DOI: 10.22092/spj.2026.371268.1455

"نهال و بذر"
جلد ۴۰، شماره ۴، سال ۱۴۰۳

مقاله پژوهشی

مدل‌های پیشرفته بیزی AMMI برای تجزیه و تحلیل پایداری عملکرد دانه هیبریدهای ذرت در آزمایش‌های چندمحیطی: مقایسه رویکردهای کلاسیک و بیزی

Advanced AMMI Bayesian Models for Analysis of Grain Yield Stability of Maize Hybrids in Multi-Environment Trials: A Comparison of Classical and Bayesian Approaches

محمدرضا شیری [۱]*، سجاد محرم‌نژاد [۲]، حمید نجفی‌نژاد [۳]، افشار استخر [۴]، پیمان جعفری [۵]، مجیدرضا کیانی [۶]، مهدی متقی [۷] و بهزاد احمدی [۸]، لاله ابراهیمی [۹]

۱- دانشیار، بخش تحقیقات ذرت و گیاهان علوفه ای، موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.
۲- استادیار، بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی اردبیل، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اردبیل، ایران.
۳- دانشیار، بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی کرمان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرمان، ایران.
۴- استادیار، بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی فارس، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، شیراز، ایران.
۵- استادیار، بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی اصفهان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اصفهان، ایران.
۶- استادیار، بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مشهد، ایران.
۷- استادیار، بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان همدان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، همدان، ایران.
۸- استادیار، بخش تحقیقات ذرت و گیاهان علوفه ای، موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.
۹- دانشیار، بخش تحقیقات کنترل بیولوژیک، موسسه تحقیقات گیاهپزشکی کشور، سازمان تحقیقات، ترویج و آموزش کشاورزی، تهران، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۰۶

چکیده

شیری، م. ر.، محرم‌نژاد، س.، نجفی‌نژاد، ح.، استخر، ا.، جعفری، پ.، کیانی، م. ر.، متقی، م.، احمدی، ب. و ابراهیمی، ل. ۱۴۰۳. مدل‌های پیشرفته بیزی AMMI برای تجزیه و تحلیل پایداری عملکرد دانه هیبریدهای ذرت در آزمایش‌های چندمحیطی: مقایسه رویکردهای کلاسیک و بیزی. **نهال و بذر ۴۰: ۶۲۴-۵۹۹**

به‌نژادگران گیاهی از مدل AMMI برای تجزیه و تحلیل داده‌های آزمایش‌های چندمحیطی و شناسایی الگوهای برهمکنش ژنوتیپ × محیط استفاده می‌کنند. شاخص‌های مبتنی بر AMMI مانند میانگین وزنی قدر مطلق نمرات (WAAS) و میانگین وزنی قدر مطلق نمرات همراه با عملکرد (WAASY) ابزارهای مؤثری در ارزیابی و انتخاب ارقام برتر هستند، اما رویکرد کلاسیک AMMI در نمایش ناقابل اعتمادی و تفسیر آماری برهمکنش‌ها محدودیت‌هایی دارد. در این پژوهش شش هیبرید امیدبخش ذرت به همراه سه شاهد تجاری (هیبریدهای کوشا، دهقان و طاها) در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در ایستگاه‌های تحقیقات کشاورزی کرج، مشهد، اصفهان، همدان، کرمان، مغان و شیراز در دو سال زراعی ۱۴۰۰ و ۱۴۰۲ ارزیابی شدند. عملکرد دانه هیبریدهای امیدبخش ذرت در ۱۴ محیط با استفاده از مدل بیزی AMMI و شاخص‌های B-WAASY ،B-WAAS و شاخص پایداری ماهالانوبیس (SM) تجزیه و تحلیل و با نتایج روش کلاسیک مقایسه شد. میانگین عملکرد دانه از ۹/۲۶ تا ۱۱/۳۱ تن در هکتار متغیر بود. هیبرید شماره ۱ (KE79017/5111×K1264/5-1) بیشترین عملکرد دانه را داشت و با هیبریدهای شماره ۳ (KE76009/311×B73) و ۹ (Taha=KE76009/311×K1264/5-1) تفاوت معنی دار نداشت. مدل بیزی ۸۸/۰۱ درصد و مدل کلاسیک ۷۴/۱۰ درصد از واریانس برهمکنش ژنوتیپ × محیط را توجیه کردند که بیانگر برآورد دقیق‌تر و تبیین قوی‌تر در رویکرد بیزی است. شاخص‌های بیزی B-WAAS و B-WAASY همراه با نمودار SMT هیبریدهای شماره ۱، ۳ و ۴ (KE77003/3×B73) را دارای عملکرد دانه و پایداری عملکرد مطلوب معرفی کردند که این یافته ها با نتایج شاخص‌های کلاسیک WAAS و WAASY نیز هم‌خوانی داشت. علاوه بر این، بای‌پلات‌های بیزی با استفاده از بازه چگالی بیشینه پسین (HPD) قابل اعتماد، امکان تفسیر دقیق‌تر اثر ژنوتیپ × محیط و تفکیک اثرمعنی‌دار از غیرمعنی‌دار را فراهم کردند، در حالی که بای‌پلات کلاسیک فاقد این قابلیت بود. در مجموع، رویکرد بیزی AMMI با ارائه اطلاعات آماری غنی‌تر و نمایش شفاف عدم قطعیت، روش قابل اعتمادتر و کارآمدتری نسبت به رویکرد کلاسیک بود. هیبریدهای شماره ۱ و ۳ به دلیل عملکرد دانه بالا و پایداری عملکرد مطلوب به عنوان گزینه‌های مناسبی برای استفاده در برنامه‌های به‌نژادی و تولید هیبرید های تجاری ذرت شناسایی شدند.

واژه‌های کلیدی: ذرت، برهمکنش ژنوتیپ × محیط، شاخص‌های پایداری بیزی، سازگاری عمومی، سازگاری خصوصی.

* نگارنده مسئول: mohammadrezashiri52@gmail.com تلفن: ۰۲۶۳۴۸۵۲۰۵۲

مقدمه

ذرت (*Zea mays L.*) یکی از محصولات زراعی مهم است وتولید هیبریدهای برتر در برنامه‌های به‌نژادی ذرت نقش اساسی در افزایش عملکرد و بهبود سازگاری آن ایفا می‌کند (Ebrahimi, 2023; Shiri *et al.*, 2024). هدف اصلی در به‌نژادی مبتنی بر تولید هیبرید، ترکیب ویژگی‌های مطلوب و دستیابی به هیبریدهایی است که در شرایط متنوع محیطی عملکرد بالاتری داشته باشند. با این حال، واکنش ارقام به تغییرات محیطی یکسان نیست و ذرت نیز از این قاعده مستثنی نمی‌باشد. از این رو، انجام آزمایش‌های چندمحیطی به‌عنوان یکی از مراحل کلیدی در ارزیابی نهایی ژنوتیپ‌ها، به‌ویژه ژنوتیپ‌های دارای پتانسیل تجاری، اهمیت زیادی دارد (Shiri *et al.*, 2024).

آزمایش‌های چندمحیطی امکان تجزیه و تحلیل رفتار ژنوتیپ‌ها در شرایط محیطی مختلف را فراهم می‌کنند و می‌توانند بر توصیه‌های کشت تأثیرگذار باشند. در این ارزیابی‌ها، ژنوتیپ‌ها ممکن است واکنش‌های متفاوتی به تغییرات محیطی نشان دهندکه این پدیده به‌طور معمول به‌صورت برهمکنش ژنوتیپ × محیط بیان می‌شود. عدم ارزیابی این منبع تغییر می‌تواند منجر به اتخاذ تصمیمات نادرست در انتخاب ژنوتیپ‌ها شود و موجب افزایش برآوردهای فنوتیپی، محدودیت در دستاوردهای انتخابی و جلوگیری از ارائه توصیه‌های مناسب گردد (Annicchiarico, 2002).

برای شناسایی برهمکنش‌های ژنوتیپ × محیط، چندین روش آماری پیشنهاد شده است که هدف آن‌ها شناسایی الگوهای مفید برای هدایت تصمیم‌گیری‌ها، چه در انتخاب ژنوتیپ‌هایی با سازگاری عمومی و چه ژنوتیپ‌هایی با سازگاری خصوصی می‌باشد. علاوه بر این، شناسایی عواملی که موجب برهمکنش ژنوتیپ × محیط می‌شوند و کمی‌سازی تغییرات باقیمانده‌ای که توسط آثار اصلی توضیح داده نمی‌شوند، برای ارزیابی سازگاری‌های فنوتیپی بسیار مهم است (Olivoto *et al.*, 2019; Shiri *et al.*, 2025).

به‌نژادگران گیاهی به‌طور گسترده از مدل اثرهای اصلی جمع‌پذیر و برهمکنش ضربی (AMMI = Additive main effects and multiplicative interaction) برای تجزیه و تحلیل داده‌های عملکرد آزمایش‌های چندمحیطی استفاده می‌کنند (Khan *et al.*, 2021; Shiri *et al.*, 2025a). این مدل ابزاری کارآمد برای درک الگوهای پیچیده برهمکنش میان گروه‌های ژنوتیپی و محیطی است (Kona *et al.*, 2024). تجزیه این برهمکنش‌ها به به‌نژادگران کمک می‌کند تا ژنوتیپ‌های پایدار و ابرمحیط‌ها (مجموعه‌ای از محیط‌های مشابه) را شناسایی کرده و ژنوتیپ‌هایی با سازگاری خصوصی را توصیه کنند.

مدل AMMI در چارچوب رویکرد کلاسیک آماری آثار اصلی ژنوتیپ، محیط و برهمکنش آن‌ها را با استفاده از روش حداقل مربعات تکراری یا بهترین برآوردگر خطی ناریب (BLUP = Best linear unbiased prediction) برآورد می‌کند. پس از حذف آثار اصلی از داده‌های

فنوتیپی، تجزیه مقدار منفرد بر روی باقیمانده‌ها انجام می‌شود. این فرآیند امکان تجسم برهم‌نش‌های پیچیده ژنوتیپ × محیط را در قالب نمودارهای بای‌پلات فراهم می‌آورد (Gabriel, 1971). با این حال، یکی از چالش‌های اساسی در رویکرد کلاسیک، استنباط مؤلفه‌های دوگانه نخست که در بای‌پلات نمایش داده می‌شوند، است. زیرا این استنباط به فرض‌های مجانبی متکی است، به این معنا که اعتبار نتایج تنها زمانی تضمین می‌شود که تعداد مشاهدات زیاد باشد، در حالی‌که داده‌های آزمایش‌های چندمحیطی معمولاً چنین ویژگی را ندارند (Denis and Pazman, 1999) ، یا از روش‌های محاسباتی پیچیده‌ای مانند بازنمونه‌گیری (Forkman and Piepho, 2014) استفاده می‌شود که نیازمند دقت بالا در اجرا است (Yang *et al.*, 2009).

در مقابل، رویکرد بیزی AMMI که نخستین بار توسط ویله و سرینیواسان (Viele and Srinivasan, 2000) معرفی و سپس توسط کروسا و همکاران (Crossa *et al.*, 2011) و پرز-الیزالد و همکاران (Perez-Elizalde *et al.*, 2012) توسعه یافت، امکان استنباط آماری در چارچوب مدل AMMI را با بهره‌گیری از آمار بیزی فراهم می‌آورد. این رویکرد اجازه می‌دهد که اطلاعات پیشین در مورد پدیده‌ها در مدل گنجانده شود و توزیع پسین کامل هر کمیت مورد نظر، از جمله آثاری که در نمودار بای‌پلات AMMI نمایش داده می‌شوند، ارائه شود (Josse *et al.*, 2014). این توزیع‌ها قابل تفسیر هستند و می‌توان از آن‌ها برای ترسیم نواحی قابل اعتماد روی نمودار استفاده کرده و میزان عدم قطعیت نتایج را به‌صورت بصری نمایش داد.

به دلیل اهمیت این موضوع، پژوهش‌های متعددی بر رفع چالش‌های تجزه و تحلیلی مختلف در آزمایش‌های چندمحیطی متمرکز شده‌اند. برای مثال، مدیریت ناهمسانی واریانس‌ها در برخی از داده‌های آزمایش‌های چندمحیطی (Oliveira *et al.*, 2021) و در چارچوب مدل بیزی AMMI، در نظر گرفتن تعداد محورهای اصلی نگه‌داشته‌شده به‌عنوان یک متغیر تصادفی، برای کاهش میزان غیرعینی بودن این انتخاب، از جمله پیشرفت‌های مهم هستند (da Silva *et al.*, 2023).

به‌منظور تسهیل تصمیم‌گیری در برنامه‌های به‌نژادی، پژوهشگران چندین شاخص مبتنی بر مدل AMMI را معرفی کرده‌اند که پایداری را با عملکرد میانگین ترکیب می‌کنند. برخی از این شاخص‌ها، مانند میانگین وزنی قدر مطلق نمرات (WAAS = Weighted average of absolute scores) یا WAASB که B نشان‌دهنده استفاده از BLUP است) که تمرکز اصلی‌شان بر پایداری ژنوتیپ‌ها در محیط‌های مختلف است (Olivoto *et al.*, 2019). از آنجا که هدف به‌نژادگران تنها پایداری عملکرد نیست، بلکه میانگین عملکرد نیز اهمیت دارد، اولیوتو و همکاران (Olivoto *et al.*, 2019) شاخص WAASBY را معرفی کردند که همزمان میانگین عملکرد و پایداری عملکرد را در انتخاب ژنوتیپ‌ها لحاظ می‌کند.

در سال‌های اخیر، رویکردهای بیزی در تجزیه و تحلیل داده‌های آزمایش‌های چندمحیطی، به‌ویژه برای مدل‌سازی دقیق‌تر برهمکنش ژنوتیپ × محیط، به‌طور چشمگیری گسترش یافته‌اند (Shiri *et al.*, 2024; Shiri *et al.*, 2025b; Shiri *et al.*, 2024c). برناردو جونیور و همکاران (Bernardo Júnior *et al.*, 2018) با استفاده از مدل بیزی AMMI نشان دادند که این روش در مواجهه با داده‌های نامتوازن کارآیی بالایی دارد و می‌تواند الگوهایبرهمکنش ژنوتیپ × محیط را به‌طور مؤثرتری نسبت به مدل‌های کلاسیک شناسایی کند. همچنین تئودورو و همکاران (Teodoro *et al.*, 2019) با استفاده از مدل بیزی AMMI تأکید کردند که نواحی قابل اعتماد (Credible regions) در بای‌پلات‌ها، امکان توصیه دقیق‌تر ژنوتیپ‌ها برای محیط‌های هدف را فراهم می‌نمایند.

دا سیلوا و همکاران (da Silva *et al.*, 2025a; da Silva *et al.*, 2025b) مدل بیزی AMMI را برای ارزیابی پایداری و سازگاری عملکرد هیبریدهای ذرت به کار گرفتند و گزارش کردند که این رویکرد می‌تواند محدودیت‌های مدل‌های کلاسیک را برطرف کرده و در شناسایی هیبریدهای با عملکرد دانه و پایداری عملکرد مؤثر باشد. انعطاف‌پذیری بالای این مدل نیز در تشخیص زیرگروه‌های ژنوتیپی و محیطی با اثر مشابه و مدل‌سازی دقیق‌تر مؤلفه‌ها نشان داده شد. نتایج این پژوهش‌ها در مجموع بر توانایی چارچوب بیزی در ارائه برآوردهای بازه چگالی بیشینه پسین (HPD= Highest Posterior Density) قابل اعتماد، بر دقت و بهبود تفسیر برهمکنش‌های ژنوتیپ × محیط تأکید دارند، که این امر آن را به ابزاری قدرتمند برای تصمیم‌گیری در برنامه‌های به‌نژادی تبدیل کرده است.

اگرچه شاخص‌های مبتنی بر مدل AMMI ابزارهای ارزشمندی برای و تجزیه و تحلیل پایداری عملکرد ژنوتیپ‌ها به شمار می‌آیند و در چارچوب آمار کلاسیک تولید شده اند، استنباط دقیق از پارامترهای آن‌ها به دلیل دشواری دستیابی به توزیع نمونه‌گیری مناسب با محدودیت‌هایی مواجه است. این محدودیت در رویکرد بیزی برطرف می‌شود، زیرا این چارچوب امکان برآورد مستقیم هر تابعی از پارامترها و در نتیجه انجام استنباط آماری دقیق‌تر بر روی شاخص‌های مبتنی بر AMMI را فراهم می‌سازد.

در این راستا، ناسیمنتو و همکاران (Nascimento *et al.*, 2025) با هدف افزایش دقت در ارزیابی هم‌زمان عملکرد و پایداری عملکرد، نسخه‌های بیزی شاخص‌های کلاسیک WAAS و WAASY را به ترتیب با عناوین B-WAAS و B-WAASY به‌ترتیب برای ارزیابی پایداری عملکرد و ترکیب آن با میانگین عملکرد معرفی کردند. این شاخص‌ها با بهره‌گیری از چارچوب بیزی، امکان استنباط آماری بر پایه توزیع‌های پسین و بازه‌های قابل اعتماد بیزی را فراهم می کند و اطلاعاتی جامع‌تر و قابل اعتمادتر نسبت به روش‌های کلاسیک ارائه می‌دهند. افزون بر این، آنان شاخص پایداری جدیدی

با عنوان SM (Stability measure) پیشنهاد دادند که از فاصله ماهالانوبیس برای مقایسه میزان پایداری عملکرد ژنوتیپ‌ها با یک ایدئوتیپ ایده‌آل دارای بیشینه پایداری استفاده می‌کند. این شاخص در قالب ابزار گرافیکی نمودار ویژگی پایداری ماهالانوبیس (SMT = Stability Mahalanobis trait) ارائه شد و رویکردی نوین برای شناسایی ژنوتیپ‌های با عملکرد بالا و پایدار در آزمایش‌های چندمحیطی فراهم آورد.

بر اساس نتایج گزارش‌شده توسط ناسیمنتو و همکاران (Nascimento *et al.*, 2025)، شاخص‌های بیزی B-WAAS و B-WAASY، امکان استنباط آماری دقیق‌تری از رفتار ژنوتیپ‌ها فراهم می‌کنند و تفسیر پایداری عملکرد را با اتکا به برآوردهای همراه با عدم‌قطعیت قابل اعتمادتر می‌سازند. همچنین، ابزار گرافیکی SMT با ترکیب هم‌زمان عملکرد و پایداری عملکرد، قابلیت مقایسه مجموعه ژنوتیپ‌های ارزیابی‌شده با سناریوی ایده‌آل (بالاترین عملکرد و بیشترین پایداری عملکرد) را دارد و از طریق تجزیه و تحلیل چهار ربع نمودار، ژنوتیپ‌های دارای عملکرد و پایداری عملکرد برتر، به‌ویژه ژنوتیپ‌های قرارگرفته در ربع چهارم، را به‌طور مؤثر شناسایی می‌کند.

رویکرد کلاسیک AMMI تنها بر برآوردهای نقطه‌ای برهمکنش ژنوتیپ × محیط تکیه دارد و فاقد نمایش عدم‌قطعیت پارامترهاست. ازاین‌رو، امکان لنجام آزمون معنی‌داری و مقایسه دقیق پایداری ژنوتیپ‌ها محدود می‌شود. در مقابل، مدل بیزی AMMI با ارائه توزیع‌های پسین و بازه‌های قابل اعتماد، ارزیابی خطای برآورد و پراکندگی واقعی برهمکنش را امکان‌پذیر می‌سازد و تمایز میان ژنوتیپ‌ها و محیط‌ها را با دقت بیشتری نشان می‌دهد. افزون بر این، بای‌پلات‌های بیزی و شاخص‌هایی مانند B-WAASY و SM عملکرد و پایداری عملکرد را به‌طور هم‌زمان و با لحاظ عدم‌قطعیت تجزیه و تحلیل می‌کنند. با وجود پیشرفت‌های اخیر و معرفی این شاخص‌های بیزی برای شناسایی ژنوتیپ‌های دارای عملکرد بالا و پایدار در آزمایش‌های چندمحیطی، تاکنون مطالعه‌ای که کارایی عملی آن‌ها را به‌صورت مقایسه‌ای با رویکرد کلاسیک AMMI ارزیابی کند، انجام نشده است.

بنابراین، هدف این پژوهش ارزیابی و مقایسه عملکرد دانه و پایداری عملکرد هیبریدهای ذرت با استفاده از مدل‌های بیزی و کلاسیک AMMI و بررسی توانایی شاخص‌های بیزی در شناسایی ژنوتیپ‌های با عملکرد بالا و پایدار برای استفاده در برنامه‌های به‌نژادی ذرت است.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش تعداد شش هیبرید امیدبخش ذرت به همراه سه شاهد هیبرید تجاری (کوشا، دهقان و طاها به ترتیب هیبریدهای شماره ۷، ۸ و ۹) در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در ایستگاههای تحقیقات کشاورزی کرج، مشهد، اصفهان، همدان، کرمان، مغان و شیراز در دو سال فصل رشد ۱۴۰۰ و ۱۴۰۲ ارزیابی شدند (جدول ۱).

جدول ۱- نام، مختصات جغرافیایی، شرایط اقلیمی و نوع خاک ایستگاه‌های تحقیقاتی

Table 1. Name, geographical coordinates, climatic conditions, and soil type of the research field stations

Field station	ایستگاه تحقیقاتی	ارتفاع از سطح دریا (متر) Altitude above sea level (m)	عرض جغرافیایی Latitude	طول جغرافیایی Longitude	میانگین دما (سانتی گراد) Annual mean temperature (°C)	میزان بارش (میلی‌متر) Anaual mean precipitation (mm)	نوع خاک Soil type
Karaj	کرج	1321	35º 49' N	51º 00' E	16.76	268	Clay loam
Moghan	مغان	73	39º 41' N	47º 32' E	17.85	327	Clay loam
Shiraz	شیراز	1604	29º 46' N	52º 43' E	17.53	330	Silt clay loam
Isfahan	اصفهان	1545	32º 51' N	51º 58' E	15.25	116	Clay loam
Hamadan	همدان	1741	36º 46' N	48º 34' E	11.30	317	Clay loam
Kerman	کرمان	1200	28º 45' N	56º 36' E	22.67	123	Clay loam
Mashhad	مشهد	995	32º 59' N	36º 19' E	13.89	181	Sandy loam

هر کرت آزمایشی شامل چهار ردیف به طول ۵/۴۴ متر با فاصله ردیف ۷۵ سانتیمتر، فاصله بین کپه ها روی ردیف ۳۲ سانتی متر با دو گیاه در هر کپه و تراکم کاشت حدود ۸۳۰۰۰ بوته در هکتار بود. برای قابل اعتماد از سبز شدن کامل بذر، سه بذر در هر کپه به صورت دستی کاشته شدند. پس از تنک در مرحله ۵-۴ برگی (حدود ۱۸ روز پس از کاشت)، در هر کپه کاشت تنها دو گیاه نگهداری شد. مراقبت‌های زراعی لازم شامل آبیاری(بر اساس نیاز آبی ذرت)، مدیریت علف‌های هرز و آفات (بر اساس توصیه‌های کارشناسان گیاه‌پزشکی هر منطقه) و برنامه تغذیه مناسب (مطابق با نتایج آزمون خاک هر ایستگاه تحقیقاتی)، انجام شد.

مدل و استنباط بیزی

مدل بیزی AMMI در قالب نمادگذاری ماتریسی به شکل زیر ارائه شده است (Crossa *et al.*, 2011):

$$y = 1_n\mu + X_1\tau + X_2\delta + \sum_{k=1}^{t}\lambda_k \operatorname{diag}(X_1\alpha_k)X_2\gamma_k + e,$$

که در آن: y، بردار پاسخ‌های فنوتیپی با ابعاد $n = r \times g \times e$ است که r,g,e به ترتیب تعداد تکرارها، ژنوتیپ‌ها و محیط‌ها هستند؛ 1_n، بردار یک‌ها با طول n؛ μ، میانگین کل؛ X_1، ماتریس طرح آزمایشی برای ژنوتیپ‌ها$(n \times g)$؛ τ، بردار اثر ثابت اصلی ژنوتیپ‌ها $(g \times 1)$؛ X_2، ماتریس طرح آزمایشی برای محیط‌ها $(n \times e)$؛ δ، بردار اثر ثابت اصلی محیط‌ها$(e \times 1)$؛ λ_k، مقدار منفرد مؤلفه ضربی k-ام؛ α_k و γ_k، به ترتیب بردارهای منفرد ژنوتیپ و محیط مربوط به مؤلفه k-ام؛ t، بیشینه تعداد مؤلفه‌های اصلی برهمکنش است که برابر$\min(g-1, e-1)$ است؛ e، بردار آثار باقیمانده تصادفی است.

مقادیر مؤلفه‌های ضربی از طریق تجزیه مقدار منفرد ماتریس برهمکنش ژنوتیپ × محیط استخراج می‌شوند، به‌گونه‌ای که بردارهای منفرد ژنوتیپ و محیط دارای شرایط، $\alpha_k\alpha_k' = \gamma_k\gamma_k' = 0$ متعامد واحد (Orthonormality) و $\alpha_k^T\alpha_k = \gamma_k^T\gamma_k = 1$ نرمال شده (Normalized)، می باشند.

با فرض اینکه $\mathbf{e} \mid \sigma_e^2 \sim N(0, I_n\sigma_e^2)$ بردار پاسخ فنوتیپی y دارای توزیع زیر است:

$$\mathbf{y} \mid \mu, \boldsymbol{\tau}, \boldsymbol{\delta}, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{\gamma}, \sigma_e^2 \sim N_n\left(\mathbf{1}_n\mu + \mathbf{X_1}\boldsymbol{\tau} + \mathbf{X_2}\boldsymbol{\delta} + \sum_{k=1}^{t}\lambda_k \operatorname{diag}(\mathbf{X_1}\boldsymbol{\alpha}_k)\mathbf{X_2}\boldsymbol{\gamma}_k, \mathbf{I}_n\sigma_e^2\right),$$

که در آنI_n ماتریس همانی به ابعاد n×n است.

توزیع‌های پیشین برای پارامترهای $(\mu, \boldsymbol{\tau}, \boldsymbol{\delta}, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{\gamma}, \sigma_e^2)$ به شرح $\mu \mid \mu_\mu, \sigma_\mu^2 \sim N(\mu_\mu, \sigma_\mu^2)$؛ $\boldsymbol{\tau} \mid \mu_\tau, \sigma_\tau^2 \sim N(\mu_\tau, \mathbf{I}_g\sigma_\tau^2)$؛ $\boldsymbol{\delta} \mid \mu_\delta, \sigma_\delta^2 \sim N(\mu_\delta, \mathbf{I}_e\sigma_\delta^2)$؛ $\lambda_k \mid \mu_{\lambda_k}, \sigma_{\lambda_k}^2 \sim N^+(\mu_{\lambda_k}, \sigma_{\lambda_k}^2)$ که N^+ توزیع نرمال محدود به

اعداد مثبت با شرط $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \cdots \geq \lambda_t$ است. بردارهای منفرد ژنوتیپ و محیط به ترتیب α_k و $\boldsymbol{\gamma}_k$دارای توزیع یکنواخت کروی در زیرفضای اصلاح‌شده هستند (یک مورد خاص از توزیعFisher–von Mises). همچنین واریانس باقیمانده تصادفی به صورت $\sigma_e^2 \mid \nu_e, s_e^2 \sim$ Inverse Scaled $\chi^2(\nu_e, s_e^2)$ توزیع می‌شود که X^2نمایانگر توزیع کای‌دو است. پارامترهای فوق مانند $\mu_\mu, \sigma_\mu^2, \mu_\tau, \sigma_\tau^2, \mu_\delta, \sigma_\delta^2, \mu_{\lambda_k}, \sigma_{\lambda_k}^2, \nu_e, s_e^2$ به‌عنوان ابرپارامترها (Hyperparameters) شناخته می‌شوند.

با توجه به قضیه بیز، توزیع پسین مشترک تمامی پارامترهای ناشناخته $(\mu, \boldsymbol{\tau}, \boldsymbol{\delta}, \lambda, \boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{\gamma}, \sigma_e^2)$ متناسب با حاصل‌ضرب تابع درست‌نمایی و توزیع‌های پیشین است. بنابراین، بیان کلی این رابطه به صورت زیر است:

$$P(\mu,\boldsymbol{\tau},\boldsymbol{\delta},\lambda,\boldsymbol{\alpha},\boldsymbol{\gamma},\sigma_e^2|\mathbf{y}) \propto L(\mu,\boldsymbol{\tau},\boldsymbol{\delta},\lambda,\boldsymbol{\alpha},\boldsymbol{\gamma},\sigma_e^2,\mathbf{y}) \times P(\mu) \times P(\boldsymbol{\tau}) \times P(\boldsymbol{\delta}) \times P(\lambda) \times P(\boldsymbol{\alpha}) \times P(\boldsymbol{\gamma}) \times P(\sigma_e^2)$$

این رابطه اساس محاسبه توزیع پسین در چارچوب بیزی برای مدل AMMI را تشکیل می‌دهد و امکان برآورد و استنباط آماری پارامترها را فراهم می‌سازد.

برای استنباط پارامترها، نیاز است تا توزیع‌های پسین حاشیه‌ای (Posterior marginal distributions) هر پارامتر به‌دست آید. با این حال، این توزیع‌ها معمولاً شامل انتگرال‌های پیچیده‌ای هستند که به‌طور تحلیلی حل نمی‌شوند. بنابراین، به‌کارگیری روش‌های عددی مانند الگوریتم مارکوف چین مونت کارلو (MCMC = Markov Chain Monte Carlo) ضروری است (Gamerman and Lopes, 2006). الگوریتم‌های MCMC این کار را با تولید نمونه‌های تصادفی از توزیع‌های پسین حاشیه‌ای، به‌صورت غیرمستقیم و از طریق توزیع‌های پسین شرطی کامل انجام می‌دهند. توزیع پسین شرطی کامل، توزیع پسین یک پارامتر خاص با توجه به داده‌ها و سایر پارامترها است(Gelman and Rubin, 1992) . اگر این توزیع به یک توزیع احتمالاتی شناخته‌شده تعلق داشته باشد، می‌توان از الگوریتم Gibbs sampler استفاده کرد (Geman and Geman, 1984).

در مدل بیزی AMMI، توزیع‌های پسین شرطی کامل برای μ، $\boldsymbol{\tau}$، $\boldsymbol{\delta}$و $\boldsymbol{\lambda}$ از نوع نرمال هستند. برای $\boldsymbol{\alpha}$ و $\boldsymbol{\gamma}$، توزیع‌های شرطی کامل با برخی محدودیت‌ها و با استفاده از توزیع Fisher–von Mises تعریف می‌شوند (Crossa *et al.*, 2011). نهایتاً، توزیع پسین شرطی کامل برای σ_e^2 از نوع مقیاس معکوس کای‌دو است. جزئیات بیشتر در مورد کل فرموله‌بندی بیزی AMMI توسط کراسا و همکاران (Crossa *et al.* 2011) و پرز–الیزاده (Perez-Elizalde *et al.* 2012) تشریح و ارائه شده است.

توزیع‌های پیشین بیزی

برای تجزیه و تحلیل‌ها، از پیشین‌های کم‌اطلاعاتی استفاده شد که با واریانس‌های بزرگ

مشخص می‌شوند. به‌طور مشخص، میانگین پیشین برای پارامترهای نرمال صفر در نظر گرفته شد و واریانس‌های پیشین برای تمامی ابرپارامترها 1×10^8 تعیین شد. برای پارامتر پراکندگی σ_e^2 نیز، ابرپارامترهای ν_e و s_e^2 به ترتیب برابر با 1 و 10^8در نظر گرفته شد (Crossa *et al.*, 2011).

شاخص‌های مبتنی بر AMMI در رویکرد کلاسیک

میانگین وزنی قدر مطلق نمرات (WAAS)

شاخص WAAS از تجزیه مقدار منفرد ماتریس برآوردهای بهترین برآوردگر خطی نااریب برای اثر برهمکنش ژنوتیپ × محیط به‌دست می‌آید و به شکل زیر تعریف می‌شود (Olivoto *et al.*, 2019):

$$\mathrm{WAAS}_i = \frac{\sum_{k=1}^{p}[\mathrm{IPCA}_{ik} \times \mathrm{EP}_k]}{\sum_{k=2}^{p} \mathrm{EP}_k}$$

که در آن IPCA_{ik} مقدار ژنوتیپ i در محور k-IPCAام و EP_k مقدار واریانس توضیح داده‌شده توسط همان محور است. ژنوتیپی که کمترین مقدار WAAS را داشته باشد، ژنوتیپ با پایدارترین عملکرد در نظر گرفته می‌شود.

میانگین وزنی قدر مطلق نمرات همراه با عملکرد (WAASY)

شاخص WAASY امکان ترکیب میانگین عملکرد (Y) و شاخص پایداری WAAS را فراهم می‌کند و به صورت زیر تعریف می‌شود (Olivoto et al., 2019):

$$\mathrm{WAASY}_i = \frac{(rG_i \times \theta_Y) + (rW_i \times \theta_S)}{\theta_Y + \theta_S}$$

که در آن rG_i و rW_i مقادیر بازمقیاس‌شده (۰-۱۰۰) برای عملکرد و WAAS هستند و θ_Y و θ_S وزن‌های مرتبط با عملکرد و پایداری آن (در این مطالعه ۶۵ و ۳۵) هستند. در WAASY، مقادیر بالاتر نشان‌دهنده ژنوتیپ بهتر است، بر خلاف WAAS که مقادیر پایین‌تر بهتر هستند.

شاخص فاصله ماهالانوبیس پایداری (SM)

شاخص SM (فاصله ماهالانوبیس پایداری) میزان پایداری عملکرد ژنوتیپ‌ها را با اندازه‌گیری فاصله هر ژنوتیپ از یک ژنوتیپ ایده‌آل مشخص می‌کند. ژنوتیپ ایده‌آل، یک ژنوتیپ فرضی است که در تمام محیط‌ها دارای عملکرد کاملاً پایدار بوده و تغییرات عملکرد ندارد و در مبدأ فضای p-بعدی مؤلفه‌های اصلی IPCA قرار می‌گیرد. هر چه مقدار SM کوچک‌تر باشد، ژنوتیپ به ژنوتیپ ایده‌آل نزدیکتر و دارای عملکرد پایدارتر است و مقادیر بالاتر نشان‌دهنده ناپایداری عملکرد بیشتر ژنوتیپ‌هاست (Johnson and Wichern, 2002):

$$\mathrm{SM}_i = (\mathrm{IPCA}_i - \mathbf{0})^T \Sigma^{-1} (\mathrm{IPCA}_i - \mathbf{0})$$

که در آن IPCA_i بردار-p بعدی ژنوتیپ i از اثر برهمکنش مدل AMMI، 0 بردار صفر p-بعدی به‌عنوان ژنوتیپ ایده‌آل و Σ ماتریس قطری شامل معکوس مقادیر ویژه از اثر برهمکنش است. ماتریس Σ اهمیت هر محور IPCA را نیز لحاظ می‌کند، زیرا هر مقدار ویژه نشان‌دهنده سهم واریانس توضیح داده‌شده توسط آن محور است (Nascimento *et al.*, 2025).

نمودار صفت پایداری ماهالانوبیس (SMT)

پس از محاسبه SM، یک نمودار ترکیبی تحت عنوان نمودار صفت پایداری ماهالانوبیس (SMT)

ترسیم شد. این نمودار مقادیر SM و میانگین پسین حاشیه‌ای عملکرد دانه هر ژنوتیپ را نشان می‌دهد و همچنین بازه قابل اعتماد ۹۰ درصد برای هر دو شاخص SM و عملکرد دانه ارائه می‌کند تا نمایی جامع از برآوردهای مدل بیزی و عدم قطعیت آن‌ها فراهم شود. نمودار به چهار ربع (I–IV) تقسیم می‌شود که بر اساس میانه مقادیر SM و میانگین عملکرد دانه پسین مشخص شده است. ژنوتیپ‌های ربع IV که عملکرد و پایداری عملکرد بالایی دارند، برای برنامه‌های به‌نژادی ایده‌آل هستند، در حالی که ژنوتیپ‌های ربع I عملکرد بالقوه بالا با پایداری عملکرد کمتر دارند (Nascimento *et al.*, 2025).

بکارگیری رویکرد بیزی

زنجیره‌های مارکوف چین مونت کارلو (MCMC) با ۳۰,۰۰۰ تکرار در الگوریتم Gibbs sampler اجرا شدند. در این تجریه و تحلیل، دوره نمونه‌های سوخته (burn-in) برابر با ۵,۰۰۰ تکرار در نظر گرفته شد و نمونه‌برداری هر پنج تکرار یک‌بار (Thinning) انجام شد. توزیع‌های شاخص‌های مبتنی بر AMMI، شامل میانگین وزنی بیزی نمرات مطلق (B-WAAS)، میانگین وزنی بیزی نمرات مطلق همراه با عملکرد (B-WAASY) و شاخص پایداری ماهالانوبیس (SM) مستقیماً از زنجیره‌هایMCMC مربوط به λ و α استخراج شدند، زیرا این شاخص‌ها بر اساس پارامترهای برآوردشده مدل محاسبه می‌شوند.

در هر زنجیره، میانگین پسین، انحراف معیار، بازه‌های قابل اعتماد بیزی (HPD)۹۰ درصد و شاخص‌های معیار همگرایی (Geweke, 1992; Raftery and Lewis, 1992) بررسی شدند. همگرایی زنجیره‌های MCMC با استفاده از شاخص‌های Geweke و Raftery–Lewis به کمک بسته boa ارزیابی شد (Smith, 2007). برای اجرای تحلیل مدل AMMI بیزی و محاسبه شاخص‌های مذکور، از اسکریپت‌های R استفاده شد که امکان رسم نمودار SMT را نیز فراهم می‌کنند. این تحلیل‌ها در چارچوب نرم‌افزار ChiDO انجام شد (Nascimento *et al.*, 2025).

نتایج و بحث

در ارزیابی همگرایی زنجیره‌های مارکوف چین مونت کارلو (MCMC)، نتایج این مطالعه نشان داد که ۹۸/۵۸ درصد از پارامترها دارای قدر مطلق آماره Geweke's Z کمتر از ۱/۹۶ و ۹۲/۶۳ درصد دارای ضریب وابستگی Raftery–Lewis کمتر از ۵ بودند، که بیانگر همگرایی و پایداری مناسب زنجیره‌ها در اغلب پارامترهای مدل است (جدول نتایج ارایه نشده است). ناسیمنتو و همکاران (Nascimento *et al.*, 2025) نیز گزارش کردند که مقادیر بزرگ‌تر۱/۹۶ برای آماره Geweke's Z و بیش از پنج برای ضریب Raftery–Lewis می‌تواند نشان‌دهنده‌ی ناپایداری اولیه یا خودهمبستگی در زنجیره‌ها باشد.

میانگین‌های پسین عملکرد دانه برای نه هیبرید و ۱۴ محیط، همراه با حدود پایین و بالای

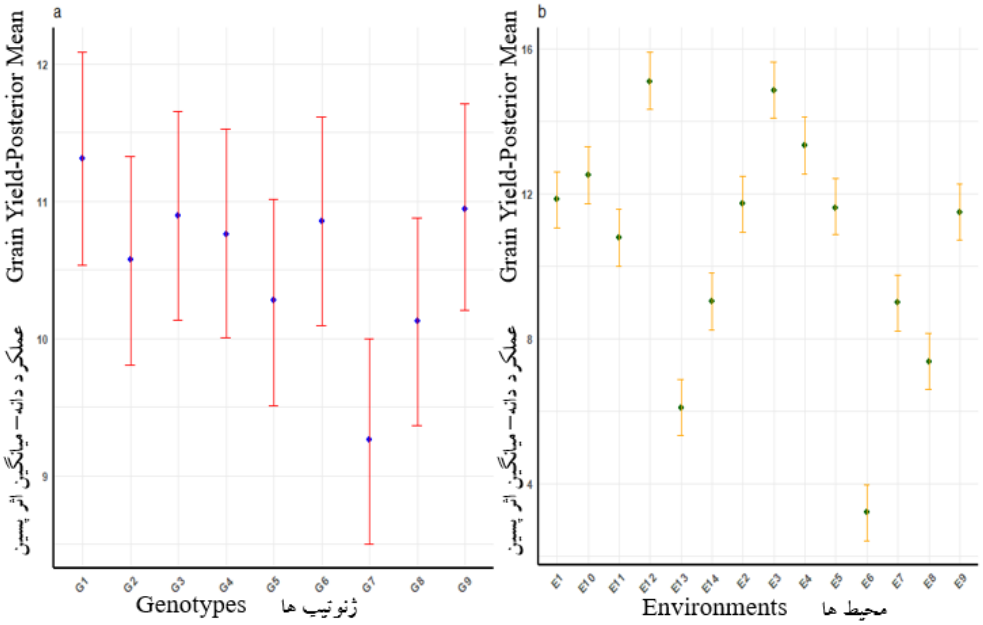
بازه‌هایHPD، در شکل ۱ و جدول ۲ ارائه شده است. میانگین عملکرد دانه هیبریدها بین ۹/۲۶ تن در هکتار (هیبرید شماره ۷) تا ۱۱/۳۱ تن در هکتار (هیبرید شماره ۱) متغیر بود. تحلیل بازه‌های HPD نشان داد که هیبرید شماره ۹ (رقم شاهد سینگل کراس ۴۱۰) و هیبرید شماره ۳ با میانگین به‌ترتیب ۱۰/۹۵و ۱۰/۹۰تن در هکتار،که پس از هیبرید شماره ۱ بیشترین عملکرد دانه را داشتند، دارای هم‌پوشانی با هیبرید ۱شماره بوده و در یک گروه قرار گرفتند (شکل ۱). همچنین، این هیبریدها عملکرد دانه بالاتر از میانگین کل (۱۰/۵۶ تن در هکتار) تولید کردند.

عملکرد دانه در ۱۴ محیط نیز تفاوت قابل‌توجهی نشان داد و از ۳/۲۰ تن در هکتار در محیط ۶ تا ۱۵/۰۸ تن در هکتار در محیط ۱۲ متغیر بود. محیط‌هایی که بازه‌های HPD آن‌ها همپوشانی ندارند، دارای تفاوت‌های معنی‌دار برای عملکرد دلنه بودند (شکل ۱). برناردو جونیور و همکاران (Bernardo Júnior *et al.*, 2018) ، تئودورو و همکاران (Teodoro *et al.*, 2019) و ناسیمنتو و همکاران (Nascimento *et al.*, 2025) نیز با به‌کارگیری تحلیل نواحی قابل اعتماد پسین در چارچوب مدل بیزی AMMI، تأکید کردند که این رویکرد می‌تواند استنباط دقیق‌تر و شناسایی قابل اعتمادتر ژنوتیپ‌های برتر را در محیط‌های مختلف امکان‌پذیر سازد.

جدول ۲- میانگین اثر پسین حاشیه‌ای حاصل از تحلیل بیزی AMMI برای عملکرد دانه (تن در هکتار) ذرت هیبریدهای ذرت مورد مطالعه و همچنین حدود پایین و بالای ناحیه بیشترین چگالی پسین (HPD) قابل اعتماد در سطح احتمال ۹۵ درصد

Table 2. Mean of the marginal posterior effects obtained from the AMMI analysis for grain yield (t ha^{-1}) of the studied maize hybrids, the lower and upper limits of the 95% highest posterior density (HPD) credible intervals

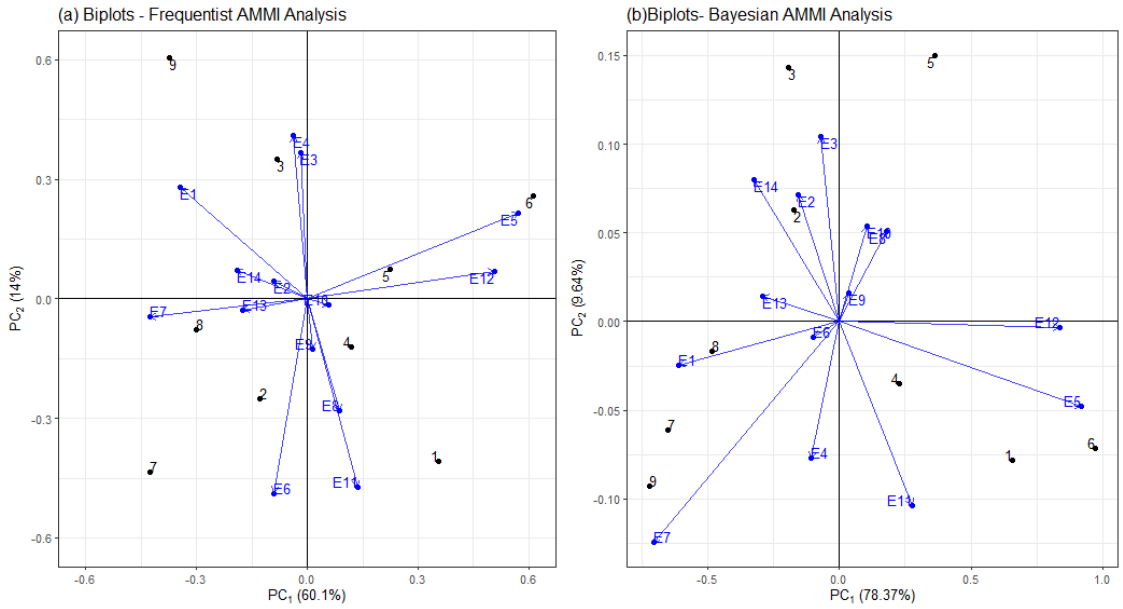
شماره No.	نام تلاقی Cross name	حد پایین بیشترین چگالی پسین lower HPD	میانگین بیشترین چگالی پسین Mean HPD	حد بالا بیشترین چگالی پسین Upper HPD
1	KE79017/5111×K1264/5-1	10.53	11.31	12.09
2	KE72012/12×B73	9.80	10.58	11.33
3	KE76009/311×B73	10.13	10.90	11.66
4	KE77003/3×B73	10.00	10.76	11.53
5	KE79015/6222×B73	9.51	10.28	11.02
6	OH43/1-42× B73	10.09	10.86	11.62
7	Kousha=K1263/17×S61	8.50	9.26	10.00
8	Dehghan=KE72012/12×K1263/1	9.36	10.13	10.88
9	Taha=KE76009/311×K1264/5-1	10.20	10.95	11.71



شـــکل ۱- میانگین آثار پســـین حاشـــیه‌ای حاصـــل از تحلیل بیزی AMMI برای عملکرد دانه (تن در هکتار) هیبریدهای ذرت برای (a) نه هیبرید و (b) ۱۴ محیط. همچنین حدود پایین و بالای نواحی چگالی بیشینه پسین (HPD) قابل اعتماد در سطح احتمال ۹۰ درصد نشان داده شده است

Fig. 1. Mean marginal posterior effects (t ha^{-1}) from the Bayesian AMMI analysis of grain yield for a) nine maize hybrids and b) 14 environments. The lower and upper bounds of Highest Posterior Density (HPD) creditable intervals at the 90% probability level are also shown

بای‌پلات‌ها، یکی بر اساس رویکرد کلاسیک و دیگری بر اساس رویکرد بیزی، روابط بین هیبریدها و محیط‌ها را نشـان می‌دهند (شـکل ۲). در رویکرد کلاسـیک، مولفه‌های PC1 و PC2، ۷۴/۱۰ درصـد از واریانس برهمکنش ژنوتیپ × محیط را توضـیح دادند، در حالی‌که در رویکرد بیزی این مولفه‌ها ۸۸/۰۱ از واریانس برهمکنش را توجیه کردند. بالا بودن واریانس تبیین‌شـده در چارچوب بیزی نشـان می‌دهـد کـه این چـارچوب قـابلیـت بیشـتری در استخراج ساختار واقعی برهمکنش ژنوتیپ × محیط دارد. این تفاوت حاکی از آن اسـت که مدل بیزی AMMI، با بهره‌گیری از اطلاعات پیشـین و ارائه برآوردهـای پسـین پـایـدارتر، بخش بزرگتری از تغییرات موجود در داده‌ها را شـناسـایی کرد، و به‌تبع آنـامکـان توصـیـف دقیق‌تر و قـابـل‌اعتمـادتری از الگوی تعـامـل هیبریـدهـا و محیط‌هـا فراهم آورد. ناسیمنتو و همکاران (Nascimento *et al.*, 2025) نشـــان دادند که دو مؤلفه اصـــلی نخســـت (PC1 و PC2) به ترتیب ۷۱/۳۰ درصـــد و ۷۹ درصـــد از واریـانس را برای رویکرد کلاسـیـک و بیزی توضیح دادند و تأکید کردند که این مقدار واریانس برای تفسـیر داده‌ها کافی اسـت، که نشـان‌دهنده توانـایی بـالای مـدل بیزی AMMI در توضـیـح تغییرات برهمکنش ژنوتیپ× محیط است.

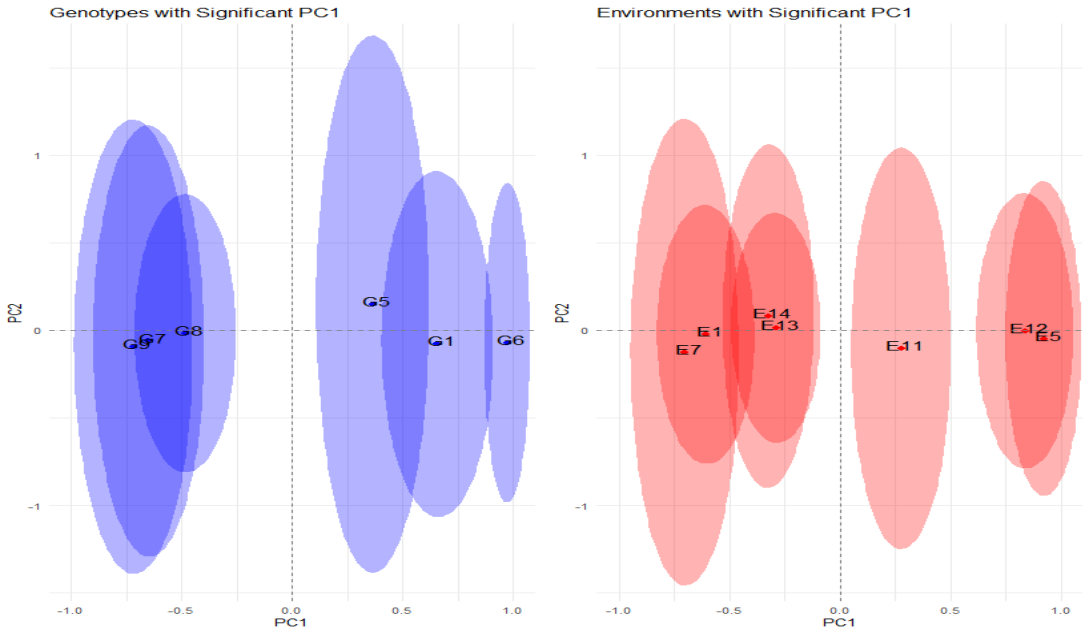


شکل ۲- بای‌پلات‌های حاصل از آزمایشهای چندمحیطی برای نه هیبرید ذرت و ۱۴ محیط که با استفاده از (a) مدل کلاسیک AMMI و(b) بیزی AMMI

Fig. 2. Biplots from the maize multi-environment trialw featuring nine promising hybrids and 14 environments, generated using (a) classical and (b) Bayesian AMMI analyses

هیبریدهای شماره ۷، ۹، ۶ و ۱ در روش کلاسیک و هیبریدهای ۹، ۳، ۵ و ۶ در مدل بیزی AMMI و همچنین محیط‌های ۶، ۴، ۵ و ۱۱ در روش کلاسیک و محیط‌های ۷، ۱۲، ۵ و ۱۱ در روش بیزی AMMI، دورترین موقعیت را از مرکز در هر دو بای‌پلات داشتند که نشان‌دهنده مشارکت قابل توجه آن‌ها در اثر برهمکنش ژنوتیپ × محیط است. در بای‌پلات هیچ هیبریدی نزدیک مرکز قرار نگرفت، به این معنا که عملکرد دانه آن‌ها در محیط‌های مختلف بسیار متفاوت بود و بنابراین پایداری عملکرد بالایی نداشتند (شکل ۲). در مقابل، محیط‌هایی مانند ۲ و ۱۰ در روش کلاسیک و محیط‌های ۶ و ۹ در روش بیزی AMMI نزدیک مرکز قرار گرفتند، که نمایانگر شرایط متوسط کلی محیط‌ها بود و توانایی تمایز هیبریدها را کمتر نشان دادند.

بای‌پلات بر اساس رویکرد بیزی AMMI و نواحی قابل اعتماد HPD درسطح احتمال ۹۰ درصد (مرزهای چگالی) را برای هیبریدها و محیط‌های مشخص نشان می‌دهد شکل (۳). به طور خاص، موقعیت هیبریدها و محیط‌ها مربوط به آنهایی است که ناحیه HPD شامل مقدار صفر برای مولفه اول در سطح احتمال ۹۰ درصد نمی‌شود. نواحی قابل اعتماد مربوط به مقادیر ژنوتیپی برای همه هیبریدها بجز هیبرید شماره ۲ و همچنین مقادیر محیطی برای محیط‌های ۱، ۵، ۷، ۱۱، ۱۲، ۱۳ و ۱۴ شامل مبدأ مختصات (۰، ۰) نمی‌شوند.



شکل ۳- بای‌پلات حاصل از تجزیه وتحلیل بیزی AMMI بر اساس میانگین برآوردهای پسین مولفه‌های برهمکنش ژنوتیپ × محیط، برای هیبریدهای ذرت (سمت چپ) و محیط‌ها (سمت راست)، برای هیبریدها و محیط‌هائیکه نواحی چگالی بیشینه پسین (HPD) قابل اعتماد آنها برای مولفه اول در سطح احتمال ۹۰ درصد شامل مقدار صفر نمی‌شود

Fig. 3. Biplot of Bayesian AMMI of the mean posterior estimates for genotype × environment interaction components for hybrids (left) and environments (right) at the 90% highest posterior density (HPD) credible intervals for hybrids and the environments that do not include the value of zero for the first principal component at the 90% probability level

به طور مشخص، هیبریدهای شماره ۷ و ۹ برای محیط‌های ۱ و ۷ مناسب تشخیص داده شدند، هیبرید شماره ۳ با محیط‌های ۱۳ و ۱۴ سازگار بودند، هیبرید شماره ۵ برای محیط ۱۱ توصیه می‌شود و هیبریدهای شماره ۱ و ۶ سازگاری خصوصی با محیط‌های ۱۲ و ۵ نشان دادند (شکل ۳). هیبرید شماره ۲ که در شکل ۳ نشان داده نشده است، پایداری عملکرد دانه را در محیط‌های ۲، ۳، ۴، ۶، ۸، ۹ و ۱۰ نشان داد. این هیبرید در شکل ۳ نمایش داده نشده زیرا نخستین مؤلفه اثر ضربی تعامل ژنوتیپ × محیط آن در سطح احتمال ۹۰ درصد معنی‌دار نبود (به عبارتی فاصله اعتماد ۹۵ درصد آن شامل صفر بود).

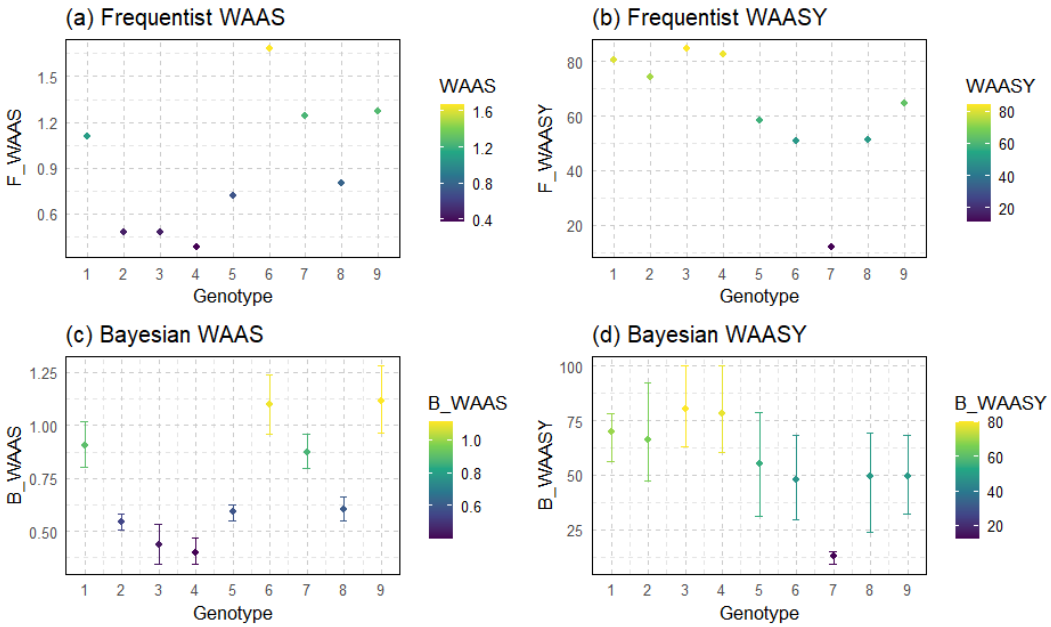
این پایداری عملکرد دانه مشاهده‌شده بیانگر آن است که بین این هیبرید و شرایط موجود در محیط‌های مذکور برهمکنش معنی‌داری وجود نداشت. با این حال، نباید صرفاً بر اساس این نتایج، این هیبریدها را به‌طور قطعی پایدار قلمداد کرد. پایداری مشاهده‌شده تنها مربوط به بخشی از محیط‌هاست که در آنها برهمکنش ژنوتیپ ×

محیط معنی‌دار نبود و به همین دلیل در بای‌پلات (شکل ۳) نمایش داده نشده‌اند. بنابراین، ارزیابی دقیق و کامل‌تر پایداری عملکرد دانه این هیبریدها مستلزم بررسی عملکرد دانه آنها در از محیط‌های بیشتر است. شایان توجه است که اگرچه نواحی قابل اعتماد بیشتر هیبریدها و محیط‌ها در بیش از یک ربع بای‌پلات پراکنده هستند، نواحی قابل اعتماد محیط‌های ۷، ۱۱ و ۱۴ و هیبریدهای ۹، ۷ و ۵ گستره به‌مراتب بیشتری را پوشش می‌دهند. این گسترش در دو ربع بای‌پلات بیانگر عدم‌قطعیت ذاتی بالاتر در پارامترهای برآوردی آنها است.

یافته‌های ناسیمنتو و همکاران (Nascimento *et al.*, 2025) نشان داد که به‌کارگیری مدل بیزی AMMIهمراه با نواحی قابل اعتماد پسین، امکان شناسایی دقیق‌تر هیبریدهای سازگار با محیط‌های خاص را فراهم کرد و عدم‌قطعیت برآورد پارامترها را به‌صورت بصری نمایش می‌دهد. همچنین، برناردو جونیور و همکاران (Bernardo Júnior *et al.*, 2018) و تئودورو و همکاران (Teodoro *et al.*, 2019) گزارش کردند که بای‌پلات‌های بیزی با نواحی قابل اعتماد، ابزار مؤثری برای تجزیه و تحلیل برهمکنش ژنوتیپ × محیط و انتخاب هدفمند هیبریدهای ذرت با عملکرد دانه بالا و پایدار هستند. دا سیلوا و همکاران (da Silva *et al.*, 2025a; da Silva *et al.*, 2025b) نیز تأکید کردند که انعطاف‌پذیری بالای مدل بیزی AMMI در شناسایی زیرگروه‌های ژنوتیپی و محیطی مشابه، موجب برآوردهای دقیق‌تر و قابل اعتمادتر می‌شود. به‌طورکلی، پراکندگی بیشتر نواحی قابل اعتماد در برخی هیبریدها و محیط‌ها، مشابه یافته‌های ناسیمنتو و همکاران (Nascimento *et al.*, 2025) بود، و بیانگر پیچیدگی بیشتر برهمکنش و اهمیت تجزیه و تحلیل بیزیAMMI در افزایش اعتماد تصمیم‌گیری‌ها در برنامه‌های به‌نژادی ذرت است.

مقادیر برآوردشده شاخص پایداری WAAS هیبریدها با استفاده از رویکردهای کلاسیک و بیزی AMMI در شکل ۴ (a و c) ارائه شده است. این شاخص، معیار پایداری عملکرد دانه هیبریدهای ذرت در برابر تغییرات محیطی است و مقادیر کمتر WAAS و B-WAAS نشان‌دهنده پایداری عملکرد دانه بالاتر و حساسیت کمتر هیبریدها به تغییرات محیطی است. براساس نتایج این پژوهش، در هر دو رویکرد، هیبرید شماره ۶ بیشترین مقدار WAAS را داشت و با ناپایدارترین عملکرد دانه شناخته شد، در حالی که هیبرید شماره ۴ کمترین مقدار WAAS را داشت و پایدارترین عملکرد دانه را داشت. همچنین، بر اساس مقادیر B-WAAS، پس از هیبرید شماره ۴، هیبرید شماره ۳ کمترین مقدار این شاخص را داشت و تفاوت پایداری عملکرد دانه این دو هیبرید معنی‌دار نبود.

گروه بعدی شامل هیبریدهای شماره ۲، ۵ و ۸ بود که تفاوت آنها با یکدیگر و با هیبرید شماره ۳ معنی‌دار نبود و به‌عنوان هیبریدهای دارای عملکرد نسبتاً پایدار دسته‌بندی شدند. پس از آن،



شکل ۴ – مقادیر برآورد شده میانگین عملکرد دانه (Y) و میانگین وزنی قدر مطلق پایداری عملکرد دانه (WAAS)همراه با WAASY برای هیبریدهای ذرت، بر اساس دو رویکرد کلاسیک (a و b) و بیزی AMMI (c و d) با در نظر گرفتن به ترتیب وزن‌های ۶۵ و ۳۵ برای عملکرد دانه و پایداری آن

Fig. 4. Estimated values of grain yield (Y) and the weighted average of absolute yield stability (WAAS), together with WAASY, for the maize hybrids based on the and classic (a and b) and Bayesian AMMI (c and d) approaches, considering weights of 65% and 35% for grain yield and yield stability, respectively

هیبریدهای شماره ۱ و ۷ پایداری عملکرد دانه متوسط داشتند و تفاوت آنها با گروه‌های دیگر معنی‌دار بود. در مقابل، هیبریدهای شماره ۶ و ۹ بیشترین مقادیر B-WAAS را داشتند و در نتیجه به‌عنوان هیبریدهای با ناپایدارترین عملکرد دانه گروه‌بندی شدند (شکل c۴). علاوه بر این، هیبرید شماره ۱ نه‌تنها عملکرد مطلوبی داشت، بلکه مقدار B-WAAS آن نیز در محدوده پایداری عملکرد دانه متوسط قرار داشت.

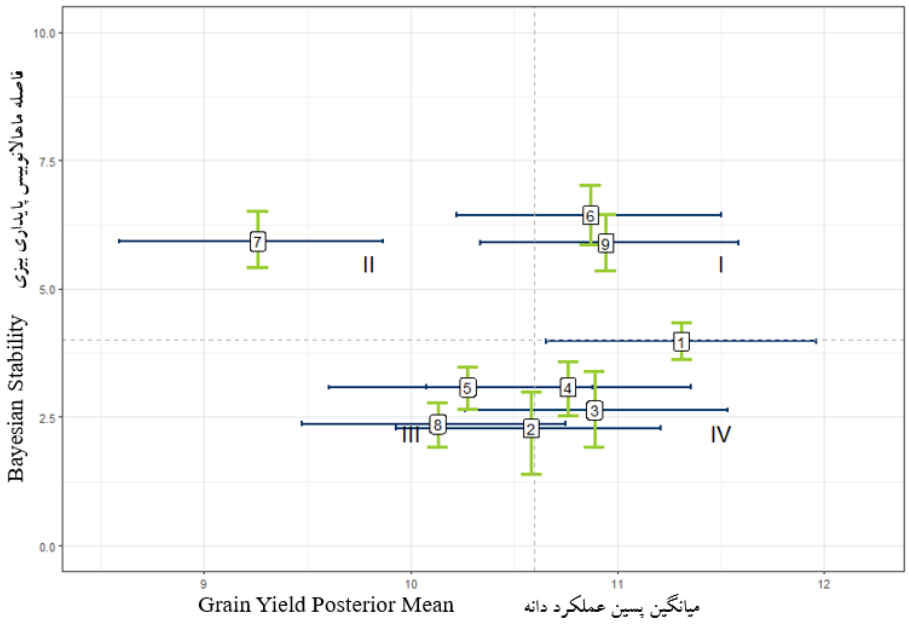
بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که این هیبرید شماره ۱ از پایداری عملکرد دانه قابل قبول برخوردار بود و در گروه هیبریدهای با عملکرد دانه مناسب و پایداری عملکرد دانه نسبی قرار گرفتند. از این رو، هیبرید شماره ۱ گزینه مناسبی برای برای استفاده در برنامه‌های به‌نژادی ذرت و معرفی به عنوان یک هیبرید تجاری شناسایی شد. در مقابل، اگرچه هیبرید شماره ۹ (رقم شاهد سینگل کراس ۴۱۰) عملکرد دانه نسبتاً بالایی داشت، مقدار بالای B-WAAS آن نشان‌دهنده واکنش شدید به تغییرات محیطی و پایداری عملکرد دانه آن پایین بود. این یافته ها، اهمیت توجه همزمان به

عملکرد دانه و پایداری آن در فرآیند ارزیابی و انتخاب هیبریدهای ذرت را برجسته می‌سازد.

زمانی که عملکرد دانه و پایداری عملکرد متوسط به‌طور هم‌زمان در شاخص WAASY لحاظ شوند، هیبریدهای شماره ۳ و ۷ به ترتیب بیشترین و کمترین عملکرد دانه را در هر دو رویکرد کلاسیک و بیزی AMMI نشان دادند. در رویکرد بیزی AMMI، هیبرید شماره ۷ از نظر این شاخص تفاوت معنی‌داری با سایر هیبریدهای ذرت مورد ارزیابی داشت، در حالی که تفاوت بین سایر هیبریدها در سطح احتمال ۹۵ درصد معنی‌دار نبود، هرچند هیبریدهای شماره ۳، ۴، ۱ و ۲ به ترتیب مقادیر بالاتری از شاخص WAASY را نشان دادند (شکل ۴d). (Nascimento *et al.*, ناسیمنتو و همکاران 2025) نیز با به‌کارگیری شاخص‌های B-WAAS و B-WAASY در بررسی عملکرد دانه و پایداری آن در ژنوتیپ‌های ذرت در شرایط چندمحیطی، نتیجه گرفتند که این شاخص‌ها ابزارهای کارآمدی برای شناسایی ژنوتیپ‌های با عملکرد بالا و پایدار بودند. زیرا علاوه بر در نظر گرفتن نوسانات محیطی، نواحی HPD قابل اعتماد نیز نتایج را به‌صورت دقیق و شفاف نشان دادند. شاخص WAASپایداری عملکرد دانه هیبریدها را اندازه‌گیری می‌کند، در حالی که WAASY یک شاخص ترکیبی است که میانگین عملکرد و پایداری آنرا را با وزن‌های تعیین‌شده توسط کاربر ترکیب می‌کند. این شاخص‌ها با بهره‌گیری از مزایای مدل‌های AMMI و BLUP ابزارهای مناسبی برای شناسایی واریته‌های برتر در آزمایش‌های چندمحیطی محسوب می‌شوند.

اگرچه این معیارها ابزارهای مفیدی ارائه می‌دهند، اما در چارچوب روش‌های کلاسیک آماری توسعه یافته‌اند و انجام استنتاج آماری مستقیم را دشوار می‌کنند، زیرا تعیین توزیع دقیق مقادیر شاخص‌ها مانند نسبت‌ها یا ترکیب خطی متغیرهای تصادفی معمولاً پیچیده است. رویکرد بیزی AMMI با محاسبه مستقیم توزیع احتمالات هر کمیت، بدون نیاز به روش‌های تقریب یا برآورد جانبی، این محدودیت را برطرف می‌کند و امکان استنتاج آماری شفاف و قابل اعتماد برای این شاخص‌ها را فراهم می‌کند(Nascimento *et al.*, 2025). اگرچه نتایج هر دو رویکرد در شناسایی هیبریدهای با پایداری و ناپایداری عملکرد دانه مطابق انتظار مشابه بود، در مدل بیزی AMMI برآوردهای عملکرد دانه و پایداری آن برای هیبریدهای ذرت به‌صورت بازه‌های پسین ارائه می‌شوند، نه برآوردهای نقطه‌ای. بنابراین، مدل بیزی AMMI این امکان را فراهم می‌آورد که هیبریدهای ذرت با لحاظ عدم‌قطعیت به‌طور مستقیم مقایسه شوند و تفاوت های عملکرد دانه و پایداری آن با روش‌های آماری آزمون و تفاوت‌های معنی‌دار شناسایی شوند، در حالی که در رویکرد کلاسیک چنین ارزیابی دقیقی ممکن نیست. بنابراین، مدل بیزی AMMI برتری خود را در ارائه برآوردهای قابل اعتماد و تفسیر دقیق‌تر نتایج چندمحیطی نشان می‌دهد.

نمودار مشترک مقادیر برآورد شده شاخص فاصله ماهالانوبیس پایداری عملکرد بیزی (SM)، میانگین‌های پسین حاشیه‌ای عملکرد دانه و فاصله قابل اعتماد ۹۰ درصد آنها را در شکل ۵ ارائه شده است. هیبریدهای شماره ۳، ۴ و ۱ برای استفاده در برنامه‌های به‌نژادی ذرت مناسب شناسایی شدند، زیرا در ربع چهارم (IV) قرار گرفتند و ترکیب عملکرد دانه بالا و پایداری عملکرد مناسب را نشان می‌دهند. از سوی دیگر، هیبریدهای شماره ۶ و ۹ عملکرد دانه بالاتری داشتند، اما پایداری عملکرد پایین‌تری نشان دادند (شکل ۵). با در نظر گرفتن فواصل قابل اعتماد ۹۰ درصد برای شاخص SM، مشاهده می‌شود که پایداری عملکرد بین هیبریدها تفاوت معنی‌داری از نظر این شاخص داشت. به‌طوری‌که گروه هیبریدهای با پایداری عملکرد دانه مطلوب شامل هیبریدهای شماره ۱، ۲، ۳، ۴، ۵ و ۸ بودند و گروه با پایداری عملکر دانه کم شامل هیبریدهای شماره ۶، ۷ و ۹ بود. نکته قابل توجه این است که هیچ‌یک از هیبریدها در نزدیکی صفر محور SM قرار نگرفتند، که نشان‌دهنده آن است که همه هیبریدها ممکن است در محیط‌های مختلف سطحی از تغییرات عملکرد دانه را نشان دهند.



شکل ۵- نمودار صفت پایداری ماهالانوبیس (SMT) مقادیر برآورد شده شاخص فاصله ماهالانوبیس پایداری عملکرد دانه بیزی (SM index) ، میانگین‌های پسین حاشیه‌ای عملکرد دانه و نواحی ۹۰ درصد چگالی بیشینه پسین (HPD) حاصل از تجزیه و تحلیل بیزی AMMI برای عملکرد دانه هیبریدهای ذرت

Fig. 5. Mahalanobis stability trait (SMT) plot showing the estimated values of the Bayesian Mahalanobis Stability Index (SM index), marginal posterior means of grain yield, and the 90% highest posterior density (HPD) intervals obtained from the Bayesian AMMI analysis for grain yield of maize hybrids

یافته‌های پژوهش حاضر با نتایج ناسیمنتو و همکاران (Nascimento *et al.*, 2025) هم‌خوانی دارد. آن‌ها نیز با استفاده از نمودار SMT نشان دادند که عملکرد هیچ‌یک از ژنوتیپ ها کاملاً پایدارنبود و همه تا حدی از مقدار صفر فاصله داشتند، که بیانگر وجود تغییرات عملکرد دانه در شرایط چندمحیطی بود. در هر دو پژوهش، ژنوتیپ‌های واقع در ربع چهارم به‌عنوان گزینه‌های برتر معرفی شدند، زیرا ترکیب مطلوبی از عملکرد دانه و پایداری عملکرد بالا مناسب نشان دادند. این هم‌سویی نتایج در پژوهش فاوق الذکر تأیید می‌کند که شاخص SM و نمودار SMT می‌توانند ابزارهای کارآمدی برای تجزیه و تحلیل همزمان عملکرد دانه و پایداری آن باشند. همچنین، استفاده از چارچوب بیزی در این نوع تجزیه و تحلیل‌ها با فراهم‌کردن فواصل قابل اعتماد، ارزیابی دقیق‌تر و تفسیر مطمئن‌تری از برهمکنش ژنوتیپ × محیط را ممکن می‌سازد و تصمیم‌گیری در برنامه‌های به‌نژادی ذرت را بهبود می‌بخشد.

به طور کلی، بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش حاضر، هیبرید شماره ۱ بیشترین عملکرد دانه را نشان داد و همراه با هیبریدهای شماره ۳ و ۹ در یک گروه قرار گرفت. شاخص‌های پایداری عملکرد دانه WAAS و B-WAAS نشان دادند که هیبریدهای شماره ۳ و ۴ دارای عملکرد دانه پایدارترو هیبریدهای شماره ۶ و ۹ دارای عملکرد دانه ناپایدارتر بودند، در حالی که شاخص‌های ترکیبی WAASY و B-WAASY و تحلیل نمودارSMT، عملکرد دانه و پایداری مطلوب آن برای هیبریدهای شماره ۱، ۳ و ۴ را به خوبی منعکس کردند.

رویکرد کلاسیک AMMI قادر به برآورد و نمایش عدم‌قطعیت پارامترها نیست، در حالی که استنباط بیزی AMMI این عدم‌قطعیت را لحاظ کرده و با ارائه نواحی قابل اعتماد پیرامون پارامترهای برهمکنش ژنوتیپ × محیط، امکان تفسیر دقیق‌تر نتایج و تصمیم‌گیری آگاهانه‌تر را فراهم می‌کند. بر خلاف رویکرد کلاسیک AMMIکه شاخص WAAS تنها ژنوتیپ‌های «بهترین» و «بدترین» را مشخص می‌کند، رویکرد بیزی AMMI با استفاده از همپوشانی فواصلHPD، امکان گروه‌بندی هیبریدها با پایداری عملکرد دانه مشابه را فراهم می‌آورد. شاخص B-WAASY نیز که همزمان میانگین عملکرد دانه پایداری آنرا را در نظر می‌گیرد، اطلاعات مفیدی برای انتخاب ژنوتیپ‌ها ارائه داد.

در مجموع، این نتایج اهمیت چارچوب بیزی AMMI در تجزیه و تحلیل را برای شناسایی هیبریدهای ذرت یا محیط‌های مؤثر در برهمکنش ژنوتیپ × محیط و انتخاب هیبریدهای برتر بر اساس شاخص‌های مبتنی بر AMMI تأکید می‌کنند. شاخص‌های وزنی بیزی، شامل B-WAAS برای پایداری و B-WAASY برای ترکیب میانگین عملکرد دلنه و پایداری آن، امکان استنتاج آماری دقیق درباره عملکرد دانه و پایداری آن برای هیبریدها را فراهم کردند. همچنین،

نمودار SMT کـه ترکیبی از میـانگین عملکرد و پایداری عملکرد است، امکان شناسایی هیبریدهای ذرت منـاســـب برای اســـتفـاده در برنـامـه‌هـای بـه‌نژادی ذرت را فراهم کرد. هیبریـدهـای واقع در ربع چهـارم، بـه‌ویژه بـه دلیـل عملکرد دانـه و پایداری عملکرد بالا، را برجســـته و قابل توجه می باشند.

سپاسگزاری

این مقـالـه بـا اســـتفـاده از داده‌هـای پروژه تحقیقاتی مصـــوب ۰۰-۰۳-۰۳-۰۲۴-۰۰۰۳۳۱،

موسسـه تحقیقات اصـلاح و تهیه نهال و بذر تهیه و نگارش شـده اسـت. نگارندگان بدینوسـیله از پشتیبانی مالی و مساعدت های موسسه تحقیقات اصـــلاح و تهیـه نهـال و بـذر و همکـاری مراکز تحقیقات و آموزش کشـــاورزی و منابع طبیعی همکار سپاسگزاری می کنند.

عدم تعارض منافع

نگـارنـدگـان اعـلام مـی دارنـد کـه هـیـچ گونه تعارض منافعی باهم و ســـایر اشـــخاص حقیقی/حقوقی ندارند.

References

Annicchiarico, P. 2002. Genotype × environment interactions: Challenges and opportunities for plant breeding and cultivar recommendations. *Volume 174 of FAO Plant Production and Protection Papers. 174.* 115 pp.

Bernardo Júnior, L.A.Y., de Silva, C.P., de Oliveira, L.A., Nuvunga, J.J., Pires, L.P.M., Von Pinho, R.G. and Balestre, M. 2018. AMMI Bayesian models to study stability and adaptability in maize. *Agronomy Journal, 110*(5), pp.1765–1776. DOI: 10.2134/agronj2017.11.0668

Crossa, J., Perez-Elizalde, S., Jarquín, D., Cotes, J. M., Viele, K., Liu, G. and Cornelius, P. L. 2011. Bayesian estimation of the additive main effects and multiplicative interaction model. *Crop Science, 51,* pp.1458–1469. DOI: 10.2135/cropsci2010.06.0343

da Oliveira, L.A., da Silva, C.P., da Silva, A.Q., Mendes, C.T.E., Nuvunga, J.J., Nunes, J.A.R., Parrella, R.A.D.C., Baleste, M. and Filho, J.S.D.S.B. 2021. Bayesian GGE model for heteroscedastic multienvironmental trials. *Crop Science, 62*(3), pp.982–996. DOI: 10.1002/csc2.20696

da Silva, C.P., Mendes, C.T.E., Silva, A.Q.D., Oliveira, L.A.D., Von Pinho, R.G. and Balestre, M. 2023. Use of the reversible jump Markov Chain Monte Carlo algorithm to select multiplicative terms in the AMMI-Bayesian model. *PLoS One, 18*, e0279537.

DOI:10.1371/journal.pone.0279537

da Silva, C.P., da Silva, A.Q., Nuvunga, J.J., Avelar, F.G., Braulio, R., Mendes, C.T.E., de Oliveira, L.A. and Bueno Filho, J.S.D.S. 2025a. Assessing the adaptability and stability of maize hybrids using a Bayesian factor analytic model. *Crop Science, 65*(5), e70162. DOI: 10.1002/csc2.70162

da Silva, E.V.P., Davide, L.M.C., Gianlup, C., de Oliveira, W.J.S., de Oliveira, L.A., da Silva, A.Q., da Silva, C.P., Mendes, C.T.E. and Khan, S. 2025b. Assessing the stability and adaptability of maize hybrid yield with the Bayesian AMMI model. *Euphytica, 221*(4), 43. DOI: 10.1007/s10681-025-03490-y

Denis, J.-B. and Pazman, A. 1999. Bias of LS estimators in nonlinear regression models with constraints. Part II: Biadditive models. *Applied Mathematics, 44*, pp.375–403. DOI: 10.1023/A:1023045028073

Ebrahimi, L. 2023. 'Genotype by yield* trait'(GYT) biplot approach to evaluate resistance of soybean cultivars to *Helicoverpa armigera* Hübner under natural infestation conditions. *Phytoparasitica*, *51*(4), pp.909–918. DOI: 10.1007/s12600-023-01078-7

Forkman, J. and Piepho, H.P. 2014. Parametric bootstrap methods for testing multiplicative terms in GGE and AMMI models. *Biometrics, 70*, pp.639–647. DOI: 10.1111/biom.12162

Gabriel, K.R. 1971. The biplot graphic display of matrices with application to principal component analysis. *Biometrika, 58*, pp.453–467. DOI: 10.1093/biomet/58.3.453

Gamerman, D. and Lopes, H.F. 2006. Markov chain Monte Carlo: Stochastic simulation for Bayesian inference. *Chapman and Hall.* DOI: 10.1201/9781482296426

Gelman, A. and Rubin, D.B. 1992. Inference from iterative simulation using multiple sequences. *Statistical Science, 7*, pp.457–511. DOI: 10.1214/ss/1177011136

Geman, S. and Geman, D. 1984. Stochastic relaxation, Gibbs distributions, and the Bayesian restoration of images. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 6*, pp.721–741. DOI: 10.1109/TPAMI.1984.4767596

Geweke, J. 1992. Evaluating the accuracy of sampling-based approaches to the calculation of posterior moments. Pp. 169–193. In: L. M. Bernardo, J. Berger, A. P. Dawid, and A. F. M. Smith (eds.) *Bayesian statistics*. Oxford University Press.

Johnson, R.A. and Wichern, D.W. 2002. Applied multivariate statistical analysis. Fifth edition. *Prentice Hall.* 788 pp.

Josse, J., van Eeuwijk, F., Piepho, H.P. and Denis, J.-B. 2014. Another look at

Bayesian analysis of AMMI models for genotype-environment data. *Journal of Agricultural, Biological, and Environmental Statistics, 19,* pp.240–257. DOI: 10.1007/s13253-014-0168-z

Khan, M.M.H., Rafii, M.Y., Ramlee, S.I., Jusoh, M. and Al Mamun, M. 2021. AMMI and GGE biplot analysis for yield performance and stability assessment of selected Bambara groundnut (*Vigna subterranea* L. Verdc.) genotypes under the multi-environmental trials (METs). *Scientific Reports, 11,* e22791. DOI: 10.1038/s41598-021-01411-2

Kona, P., Ajay, B. C., Gangadhara, K., Kumar, N., Choudhary, R.R., Mahatma, M.K., Singh, S., Reddy, K.K., Bera, S.K., Sangh, C., Rani, K., Chavada, Z. and Solanki, K.D. 2024. AMMI and GGE biplot analysis of genotype by environment interaction for yield and yield contributing traits in confectionery groundnut. *Scientific Reports, 14,* e2943. DOI: 10.1038/s41598-024-52938-z

Nascimento, A.C.C., Nascimento, M., Sagae, V.S., Destro, V., Nardino, M., Olivoto, T. and Jarquín, D. 2025. Bayesian AMMI-based indexes for genotype selection: Integrating novel stability measures for enhanced G× E inference. *Crop Science, 65*(5), e70140. DOI: 10.1002/csc2.70140

Olivoto, T., Lúcio, A.D.C., Silva, J.A.G., Marchioro, V.S., Souza, V.Q. and Jost, E. 2019. Mean performance and stability in multi-environment trials I: Combining features of AMMI and BLUP techniques. *Agronomy Journal, 111,* pp.2949–2960. DOI: 10.2134/agronj2019.03.0220

Perez-Elizalde, S., Jarquín, D. and Crossa, J. 2012. A general Bayesian estimation method of linear-bilinear models applied to plant breeding trials with genotype × environment interaction. *Journal of Agricultural, Biological, and Environmental Statistics, 17,* pp.15–37. DOI: 10.1007/s13253-011-0063-9

R Core Team. 2024. R: the R project for statistical computing. *https://www.r-project.org*

Raftery, A.E. and Lewis, S.M. 1992. One long run with diagnostics: Implementation strategies for Markov chain Monte Carlo. *Statistical Science, 7,* pp.493–497. DOI: 10.1214/ss/1177011143

Shiri, M.R., Estakhr, A., Najafinezhad, H., Hassanzadeh Moghaddam, H., Shirkhani, A. and Ataei, R. 2024. Employing Bayesian probabilistic approach for risk assessment in selection and recommendation of new maize (*Zea mays* L.) hybrids. *Seed and Plant, 40,* pp.295–320 (in Persian). DOI: 10.22092/spj.2025.368724.1410

Shiri, M., Estakhr, A., Fareghi, Sh., Najafinezhad, H., Khorasani, S.K., Eshraghi-

Nejad, M., Afarinesh, A., Anvari, K. and Ebrahimi, L. 2025a. Evaluating the efficiency of AMMI, GGE biplot, and HO-AMMI stability analysis models for selecting high-yielding and stable maize hybrids in multi-environment trials. *Advanced Environmental Science, 23*(2), pp.461–476 (in Persian). DOI: 10.48308/envs.2024.1421

Shiri, M., Estakhr, A., Shikhani, A., Mosavat, A. and Bahmankar, M. 2025b. The risk analysis for high-potential and stable cultivars recommendation in maize. *Iranian Journal of Field Crop Science, 56*(2), pp.77–90 (in Persian). DOI: 10.22059/ijfcs.2024.384144.655108

Shiri, M., Moharramnejad, S., Estakhr, A., Fareghi, S., Najafinezhad, H., Khavari Khorasani, S., Afarinesh, A. and Eshraghi-Nejad, M. 2025c. Strategic risk analysis for the selection of stable and high-potential maize genotypes in multi-environment trials. *PLoS One, 20*(6), e0325454. DOI: 10.1371/journal.pone.0325454

Smith, B. J. 2007. boa: An R package for MCMC output convergence assessment and posterior inference. *Journal of Statistical Software, 21,* pp.1-37. DOI: 10.18637/jss.v021.i11

Teodoro, P.E., Azevedo, C.F., Farias, F.J.C., Alves, R.S., de Azevedo Peixoto, L., Ribeiro, L.P., Paulo de Carvalho, L. and Bhering, L.L. 2019. Adaptability of cotton (*Gossypium hirsutum*) genotypes analysed using a Bayesian AMMI model. *Crop and Pasture Science, 70*(7), pp.615–621. DOI: 10.1071/CP18318

Viele, K. and Srinivasan, C. 2000. Parsimonious estimation of multiplicative interaction in analysis of variance using Kullback—Leibler information. *Journal of Statistical Planning and Inference, 84*, pp.201–219. DOI: 10.1016/S0378-3758(99)00151-2

Yang, R.-C., Crossa, J., Cornelius, P.L. and Burgueño, J. 2009. Biplot analysis of genotype × environment interaction: Proceed with caution. *Crop Science, 49*, pp.1564–1576. DOI: 10.2135/cropsci2008.11.0665

DOI: 10.22092/spj.2026.371268.1455

RESEARCH ARTICLE

Advanced AMMI Bayesian Models for Analysis of Grain Yield Stability of Maize Hybrids in Multi-Environment Trials: A Comparison of Classical and Bayesian Approaches

M. Shiri[1]*, S. Moharramnejad[2], H. Najafinezhad[3], A. Estakhr[4], P. Jafari[5], M. R. Kiani[6], M. Mottaghi[7], B. Ahmadi[8] and L. Ebrahimi[9]

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, Field and Horticultural Crops Science Research Department, Ardabil Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Moghan, Iran.
3. Associate Professor, Field and Horticultural Crops Science Research Department, Kerman Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Kerman, Iran.
4. Assistant Professor, Field and Horticultural Crops Science Research Department, Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Shiraz, Iran.
5. Assistant Professor, Field and Horticultural Crops Science Research Department, Isfahan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Isfahan, Iran.
6. Assistant Professor, Field and Horticultural Crops Science Research Department, Khorasan Razavi Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Mashhad, Iran.
7. Assistant Professor, Field and Horticultural Crops Science Research Department, Hamedan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Hamedan, Iran.
8. Assistant Professor, Maize and Forage Crops Research Department, Seed and Plant Improvement Institute, Agricultural Research Education and Extension Organization, Karaj, Iran.
9. Associate Professor, **Biological Control Research Department, Iranian Research Institute of Plant Protection, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Tehran, Iran.**

ABSTRACT

Shiri, M., Moharramnejad, S., Najafinezhad, H., Estakhr, A., Jafari, P., Kiani, M R., Mottaghi, M., Ahmadi, B. and Ebrahimi, L. 2025. Advanced AMMI Bayesian models for analysis of grain yield stability of maize hybrids in multi-environment trials: A comparison of classical and bayesian approaches. *Seed and Plant, 40*, pp.599-624 (in Persian).

Plant breeders commonly use the AMMI model to analyse multi-environment trials data and to identify genotype × environment interaction (GEI) patterns. AMMI-based indices such as the Weighted Average of Absolute Scores (WAAS) and the Weighted Average of Absolute Scores combined with yield (WAASY) help breeders to select superior genotypes across different environments. Despite its wide application, the classical AMMI model has limitations in statistically evaluating and representing the uncertainty of GEIs. In this study, six maize promising hybrids and three commercial checks (Kosha, Dehgan and Taha) were evaluated using randomized complete block design with three replications in seven agricutural research field stations; Karaj, Mashhad, Isfahan, Hamedan, Kerman, Moghan, and Shiraz in Iran over two cropping seasons 2021–2023. A Bayesian AMMI model and its indices, including B-WAAS, B-WAASY, and the Mahalanobis Stability Index (SM), were applied to for analyzing yield and yield stability of studied maize hybrids, and the results were compared with the classical AMMI model. The Bayesian AMMI model explained 88.01% of GEI variance, while the classical AMMI model explained 74.10%. Hybrids no. 3 and 4 were the most yield-stable, and hybrids no. 6 and 9 the least yield-stable. Combined indices and SMT plots identified hybrids no. 1, 3, and 4 as high-yielding and yild-stable. Therefore, hybrids no. 1 and 3 can be used in the maize breeding programs and recommended for being commercially released for target maize growing areas.

Keywords: Maize, Bayesian stability indices, genotype × environment interaction, specific adaptation, wide adaptation.

Introduction

Maize (*Zea mays* L.) is one of the most important agricultural crops due to its high nutritional and commercial values, and is widely used for human food and animal feed. Plant breeding plays a crucial role in developing high-yielding and stress-tolerant genotypes (Shiri *et al.*, 2024). Hybrid development, a major approach in genetic improvement, enables the combination of desirable phenotypes with superior genetics, leading to enhanced yield performance and stability, and adaptability. Since genotypes respond differently to environmental conditions, multi-environment trials (METs) are essential in final breeding stages to evaluate genotype performance and assess genotype × environment interactions (GEI).

The AMMI (Additive Main Effects and Multiplicative Interaction) model is widely used for analysing METs data and identifying yield stability and mega-environments (Olivoto *et al.*, 2019). However, the classical AMMI model has statistical limitations. The Bayesian AMMI model overcomes these by incorporating prior information and estimating full posterior distributions (Crossa *et al.*, 2011). Recent study (Nascimento *et al.*, 2025) has introduced Bayesian-based indices such as B-WAAS, B-WAASY, and the Mahalanobis Stability Measure (SM), which provide more accurate inference and visualization of uncertainty. Therefore, this study aimed to evaluate the yield performance and stability of maize promising hybrids using Bayesian AMMI and its indices compared with classical AMMI to support more informed maize hybrid breeding decisions.

Materials and Methods

In this study, six maize promising hybrids and three commercial checks (Kosha, Dehgan and Taha) were evaluated using randomized complete block design with three replications in seven Agricutural research field stations; Karaj, Mashhad, Isfahan, Hamedan, Kerman, Moghan, and Shiraz in Iran over two cropping seasons 2021–2023. Each plot consisted of four 5.44 m rows spaced 0.75 m apart, with 0.32 m between hills and two plants per hill, resulting in a density of about 83,000 plants ha^{-1}. Standard agronomic practices were applied, including irrigation, weed and pest management, and fertilization based on local soil tests.

The Bayesian AMMI model was implemented as described by Crossa *et al.* (2011), where phenotypic responses followed a multivariate normal distribution with priors assigned to all parameters. Posterior distributions were estimated using Markov Chain Monte Carlo (MCMC) with 30,000 replications, a burn-in of 5,000 replications, and thinning every five samples via the Gibbs sampler. Convergence was assessed using Geweke and Raftery–Lewis diagnostics. Bayesian AMMI-based indices; B-WAAS, B-WAASY, and the Mahalanobis stability index (SM)—were derived directly from posterior samples. The Mahalanobis stability trait (SMT) plot was generated to visualize yield stability relationships and 90% HPD intervals. All analyses were conducted in R using the ChiDO framework (Nascimento *et al.*, 2025).

Results and Discussion

The Bayesian AMMI model demonstrated satisfactory convergence, with 98.58% of parameters showing $|Z| < 1.96$ and 92.63% having Raftery–Lewis <5, indicating stable

MCMC chains. Posterior mean grain yield of nine maize hybrids in 14 environments ranged from 9.26 t ha^{-1} (hybrid no. 7) to 11.31 t ha^{-1} (hybrid no. 1), with hybrids no. 1, 3, and 9 performing the top-yielding group. Grain yields varied widely (3.20–15.08 t ha^{-1}) in different environments, reflecting high GEI. The Bayesian AMMI analysis explained 88.01% of the interaction variance outperforming the classical AMMI model (74.10%), and highlighting its effectiveness in capturing GEI patterns.

Biplot analysis based on the Bayesian AMMI model, using posterior means and 90% HPD credible intervals, identified hybrids no. 3, 5, 6, and 9 and environments 5, 7, 11, and 12 as major contributors to GEI, indicating their strong influence on genotype-by-environment variability. HPD credible inetrvals visualized parameter uncertainty and confirmed genotype-specific adaptation. Stability indices ranked hybrids no. 3 and 4 as the most yield-stable, while hybrid no. 6 and 9 were least yield-stable. Combined indices, WAASY, B-WAASY and the SMT plot highlighted hybrids no. 1, 3, and 4 as both high-yielding and yiled-stable. Overall, the Bayesian AMMI approach provided a robust and informative framework for simultaneous evaluation of grain yield and yiled stability of the studied maize hybrids, and accounted for uncertainty and enabling more reliable selection of superior maize hybrids for being used in maize breeding programs and commercial release.

References

Crossa, J., Perez-Elizalde, S., Jarquín, D., Cotes, J. M., Viele, K., Liu, G. and Cornelius, P. L. 2011. Bayesian estimation of the additive main effects and multiplicative interaction model. *Crop Science, 51*, pp.1458–1469. DOI: 10.2135/cropsci2010.06.0343

Nascimento, A.C.C., Nascimento, M., Sagae, V.S., Destro, V., Nardino, M., Olivoto, T. and Jarquín, D. 2025. Bayesian AMMI-based indexes for genotype selection: Integrating novel stability measures for enhanced G× E inference. *Crop Science, 65*(5), e70140. DOI: 10.1002/csc2.70140

Olivoto, T., Lúcio, A.D.C., Silva, J.A.G., Marchioro, V.S., Souza, V.Q. and Jost, E. 2019. Mean performance and stability in multi-environment trials I: Combining features of AMMI and BLUP techniques. *Agronomy Journal, 111*, pp.2949–2960. DOI: 10.2134/agronj2019.03.0220

Shiri, M.R., Estakhr, A., Najafinezhad, H., Hassanzadeh Moghaddam, H., Shirkhani, A. and Ataei, R. 2024. Employing Bayesian probabilistic approach for risk assessment in selection and recommendation of new maize (*Zea mays* L.) hybrids. *Seed and Plant, 40*, pp.295–320 (in Persian). DOI: 10.22092/spj.2025.368724.1410

*Corresponding author: mohammadrezashiri52@gmail.com Tel.: +982634852052

Received: 01 November 2024
Accepted: 25 January 2025