

سپاسگزاری

بدین‌وسیله از حمایت‌های مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر و سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی در اجرای این پروژه تحقیقاتی با کد مصوب ۰۲۰۳۸۶-۰۲۳-۰۳-۰۳-۰۰ سپاسگزاری می‌شود.

منابع

Al-Naggar, A. M. M., Abd El-Salam, R. M., Asran, M. R., & 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*(2), 1-16. https://doi.org/10.9734/ARRB/2018/39491

Baghdadi, A., Golzardi, F., & Hashemi, M. (2023). The use of alternative irrigation and cropping systems in forage production may alleviate the water scarcity in semi-arid regions. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *103*(10), 5050-5060. https://doi.org/10.1002/jsfa.12574

Basafa, M., Taherian, M., & Beheshti, A. (2015). Stability analysis for forage yield in sorghum lines. *Applied Field Crops Research*, *28*(107), 99-107. (In Persian). https://doi.org/10.22092/aj.2015.105710

Etaati, M., Ardakani, M. R., Bagheri, M., Paknejad, F., & Golzardi, F. (2023). Grain yield adaptability and stability of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) genotypes using different stability indices. *Journal of Crop Ecophysiology*, *17*(65), 1-14. (In Persian). https://doi.org/10.30495/JCEP.2023.1935024.1815

Farshadfar, E., & Sutka, J. (2006). Biplot analysis of genotype-environment interaction in durum wheat using the AMMI model. *Acta Agronomica Hungarica*, *54*(4), 459-467. https://doi.org/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), 223-237. (In Persian). https://doi.org/10.22092/sppj.2016.113080

Gauch, H. G. (1988). Model selection and validation for yield trials with interaction. *Biometrics*, *44*(3), 705-715. https://doi.org/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., & 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), 133-156. (In Persian). https://doi.org/10.22034/as.2021.13882

Khazaei, A., Torabi, M., Mokhtararpour, H., & 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), 225-236. (In Persian). https://doi.org/10.29252/abj.21.3.225

Khazaei, A., Torabi, M., Feyzbakhsh, M. T., & Azari Nasrabad, A. (2021a). 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., Golzardi, F., Torabi, M., Fyzbakhsh, M. T., Azari Nasrabad, A., Ghasemi, A., Nazari, L., & Motaghi, M. (2021b). Evaluation of the yield stability of grain sorghum genotypes using AMMI analysis in different regions of Iran. *Cereal Research*, *11*(1), 77-88. (In Persian). https://doi.org/10.22124/cr.2021.19921.1675

Khazaei, A., Golzardi, F., Shahverdi, M., Nazari, L., Ghasemi, A., Tabatabaei, S. A., Shariati, A., & 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), 177-185. (In Persian). https://doi.org/10.52547/jcb.14.42.177

Khazaei, A., Golzardi, F., Torabi, M., Feyzbakhsh, M. T., Azarinasrabad, A., Nazari, L., Ghasemi, A., & 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), 506-522. https://doi.org/10.1080/15427528.2022.2113488

Khazaei, A., Golzardi, F., Ghasemi, A., Tabatabaei, S. A., Nazari, L., Shahverdi, M., Mokhtarpour, H., & 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), 729-736. https://doi.org/10.1007/s42976-022-00339-1

Mahrokh, A., Hassanzadeh Moghadam, H., Najafinezhad, H., Shirkhani, A., Ahmadi, B., Azizi, F., & Golzardi, F. (2023). Bouquet ears in maize inbred lines as affected by agronomic factors. *Journal of Crop Improvement, 37*(1), 140-156. https://doi.org/10.1080/15427528.2022.2063776

Mohammadi, R., Armion, M., Shabani, A., & Daryaei, A. (2007). Identification of stability and adaptability in advanced durum genotypes using AMMI analysis. *Asian Journal of Plant Sciences, 6*(8), 1261-1268.

Olivoto, T., Lúcio, A. D. C., Da Silva, J. A. G., Marchioro, V. S., Souza, V. Q. de, & Jost, E. (2019). Mean performance and stability in multi-environment trials I: Combining features of AMMI and BLUP techniques. *Agronomy Journal, 111*(6), 2949-2960. https://doi.org/10.2134/agronj2019.03.0220

Olivoto, T., & Lúcio, A. D. C. (2020). Metan: An R package for multi-environment trial analysis. *Methods in Ecology and Evolution, 11*(6), 783-789. https://doi.org/10.1111/2041-210X.13384

Purchase, J. L. (1997). *Parametric analysis to describe genotype × 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), 101-108. (In Persian). https://doi.org/20.1001.1.22286128.1395.8.19.13.8

Tarakanovas, P., & Ruzgas, V. (2006). Additive main effect and multiplicative interaction analysis of grain yield of wheat varieties in Lithuania. *Agronomy Research, 4*(1), 91-98.

Tavazoh, M., Habibi, D., Golzardi, F., Ilkaee, M. N., & 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. https://doi.org/10.1590/1519-6984.286121

Yan, W., Kang, M. S., Ma, B., Woods, S., & Cornelius, P. L. (2007). GGE biplot vs. AMMI analysis of genotype-by-environment data. *Crop Science, 47*(2), 643-653. https://doi.org/10.2135/cropsci2006.06.