DOI: 10.22092/spj.2025.368724.1410

"نهال و بذر"
جلد ۴۰، شماره ۳، سال ۱۴۰۳

مقاله پژوهشی

استفاده از رویکرد احتمالات بیزی برای ارزیابی ریسک در انتخاب و توصیه هیبریدهای جدید ذرت (*Zea mays* L.)

Employing Bayesian Probabilistic Approach for Risk Assessment in Selection and Recommendation of New Maize (Zea mays L.) Hybrids

محمدرضا شیری[۱*]، افشار استخر[۲]، حمید نجفی نژاد[۳]، هادی حسن زاده مقدم[۴]، علی شیرخانی[۵] و رضا عطایی[۶]

۱- دانشیار، بخش تحقیقات ذرت و گیاهان علوفه‌ای، 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 فارس، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، شیراز، 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 خراسان رضوی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مشهد، ایران.
۵- استادیار، بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی کرمانشاه، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرمانشاه، ایران.
۶- استادیار، بخش تحقیقات ذرت و گیاهان علوفه‌ای، موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۱۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۱۷

چکیده

شیری، م. ر.، استخر، ا.، نجفی نژاد، ح.، حسن زاده مقدم، ه.، شیرخانی، ع. و عطایی، ر. ۱۴۰۳. استفاده از رویکرد احتمالات بیزی برای ارزیابی ریسک در انتخاب و توصیه هیبرید های جدید ذرت (*Zea mays* L.). **نهال و بذر:** ۳۲۰-۲۹۵

عملکرد دانه یک رقم ذرت تابع اثر ژنوتیپ، محیط و برهمکنش ژنوتیپ × محیط است. در این پژوهش، برای بررسی برهمکنش ژنوتیپ × محیط، از روشی استفاده شد که در آن روش های احتمالات بیزی و روش‌های تحلیل سازگاری و پایداری عملکرد در یک چارچوب واحد تلفیق شده است. برای این منظور، داده های ۲۰ هیبرید امیدبخش ذرت به همراه دو شاهد تجاری (هیبریدهای H21 و H22) که در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با چهار تکرار در پنج ایستگاه تحقیقاتی (کرج، شیراز، کرمانشاه، کرمان و مشهد) در سال‌های ۱۴۰۲ و ۱۴۰۳ ارزیابی شدند، استفاده شد. در شدت انتخاب تعریف‌شده ۲۰ درصد، هیبریدهای H15، H10 و H17 بالاترین احتمال حاشیه‌ای عملکرد دانه برتر را داشتند، به طوری‌که H15 دارای احتمال بالایی برای برتری نسبت به هر هیبریدی، از جمله ارقام شاهد بود که نشان‌دهنده مناسب بودن آن برای توصیه در مناطق ارزیابی‌شده بود. همچنین هیبرید H10 با دومین رتبه برای عملکرد دانه، دارای احتمالی بیشتر از ۰/۹۰ برای برتری نسبت به اغلب هیبریدها به جز H15 بود. از طرف دیگر، هیبریدهای H20، H16 و H05 به ترتیب بیشترین احتمال حاشیه‌ای پایداری عملکرد دانه برتر را داشتند. با توجه به احتمال توام عملکرد دانه برتر و پایداری عملکرد، هیبریدهای H20، H16 و H15 برتری خود را نشان دادند. بنابراین، می توان نتیجه‌گیری کرد که رویکرد احتمالاتی از پتانسیل خوبی برای انتخاب و توصیه ارقام جدید ذرت برخوردار است.

واژه‌های کلیدی: ذرت، آزمایش‌های چند محیطی، احتمال، برهمکنش ژنوتیپ × محیط، پایداری، عملکرد دانه.

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

2024© Seed and Plant. This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0), which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source.

مقدمه

عملکرد دانه ذرت (*Zea mays* L.) با اصلاح ژنتیکی و بهبود روش‌های به زراعی به‌تدریج افزایش یافته است، اما این گیاه هنوز ظرفیت قابل‌توجهی برای پاسخگویی به روش های به‌نژادی و به‌زراعی برای افزایش عملکرد دانه دارد. فرآیند تولید و معرفی ارقام اصلاح‌شده کار ساده‌ای نیست، زیرا اهداف برنامه‌های به‌نژادی باید با نیازهای کشاورزان و مصرف‌کنندگان نهایی همسو شود. انتخاب ژنوتیپ‌های برتر بر اساس عملکرد و پایداری عملکرد در شرایط مختلف آب‌وهوایی انجام می‌گیرد.

انتخاب رقم اصلاح شده مناسب ذرت برای کشت، یکی از مهمترین تصمیماتی است که هر ساله کشاورزان باید اتخاذ کنند. تعادل بین ویژگی‌هایی مانند پتانسیل عملکرد دانه بالا، مقاومت به بیماری‌ها و آفات، سازگاری با شرایط محیطی و پایداری عملکرد دانه در شرایط اقلیم در حال تغییر، از جمله عواملی هستند که در انتخاب رقم مناسب باید مورد توجه قرار گیرند (Nardino *et al.*, 2016). به همین دلیل، برنامه‌ریزی دقیق از مرحله انتخاب منابع ژنتیکی تا توصیه رقم تجاری، امری ضروری است.

هنگامی که ژنوتیپ‌ها در محیط‌های مختلف کشت می شوند، معمولاً پاسخ‌های متفاوتی به شرایط محیط‌ها دارند که به عنوان برهمکنش ژنوتیپ × محیط شناخته می‌شود. اثر متقابل ژنوتیپ × محیط می‌تواند از نوع تغییر در مقدار باشد که در این حالت تغییری در رتبه عملکرد ژنوتیپ‌ها در محیط‌های مختلف مشاهده نمی‌شود و یا از نوع تغییر در ترتیب باشد که در این صورت رتبه ژنوتیپ‌ها در محیط‌های مختلف تغییر می‌کند. حالت دوم می‌تواند به عنوان چالشی برای به‌نژادی گیاهان محسوب شود، زیرا عدم پایداری عملکرد را نشان می‌دهد و توصیه ارقام را دشوارتر می‌کند. برای درک بهتر برهمکنش ژنوتیپ × محیط، باید تجزیه سازگاری و پایداری عملکرد انجام شود که به شناسایی ژنوتیپ‌هایی با پاسخ‌های قابل پیش‌بینی در محیط‌های مختلف کمک می‌کند (Crossa, 2012; Malosetti *et al.*, 2013).

روش‌های مختلفی برای تحلیل سازگاری و پایداری عملکرد ارائه شده است که اساساً با توجه به مفهوم سازگاری اتخاذ شده در آنها و اصول آماری مورد استفاده از یکدیگر متمایز می‌شوند (Crossa, 2012; Cruz *et al.*, 2012; Malosetti *et al.*, 2013).

اخیراً، روش‌هایی مبتنی بر مدل‌های مخلوط خطی به طور فزاینده‌ای مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Piepho *et al.*, 2008). همچنین، مدل‌های بیزی (Bayesian) نیز در مطالعات مختلف به کار گرفته شده‌اند (van Eeuwijk *et al.*, 2016). امروزه مدل‌های مخلوط و بیزی به دلیل پردازش بهتر داده‌ها از آزمایش‌های چند محیطی، به ویژه برای داده‌های نامتعادل، ناهمگنی واریانس‌های ژنتیکی و همبستگی بین محیط‌ها، روند فضایی مزرعه‌ای و توزیع احتمال پسین (Posterior probability distribution) ترجیح داده شده‌اند

(Crossa, 2012; Dias *et al*., 2022; Malosetti *et al*., 2013; Smith *et al*., 2005).

راهبردی که از احتمالات برای نتیجه‌گیری درباره‌ی واکنش ژنوتیپ‌ها در رابطه با سازگاری و پایداری عملکرد استفاده می‌کند، یک روش جدید است که توسط دیاس و همکاران (Dias *et al*., 2022) پیشنهاد شده است. در واقع، پیش‌فرض‌ها و احتمال‌ها تعریف می‌شوند، با استفاده از الگوریتم هامیلتونی مونت کارلو (Hamiltonian Monte Carlo = HMC) به توزیع احتمال پسین می‌رسد که به گروه های غیر هم‌گرا تعلق دارند و از داده‌ها و پیش‌فرض به‌دنبال مدلی است که بهترین شکل توزیع احتمال پسین را داشته باشد.

از این مرحله به بعد با شدت انتخاب تعریف شده، محاسباتی از احتمالات حاشیه‌ای عملکرد و پایداری، احتمالات جفتی عملکرد(احتمال برتری یک ژنوتیپ جدید نسبت به ژنوتیپ‌های موجود) و پایداری، احتمال شرطی عملکرد و احتمال توام عملکرد و پایداری عملکرد بر اساس شدت انتخاب تعریف‌شده انجام می‌شود. این روش همچنین امکان مقابله با چندین موضوع مهم مانند احتمال عملکرد ژنوتیپ‌ها در محیط‌های مختلف را فراهم می‌کند و خطر شکست یک ژنوتیپ خاص در محیط خاص را شناسایی می‌کند. بنابراین، قدرت استنتاجی که با روش احتمالاتی بیزی به دست می‌آید، بیشتر از آنچه در سایر مدل‌ها یافت می‌شود، است (Dias *et al*., 2022; Przystalski and Lenartowicz, 2023).

مالیکوسکی و همکاران (Malikouski *et al*., 2024) از مدل احتمالی بیزی برای انتخاب ژنوتیپ‌های برتر و پایدار لیمو ترش تاهیتی استفاده کردند. آن‌ها با استفاده از الگوریتم نمونه‌برداری همیلتونی مونت کارلو، احتمال عملکرد برتر (ارزش ژنوتیپی برتر) و احتمال پایداری عملکرد برتر برای هر ژنوتیپ را برآورد کردند و اعلام نمودندکه مدل احتمالی بیزی قابلیت کاربرد در انتخاب ژنوتیپ‌های برتر و با پایداری عملکرد را داشته و اطلاعات بیشتری درباره احتمالات مرتبط با عملکرد و پایداری عملکرد ژنوتیپ فراهم می‌کند. در بررسی آن‌ها، ژنوتیپ‌هایG15 ، G4، G18 و G11 به عنوان بهترین‌ها از نظرعملکرد شناخته شدند، در حالی کهG24 ، G7، G13 و G3 به عنوان ژنوتیپ ها دارای عملکرد پایدارتر شناسایی شدند. آنها بر اساس نتایج حاصله، به استفاده از مدل‌های احتمالی بیزی در مطالعات آتی تأکید کردند.

میراندا و همکاران (Miranda *et al*., 2024) نیز در مطالعه خود از روش پیشنهادی دیاس و همکاران (Dias *et al*., 2022) برای انتخاب و توصیه ارقام لوبیای معمولی استفاده کردند. در این پژوهش، با شدت انتخاب از پیش‌تعیین‌شده ۳۰ درصد، ژنوتیپ‌های G01، G14، G07، G11 و G02 به‌عنوان ژنوتیپ‌های دارای بالاترین احتمال حاشیه‌ای عملکرد برتر شناسایی شدند. از سوی دیگر، G06، G07، G04، G03 و G12 بیشترین

احتمال حاشیه‌ای پایداری عملکرد را نشان دادند. با تلفیق دو معیار عملکرد برتر و پایداری عملکرد، ژنوتیپ‌های G07، G14، G01، G11 و G04 به عنوان گزینه‌های برتر انتخاب شدند. نتایج این مطالعه تأکید می‌کند که روش احتمالات بیزی با درنظرگرفتن برهمکنش پیچیده ژنوتیپ × محیط و معیارهای پایداری عملکرد، ابزاری کارآمد و امیدبخش برای ارائه توصیه‌های مبتنی بر شواهد در برنامه به‌نژادی است.

علاوه بر برهمکنش ژنوتیپ × محیط برای صفت هدف، همبستگی منفی بین صفات هدف یکی دیگر از چالش مهم پیش‌روی در ارزیابی ژنوتیپ‌ها در یک برنامه به نژادی می باشد (Smith *et al*., 2005). عملکرد مهمترین صفت است و دیگر صفات تنها زمانی اهمیت دارند که با عملکرد بالا همراه باشند. در صورتی ارزش اقتصادی یک صفت بالاتر است که با عملکرد بیشتر همراه باشد. در واقع، هدف به‌نژادی ترکیب عملکرد بالا و قابل قبول با سطوح مطلوب دیگر صفات در ژنوتیپ می‌باشد (Smith *et al*., 2005; Bornhofen *et al*., 2017). برای استفاده از چنین ویژگی‌هایی، اولیوتو و همکاران (Olivoto *et al*., 2017)، شاخصی با نام شاخص پایداری چندصفتی (Multi-traits stability index = MTSI) را بر مبنای تجزیه عاملی معرفی کردند که در آن عملکرد دانه و همه صفات اندازه‌گیری شده‌ی دیگر و پایداری عمکرد هر کدام از آنها به‌طور همزمان ارزیابی می‌شوند.

در برنامه‌های به‌نژادی ذرت، عملکرد دانه بالا و پایدار همراه با زودرسی از اولویت‌های کلیدی محسوب می‌شود. اگرچه هیبریدهای دارای دوره رشد طولانی‌تر در شرایط زراعی یکسان، با بهره‌برداری بیشتر از واحدهای گرمایی، پتانسیل عملکرد دانه بالاتری دارند. به‌طور کلی بررسی‌ها نشان داده است به ازای هر درجه افزایش در واحد رسیدگی نسبی حدود ۶۳ کیلوگرم در هکتار بر عملکرد دانه افزوده می‌شود (Nardino *et al*., 2016). با این حال یکی از چالش‌های اصلی در مناطق مختلف، انتخاب ارقامی است که حداقل یک تا دو هفته پیش از شروع دوره سرما به مرحله رسیدن فیزیولوژیک و رطوبت قابل برداشت برسند (Nardino *et al*., 2016). بنابراین، در انتخاب هیبرید برتر ترکیبی از عوامل اقلیمی و گیاهی را باید در نظر گرفت تا حداکثر بهروری در تولید بدست آید (Balestre *et al*., 2009).

در مرحله رسیدن فیزیولوژیک دانه ذرت به حداکثر رشد و وزن ماده خشک خود می‌رسد، اما نمی‌توان در این مرحله دانه ذرت را برداشت کرد چرا که هزینه برداشت و هزینه خشک کردن بسیار بالا خواهد بود. بنابراین، به علت هزینه‌های خشک کنی، تقاضا برای ذرت‌هایی که سریع‌تر خشک می‌شوند، رو به افزایش است. سرعت خشک شدن بعد از رسیدن فیزیولوژیک تا حد زیادی به ژنوتیپ و رقم بستگی دارد. همچنین از نطقه نظر زارعی نیز زمان برداشت دانه در مقایسه زمان رسیدن دانه اهمیت بیشتری دارد

(Shiri *et al.*, 2024). بنابراین، برای افزایش عملکرد دانه در واحد سطح و افزایش بهره‌وری تولید ذرت، بایستی انتخاب همزمان برای عملکرد، تعداد روز تا رسیدن فیزیولوژیک و تعداد روز لازم تا رسیدن به رطوبت دانه قابل برداشت صورت گیرد.

با وجود پیشرفت در مطالعات مربوط به درک و استفاده از برهمکنش ژنوتیپ × محیط از طریق سازگاری و پایداری عملکرد، برنامه های به‌نژادی گیاهان هنوز نیازمند روش‌هایی کارآمدتر است که منجر به انتخاب توصیه‌ی قابل اعتمادتر ارقام شود (Smith and Cullis, 2018). با توجه به این موضوع، روش پیشنهادی توسط دیاس و همکاران (Dias *et al.*, 2022) یک راهکار مناسب قوی برای تسهیل فرآیند تصمیم‌گیری برای توصیه‌ی ارقام محسوب می‌شود.

بنابراین پژوهش حاضر با هدف استفاده از روش احتمالی بیزی در انتخاب و توصیه ارقام جدید ذرت و همچنین انتخاب همزمان برای عملکرد دانه بالا و پایدار، رطوبت دانه هنگام برداشت و تعداد روز تا رسیدن فیزیولوژیکی با بهره‌گیری از شاخص پایداری چند صفتی (MTSI) انجام شد.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش ۲۰ هیبرید امیدبخش ذرت به همراه دو شاهد تجاری (هیبریدهای H21 و H22) در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با چهار تکرار در پنج ایستگاه تحقیقاتی (کرج، شیراز، کرمانشاه، کرمان و مشهد) در سال‌های ۱۴۰۲ و ۱۴۰۳ ارزیابی شدند. هر کرت آزمایشی شامل چهار ردیف ۶/۱۲ متری با فاصله ۷۵ سانتیمتر از هم، ۳۴ سانتی‌متر بین کپه‌ها با دو بوته در هر کپه بود. تراکم کاشت حدود ۷۸۰۰۰ بوته در هکتار در نظر گرفته شد. برای اطمینان 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 بوته 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 (بر اساس نتایج آزمون خاک هر منطقه)، انجام شد.

تجزیه واریانس (ANOVA) ساده داده ها برای هر محیط انجام شد تا وجود تنوع ژنتیکی بین ژنوتیپ‌ها، دقت هر آزمایش و همگنی واریانس‌های باقی‌مانده ارزیابی شود. پس از آن، تجزیه واریانس مرکب با فرض ثابت بودن اثر ژنوتیپ و تصادفی بودن اثر محیط و تکرار انجام گردید. برای آزمون اثر ژنوتیپ، با توجه به معنی‌دار بودن واریانس برهمکنش، واریانس برهمکنش ژنوتیپ × محیط به عنوان واریانس خطا در نظر گرفته شد. در نهایت با تأیید برهمکنش ژنوتیپ × محیط، برآوردهای سازگاری و پایداری عملکرد با استفاده از روش دیاس و همکاران (Dias *et al.*, 2022) به دست

آمد. برای این منظور، از بسته آماری ProbBreed (Chaves *et al*., 2024) در زبان R (Core Team, 2023) R استفاده شد.

روش دیاس و همکاران (Dias *et al*., 2022) از روش‌های احتمالی مبتنی بر مدل‌های بیزی استفاده می‌کند. در ابتدا، دو مدل مختلف برای مجموعه داده ها پیشنهاد می‌شود که با توجه به اثرهای مورد نظر و طبیعت انحراف معیار، احتمال برای هر محیط متمایز می‌شوند. بنابراین، برای یک آزمایش با g ژنوتیپ، e محیط، و r تکرار می‌توان دو مدل را یکی با انحراف معیار همگن ($S_{[\sigma]}$) و دیگری با انحراف معیار ناهمگن ($S_{[\sigma]j}$) برازش کرد.

مدل‌های ذکر شده در جدول ۱، احتمال نرمال شرطی $y_{ijk} \sim N(E[y_{ijk}], \sigma)$ را ارائه می‌دهند و اولویت‌های زیر را برای پارامترها دارند: $\mu \sim N(0,S_{[\mu]})$، $g_i \sim N(0, S_{[g]})$، $e_j \sim N(0,S_{[e]})$، $r_{k(j)} \sim N(0,S_{[r]})$، $(ge)_{ij} \sim N(0,S_{[ge]})$ و $\sigma \sim$ Half *Cauchy*$(0,S_{[\sigma]})$ یا $\sigma_k \sim$ Half *Cauchy*$(0,S_{[\sigma]j})$ زمانی که مدل انحراف معیار ناهمگن را در نظر می‌گیرد.

جدول ۱- خلاصه‌ای از مدل‌های بیزی برازش داده شده به یک آزمایش چند محیطی با g ژنوتیپ، e محیط و r تکرار

Table 1. Summary of the Bayesian models fitted to a multi-environment trial with g genotypes, e environments, and r replications

مدل Model	Standard deviation	انحراف معیار	ارزش فنوتیپی مورد انتظار Expected phenotypic value
M1	Homogeneous ($S^{[\sigma]}$)	همگنی باقیمانده	$E_{[yijk]} = \mu + g_i + e_j + r_{k(j)} + (ge)_{ij}$
M2	Heterogeneous ($S_k^{[\sigma]}$)	نا همگنی باقیمانده	$E_{[yijk]} = \mu + g_i + e_j + r_{k(j)} + (ge)_{ij}$

توجه: $E[_{yijk}]$ ارزش فنوتیپی مورد انتظار ژنوتیپ iام ارزیابی شده در بلوک kام در محیط jام است، μ میانگین کل، g_i اثر نوتیپ، ej اثر محیط، $r_{k(j)}$ اثر بلوک و $(ge)_{ij}$ برهمکنش ژنوتیپ × محیط است.

Note: $E[_{yijk}]$ is the expected phenotypic value of the i^{th} genotype evaluated in the k^{th} block in the j^{th} environment, μ is the overall mean, g_i is the genotype effect, e_j is the environment effect, $r_{k(j)}$ is the block effect, and $(ge)_{ij}$ is the genotype × environment interaction effect.

توزیع‌های نرمال و HalfCauchy دارای معیار مرکزی صفر ولی با هایپر پارامترهای(Hyperparameters) مختلف از Sscale $_{[\theta]}$ می باشند. برای از بین بردن نگرش سلیقه‌ای (Subjectivity) در انتخاب هایپر پارامترها ($\phi = max(y) \times 10$)، هایپرپریورهای (Hyperpriors) زیر در نظر گرفته می‌شوند:

$S_{[\mu]} \sim$ *Half Cauchy*$(0, \phi)$,

$S_{[g]} \sim$ *Half Cauchy*$(0, \phi)$,

$S_{[e]} \sim$ *Half Cauchy*$(0, \phi)$,

$S_{[r]} \sim$ *Half Cauchy*$(0, \phi)$,

$S \sim$ *Half Cauchy*$(0, \phi)$.

توزیع احتمال پسین پارامترهای مدل در این مطالعه با استفاده از زبان برنامه‌نویسی احتمالی

استخراج گردید. برای این منظور، از رابط RStan (Carpenter *et al*., 2017) بهره گرفته شد. در این فرآیند، چهار زنجیره، هر کدام شامل ۲۰۰۰ نمونه، تنظیم گردید. به منظور بهبود کیفیت نتایج، ۵۰ درصد از نمونه‌های اولیه به عنوان نمونه‌های سوخته (Burn-in) حذف شدند که این امر منجر به مجموع ۴۰۰۰ نمونه برای تحلیل‌های بعدی و محاسبه احتمال‌های پسین استفاده شد.

ضریب کاهش مقیاس بالقوه ($\hat{R}$) برای ارزیابی کیفیت نمونه‌های زنجیره مارکوف مونت کارلو (Markov chain Monte Carlo = MCMC) استفاده شد. این آماره واریانس درون و بین زنجیره‌ها را اندازه‌گیری می‌کند و نشان‌دهنده درجه تعادل بین زنجیره‌ها برای پارامترهای مدل می‌باشد. در واقع، این آماره، نسبت میانگین واریانس نمونه‌ها در زنجیره‌ها به واریانس بین زنجیره‌ها است. بنابراین مقادیر نزدیک‌تر به یک نشان‌دهنده مشابه بودن این واریانس‌ها است که نشان‌دهنده هم‌گرایی خوب بین نمونه‌های زنجیره‌های مختلف در فضای پارامتر است، که مطلوب است (Fabreti and Höhna, 2022). برعکس، مقدار $\hat{R}$ بیشتر از یک نشان دهنده اختلاط ضعیف زنجیره‌ها است (Gelman *et al*., 2013).

برای ارزیابی میزان نزدیکی و شباهت داده‌های تولید شده توسط مدل به فرآیند تولید واقعی داده‌های مشاهده‌شده، نمونه‌هایی از مدل برازش شده با استفاده از نمونه‌گیری اجدادی از توزیع توام مشروط تولید و نتایج آن‌ها در مقابل داده‌های مشاهده‌شده ترسیم گردید. این نمودارها خود توضیح (Self-explanatory) هستند. در نهایت، معیار واتانابه–آکائیک ۲ (Watanabe–Akaike information criterion 2 - WAIC2) برای ارزیابی کیفیت برازش مدل‌ها استفاده شد که مدل با کمترین مقدار در نظر گرفته می‌شود.

بر اساس مدل انتخاب شده، محاسبه احتمالات سازگاری و تحلیل پایداری عملکرد با شدت انتخاب پیش تعریف شد (Ω) مانند احتمال عملکرد برتر $\Pr(g_i > g_j|y) = \frac{1}{S}\sum^{S} I(g_i^{(s)} > g_j^{(s)}|y)$ ، احتمال جفتی عملکرد برتر $\Pr(g_{ij} \in \Omega_j \mid y) = \frac{1}{S}\sum_{s=1}^{S} I(g_{ij}^{(s)} \in \Omega_j \mid y)$ ، احتمال عملکرد برتر درون محیط $Pr(g_j \in \Omega \mid y) = \frac{1}{S}\sum_{1}^{S} I(g_i^{(s)} \in \Omega \mid y)$ ، احتمال پایداری عملکرد برتر $\Pr[var(g_{ij}) \in \Omega \mid y] = \frac{1}{S}\sum_{S=1}^{S} I[var(ge_{ij}^{(s)} > \in \Omega|y)$ و احتمال توام عملکرد برتر و پایداری عملکرد برآورد شد.

$$\Pr[g_j \in \Omega, \mathrm{var}(ge_{ij}^{(s)}) \in \Omega] = \Pr(g_i \in \Omega \mid y) \times \Pr[var(ge_{ij}) \in \Omega \mid y]$$

انتخاب همزمان برای میانگین عملکرد دانه و پایداری عملکرد بر اساس چند صفت

انتخاب همزمان برای میانگین عملکرد دانه و پایداری عملکرد بر اساس چند صفت با استفاده از نمره به‌دست آمده از یک تجزیه عاملی اکتشافی انجام شد. برآورد شاخص پایداری چندصفتی (MTSI)، با استفاده از معادله زیر انجام شد (Olivoto *et al*., 2017; Olivoto *et al*., 2019).

$$MTSI_i = \left[\sum_{j=1}^{f} \left(F_{ij} - F_j\right)^2\right]^{0.5}$$

که در آن، MTSI شاخص پایداری چندصفتی برای ژنوتیپ iاُم، Fij، نمره‌jاُم ژنوتیپ‌iاُم وFj،نمره‌jاُم ژنوتیپ ایده‌آل است. ژنوتیپ با کمترین مقدارMTSI، به ژنوتیپ ایده آل نزدیکتر است و بنابراین میانگین عملکرد دانه و پایداری عملکرد (Mean performance and stability = MPS) بالایی را برای همه متغیرهای بررسی شده ارائه می‌دهد. دیفرانسیل یا تفاوت انتخاب برای میانگین عملکرد دانه و WAASB(شاخصWAASBY) برای هر صفت با شدت انتخاب ۲۰ درصد محاسبه شد (Olivoto *et al*., 2019). جنبه دیگری از تلفیق دو روشAMMI وBLUP، بهره‌گیری از ابزارهای گرافیکی تجزیه AMMI در شاخص‌های برآورد شده است، به‌طوری‌که برای کمک به تفسیر چشمی نمودارهایی جهت نشان دادن میانگین متغیر پاسخ در برابرWAASB ایجاد شدند. همچنین نموداری برای سنجش و گزینش ژنوتیپ‌ها براساس شاخصMTSI فراهم شد (Olivoto *et al*., 2017). این تجزیه آماری با استفاده از بسته تجزیه آزمایش‌های چند محیطی (Multi-environment trials analysis) (Olivoto *et al*., 2017) با نامmetan Ver. 1.9.0 در محیط نرم افزارR انجام شد.

نتایج و بحث

تجزیه واریانس ساده داده ها نشان داد که تفاوت هیبریدها از نظر عملکرد دانه در ۷ محیط از ۹ محیط مورد مطالعه معنی‌دار بود. عملکرد دانه از ۹/۲۴ تا ۱۴/۷۷تن در هکتار با میانگین ۱۱/۹۴ تن در هکتار متغیر بود (جدول ۲). درصد ضریب تغییرات (C.V.%)، به استثنای محیطE01 با ۲۳/۴ درصد، در بقیه مناطق در محدوده قابل قبول برای آزمایش‌های چندمحیطی ذرت (زیر ۲۰درصد) قرار داشتند (جدول ۲).

تجزیه واریانس مرکب داده ها نشان داد که اثر هیبریدها، محیط‌ها و برهمکنش ژنوتیپ × محیط بر عملکرد دانه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). بررسی برهمکنش ژنوتیپ × محیط نشان داد که وجود برهمکنش از نوع تغییر در ترتیب است، به‌طوری‌که بهترین هیبریدها در یک محیط ممکن است بهترین هیبرید در محیط دیگر نباشند. این موضوع ما را به این باور می‌رساند که انتخاب و توصیه ارقام باید به‌طور هدفمند و مبتنی بر سازگاری خصوصی، نه سازگاری عمومی، و متناسب با شرایط محیط هدف باشد. در چنین شرایطی، به‌کارگیری روش‌های آماری پیشرفته مانند رویکرد بیزی می‌تواند دقت و قابلیت اعتماد انتخاب و توصیه ارقام را افزایش دهد.

جدول ۲- تجزیه واریانس ساده برای عملکرد دانه هیبریدهای ذرت در نه محیط

Table 2. Simple analyses of variance for grain yield of maize hybrids in nine environments

محیط ها Environments	Year and location	سال و مکان	میانگین مربعات تکرار MS replication	میانگین مربعات ژنوتیپ MS genotype	میانگین مربعات خطا MS error	میانگین عملکرد (تن در هکتار) Mean yield (ton ha^{-1})	درصد ضریب تغییرات C.V. (%)
E01	Karaj, 2023	کرج ۱۴۰۲	15.96	4.82	4.68	9.24	23.41
E02	Shiraz, 2023	شیراز ۱۴۰۲	24.76	8.09**	1.82	12.05	11.21
E03	Mashhad, 2023	مشهد ۱۴۰۲	4.76	6.46**	2.98	10.11	17.06
E04	Kerman, 2023	کرمان ۱۴۰۲	2.35	8.45**	1.60	10.02	12.62
E05	Kermanshah, 2023	کرمانشاه ۱۴۰۲	1.61	15.37**	1.44	12.83	9.35
E06	Karaj, 2024	کرج ۱۴۰۳	15.30	4.71	2.82	11.13	15.08
E07	Shiraz, 2024	شیراز ۱۴۰۳	1.37	16.33**	1.09	14.99	6.95
E08	Mashhad, 2024	مشهد ۱۴۰۳	6.48	6.38**	1.61	9.81	12.92
E09	Kermanshah, 2024	کرمانشاه ۱۴۰۳	29.24	10.66**	3.08	10.10	17.39

**: Significant at the1% probability level. **: معنی دار در سطح احتمال یک درصد.

MS: mean squares.

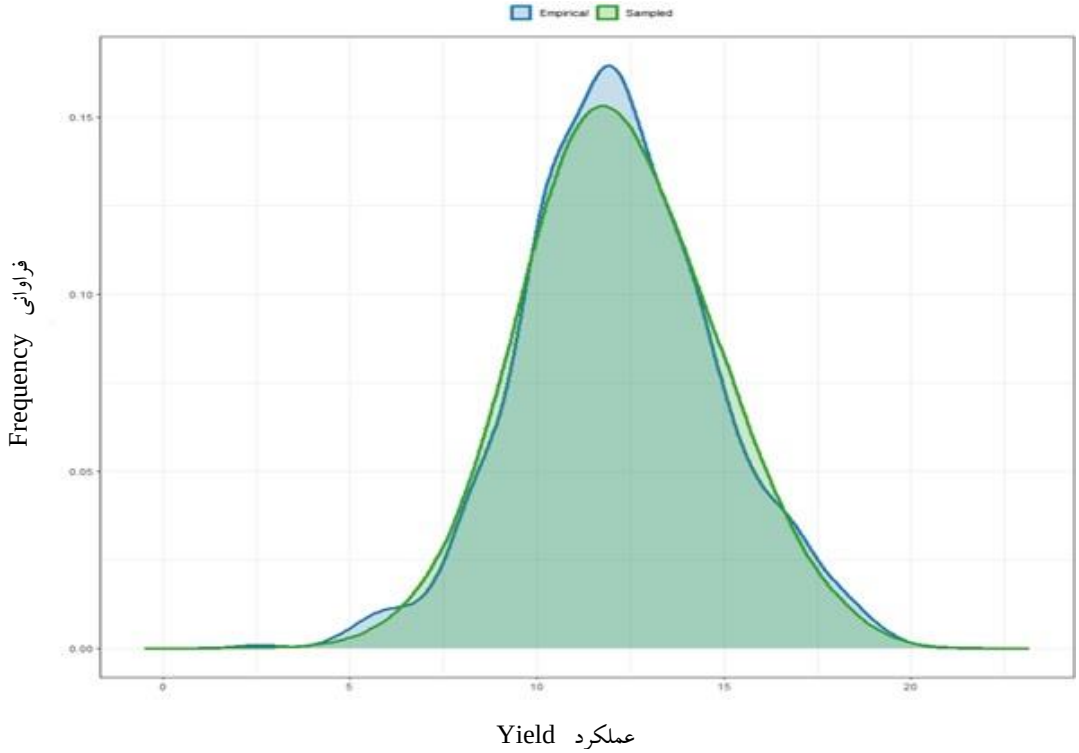
جدول ۳- تجزیه واریانس مرکب برای عملکرد دانه هیبریدهای ذرت

Table 3. Combined analysis of variance for grain yield of maize hybrids

S.O.V.	منبع تغییرات	درجه آزادی d.f.	مجموع مربعات Sum of squares	میانگین مربعات Mean squares
Environment (E)	محیط	8	2393.99	299.25**
Replication/E	تکرار/محیط	27	305.52	11.32**
Genotype (G)	ژنوتیپ	21	847.09	40.34**
G × E	ژنوتیپ × محیط	168	859.71	5.12**
Residual	باقی‌مانده	567	1330.31	2.35
C. V. (%)	درصد ضریب تغییرات	13.75		

**: Significant at the 1% probability level. **: معنی دار در سطح احتمال یک درصد.

از بین دو مدل بیزی پیشنهادی (جدول ۲) برای داده‌های چند محیطی (مدل همگنی باقیمانده و ناهمگنی باقیمانده)، مدل همگنی باقیمانده (M1) بهترین تناسب را با داده‌ها داشت، زیرا مقادیر WAIC2 آن ۳۳۰۰/۵۱ بود که در مقایسه با مدل ناهمگنی باقیمانده (M2) با WAIC2برابر ۳۳۲۹/۶۸، کمتر بود. علاوه بر این، در این مدل بیشترین تطابق بین داده‌های تجربی و داده‌های تولید شده با مدل M1 مشاهده گردید (شکل ۱). هرچند هر دو مدل M1 و M2دارای آماره $\hat{R}$ نزدیک به ۱ به ترتیب برابر با ۱/۰۰۰۱ و ۰/۹۹۹۹ داشتند. مالیکوسکی و همکاران (Malikouski *et al*., 2024) و میراندا و همکاران (Miranda *et al*., 2024) نیز از شاخص WAIC2 برای انتخاب مدل استفاده کردند.

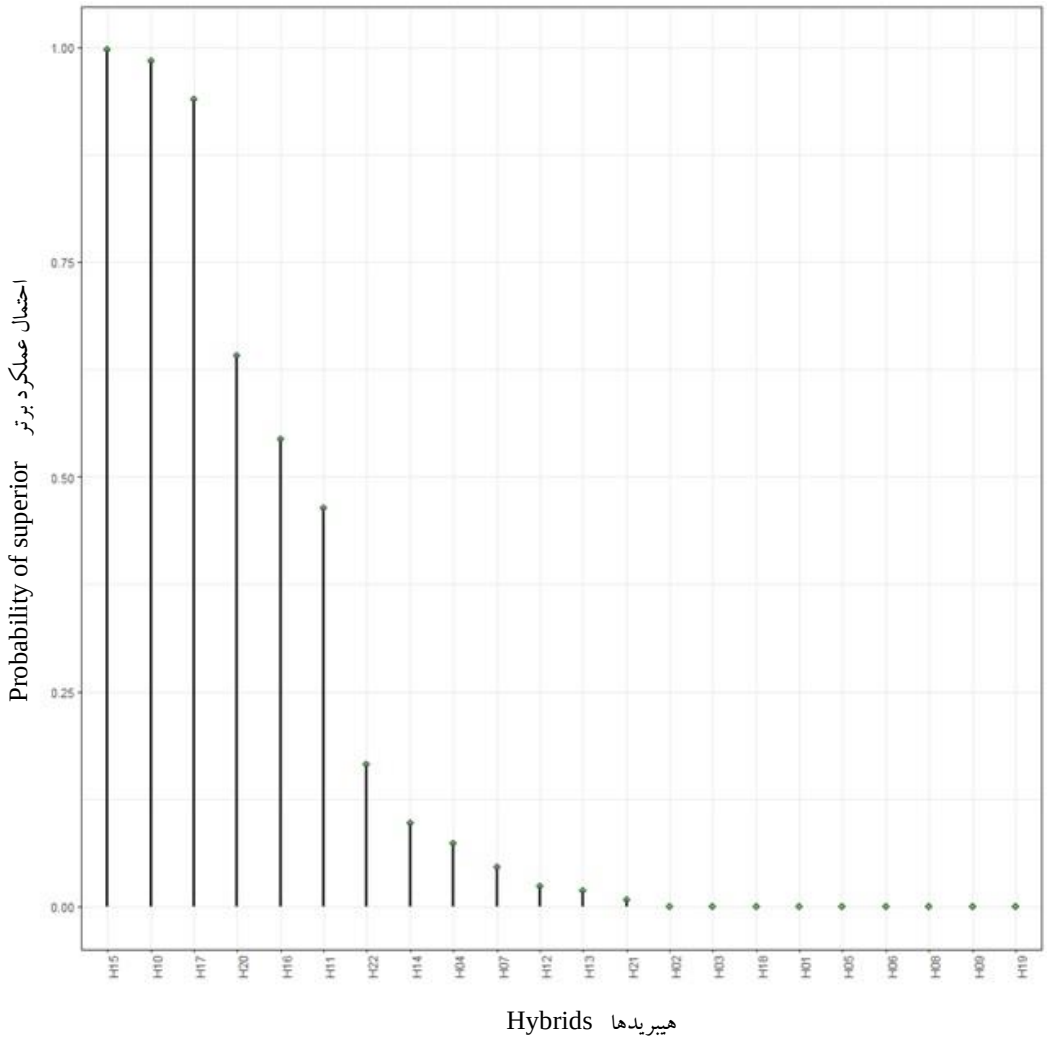


شکل ۱- توزیع بیزی داده‌های تجربی و نمونه‌برداری شده برای عملکرد دانه (تن در هکتار) ۲۲ هیبرید ذرت در نه محیط

Fig. 1. Bayesian distribution of empirical and sampled data for grain yield (ton ha^{-1}) for 22 maize hybrids in nine environments

بر اساس مدل انتخاب‌شده احتمال های لازم برای انتخاب و توصیه ارقام با شدت انتخاب ۲۰ درصد، برآورد شدند. احتمال حاشیه‌ای عملکرد دانه برتر در شکل ۲ به ترتیب کاهشی نمایش داده شده است. بر اساس این شکل، هیبریدH15 با داشتن بالاترین احتمال حاشیه‌ای عملکرد دانه برتر،

نسبت به سایر هیبریدها برتر بود. همچنین هیبریدهای H10 و H17 نیز در میان هیبریدهایی قرار داشتند که به ترتیب بالاترین احتمال تعلق به زیرمجموعه هیبریدهای برتر را با احتمال ۹۸ و ۹۴ درصد، بعد از هیبرید H15 را دارا بودند. مالیکوسکی و همکاران (Malikouski *et al.*, 2024) و میراندا و همکاران (Miranda *et al.*, 2024) نیز از مدل‌های بیزی برای انتخاب و توصیه ارقام استفاده کردند. نتایج مطالعات آن‌ها نشان داد که این مدل‌ها قادرند برآوردهای دقیق‌تری از مقادیر ژنوتیپی و ویژگی‌های عملکردی ارائه دهند، که در نهایت منجر به بهبود راهبردهای انتخاب و توصیه ارقام جدید در برنامه‌های به‌نژادی شد.



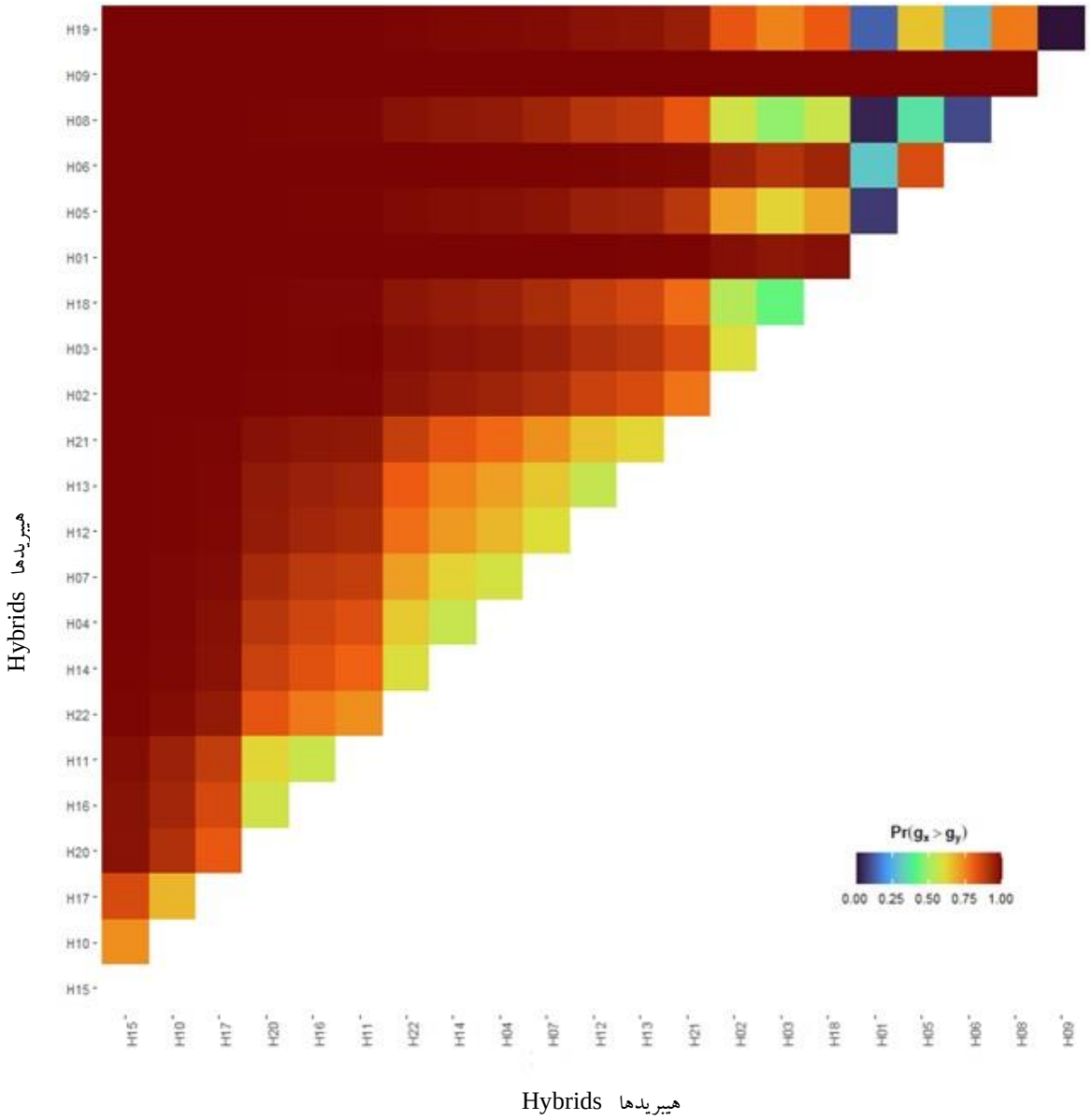
شکل ۲- احتمال حاشیه‌ای عملکرد برتر برای عملکرد دانه (تن در هکتار) ۲۲ هیبرید (H01–H22) ذرت در نه محیط

Fig. 2. Marginal probability of superior performance for grain yield (ton ha^{-1}) of 22 maize hybrids (H01–H22) across nine environments

احتمال جفتی عملکرد برتر (شکل ۳) در مراحل نهایی یک برنامه به‌نژادی بسیار مهم است، زیرا پیش از انتخاب و توصیه رقم قرار دارد و امکان شناسایی یک یا چند هیبرید با عملکرد برتر نسبت به رقم تجاری را فراهم می‌کند. با احتمال‌های جفتی عملکرد برتر، می توان احتمال عملکرد هیبریدها را به‌صورت جفتی ارزیابی نمود که این امکان مقایسه جفتی بین تمام ترکیب‌های ممکن از هیبریدها را فراهم می‌کند. به‌عنوان مثال، هیبرید H19 دارای احتمال بسیار پایینی (۰/۱۲) برای برتری نسبت به هیبرید H03 را داشت. در مقابل، هیبرید H15 دارای احتمال برتری عملکردی بالا نسبت به تمام هیبریدها از جمله ارقام شاهد بود که نشانگر پتانسیل بالای آن برای توصیه در مناطق مورد مطالعه است. در پژوهش حاضر، بعد از هیبرید H15 که بالاترین احتمال برتری را داشت، هیبرید H10، با احتمال برتری بیش از ۰/۹۰ نسبت به اکثر هیبریدها بجزH15 و H17 (به ترتیب با احتمال ۰/۲۹و ۰/۶۷)، به عنوان دومین ژنوتیپ برتر شناسایی شد (شکل ۳). در این میان، هیبرید H15 با احتمال برتری ۰/۷۱ نسبت به هیبرید H10 از عملکرد متمایزی برخوردار بود.

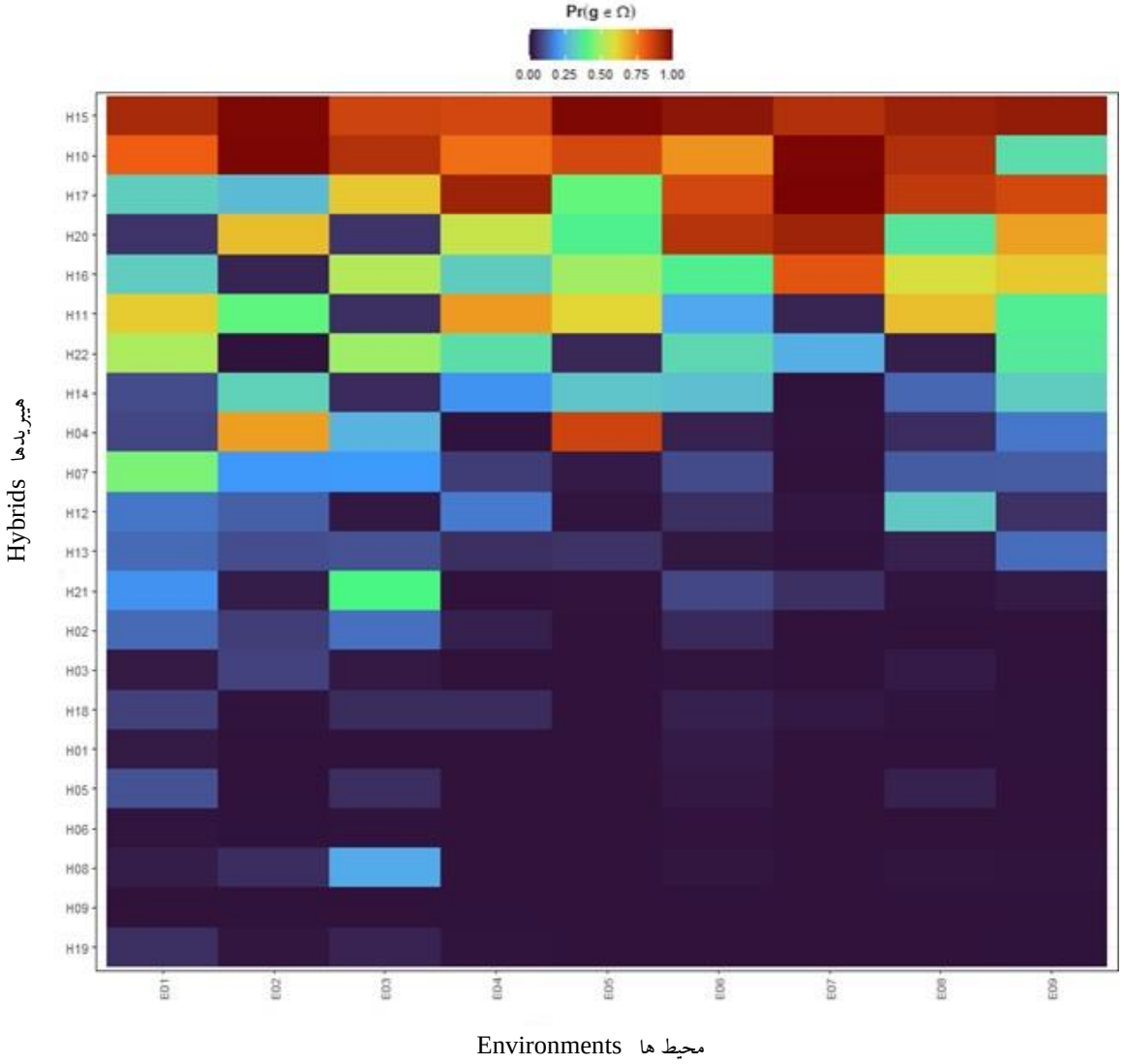
احتمال جفتی مشابه مدل پلکت–لوس(Plackett–Luce) است که به‌طور مشترک توسط پلکت (Plackett, 1975) و لوس (Luce, 1959) معرفی شده است. این مدل برای طبقه‌بندی موارد در یک ترتیب خاص استفاده می‌شود و بر اساس اصل انتخاب مستقل لوس (Luce, 1959) استوار است. بر اساس این اصل، احتمال ترجیح یک گزینه بر گزینه دیگر مستقل از مجموعه گزینه‌های موجود می‌باشد. به عبارت دیگر، انتخاب یک گزینه تحت تأثیر گزینه‌های دیگر نیست و این اصل به درک بهتر انتخاب‌ها کمک می‌کند (Guiver and Snelson, 2009).

با بررسی همزمان سازگاری و پایداری عملکرد ژنوتیپ‌ها در یک شکل، می‌توان احتمال عملکرد برتر هر هیبرید را در محیط‌های مختلف ارزیابی کرد (شکل ۴). به عبارت دیگر، این روش امکان تحلیل الگوی پاسخ هیبریدها به شرایط محیطی را فراهم می‌سازد که هم نشان‌دهنده احتمال موفقیت یا شکست آنها (Plasticity) در محیط‌ها است و هم پایداری عملکرد آنها را بر اساس میزان تغییرپذیری در محیط‌های مختلف مشخص می‌کند. عملکرد حداکثری هیبریدH15 (شکل ۴) در هفت محیط از نه محیط، برتری آن را به عنوان یک هیبرید امیدبخش تأیید کرد. همچنین هیبریدهای H10 و H17 نیز درکنار هیبریدH15 برای توصیه برای مناطق هدف برخوردار بودند.



شـکل ۳- احتمال جفتی عملکرد برتر برای عملکرد دانه (تن در هکتار) در میان ۲۲ هیبرید (H01–H22) ذرت در نه محیط

Fig. 3. Pairwise probability of superior performance for grain yield (ton ha^{-1}) of 22 maize hybrids (H01–H22) evaluated in nine environments



شـــکل ۴- احتمال عملکرد برتر برای عملکرد دانه (تن در هکتار) ۲۲ هیبرید (H01–H22) ذرت در نه محیط (E01–E09)

Fig. 4. Probability of superior performance for grain yield (ton ha^{-1}) of 22 maize hybrids (H01–H22) in nine environments (E01–E09)

ارزیابی عملکرد دانه هیبریدها در محیط ها نشان داد، هیبرید H15 که در اکثر محیط‌ها از سازگاری بالایی برخوردار بود، ولی ممکن است در محیط‌های E03 و E07 دچار افت عملکرد دانه شود که در این شرایط می‌توان به ترتیب از هیبریدهای H10 و H17 برای محیط E03 و هیبرید H10 برای محیط E07 به عنوان هیبریدهای جایگزین استفاده کرد. مالیکوسکی و همکاران (Malikouski *et al.*, 2024) در توصیه ارقام لیمو ترش و میراندا و همکاران

(Miranda *et al*., 2024) در برنامه به‌نژادی لوبیا نیز با به‌کارگیری این رویکرد، کارایی مدل‌های احتمالات بیزی را در بهبود راهبردهای انتخاب ارقام تأیید کردند.

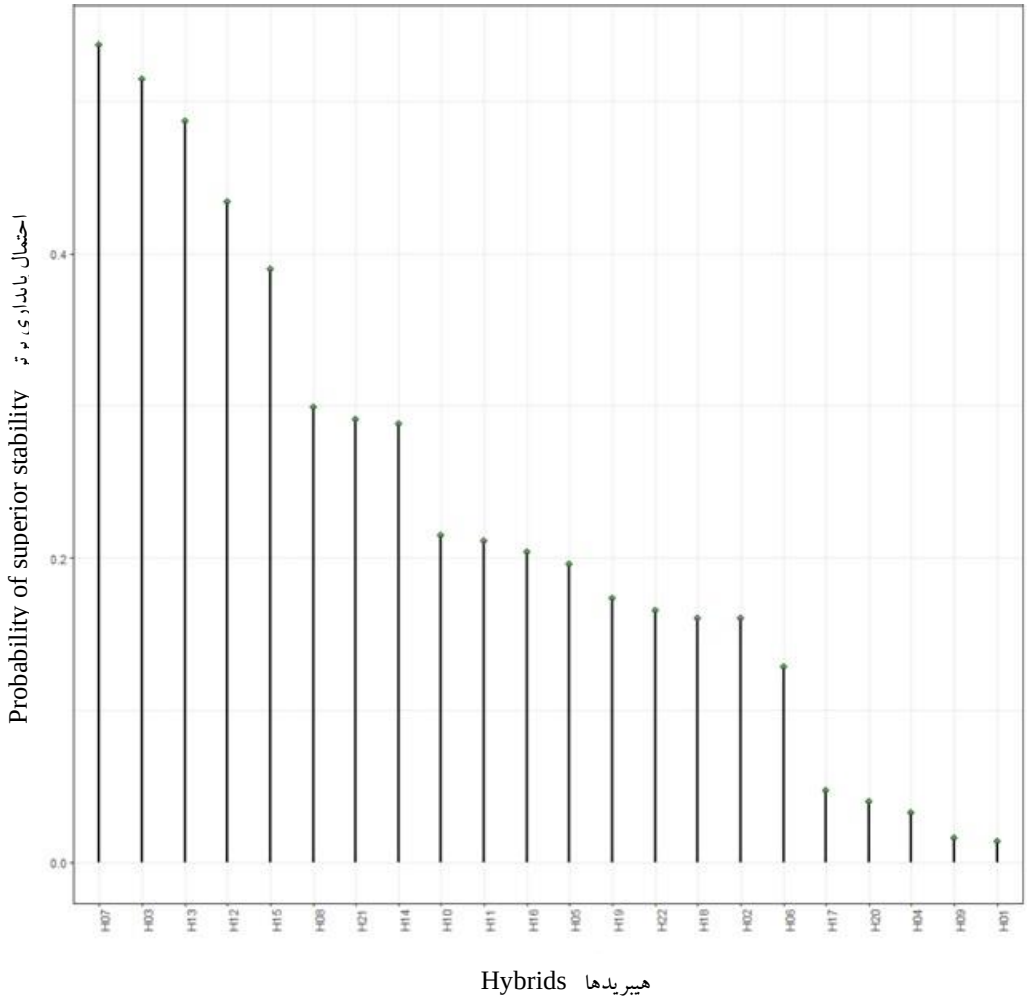
برای تکمیل استنباط درباره پایداری عملکرد، محاسبه احتمال پایداری عملکرد برتر برای ژنوتیپ‌ها ضروری است (شکل ۵). از این طریق می‌توان یک ژنوتیپ با عملکرد کم و پایدار و همچنین بالعکس، یک ژنوتیپ عملکرد بالا و ناپایدار را شناسایی کرد. اندازه‌گیری تغییرات مورد استفاده برای محاسبات پایداری عملکرد در روش بیزی مشابه روش پیشنهادی شوکلا (Shukla, 1972) است، اما ممکن است از روش دیگری نیز استفاده شود.

هیبریدهای ذرت بر اساس پایداری عملکرد طبقه‌بندی شدند که الگوی متفاوتی از احتمال حاشیه‌ای پایداری را نشان می‌دهد (شکل ۵). در این رتبه‌بندی، هیبرید H07 بالاترین احتمال حاشیه‌ای پایداری عملکرد را به خود اختصاص داد و به همراه هیبریدهای H03، H13، H12 و H15 پنج هیبرید برتر از نظر این شاخص با بالاترین احتمال تعلق به زیرمجموعه هیبریدهای برتر از نظر احتمال حاشیه‌ای پایداری عملکرد بودند. نکته قابل توجه، حضور هیبرید H15 در شدت انتخاب ۲۰ درصد، در میان هیبریدهای با احتمال حاشیه‌ای عملکرد برتر (H15، H10، H17، H20 و H16) و احتمال حاشیه‌ای پایداری عملکرد برتر(H07، H03، H13، H12 و H15) بود که این موضوع با توجه به پیچیدگی برهمکنش ژنوتیپ × محیط در این مطالعه قابل انتظار بود.

عملکرد بالا و پایدار ویژگی‌های مطلوبی هستند که یک به‌نژادگر در یک رقم ایده‌آل جستجو می‌کند. این ویژگی‌ها نقش مهمی در کاهش ریسک شکست توصیه و معرفی ارقام جدید ایفا می‌کنند. کنترل این ریسک که از دغدغه‌های اصلی کشاورزان محسوب می‌شود، به به‌نژادگران سپرده شده است. در سال ۱۹۹۰، اسکریج (Eskridge, 1990)، شاخص ایمنی اول را برای کمی‌سازی خطر شکست ارقام معرفی نمود که از نظر مفهومی مشابه روش احتمال توأم عملکرد برتر و پایدار ارائه شده توسط دیاس و همکاران (Dias *et al*., 2022) می‌باشد، چرا که هر دو روش بر پایه میانگین عملکرد و تغییرپذیری پایداری استوار هستند. در مطالعه‌ی دیاس و همکاران (Dias *et al*., 2022) راهبرد پیشنهادی خود را با روش اسکریج (Eskridge, 1990) با استفاده از داده‌های چند محیطی ذرت مقایسه کردند و به این نتیجه رسیدند که نتایج این دو روش‌تطابق خوبی با یکدیگر دارند، اما مزایای رویکرد آن‌ها در ارائه اطلاعات احتمالی بوده و گزینه‌های کاربردی بیشتر برای انتخاب و توصیه ارقام ارائه می‌کند.

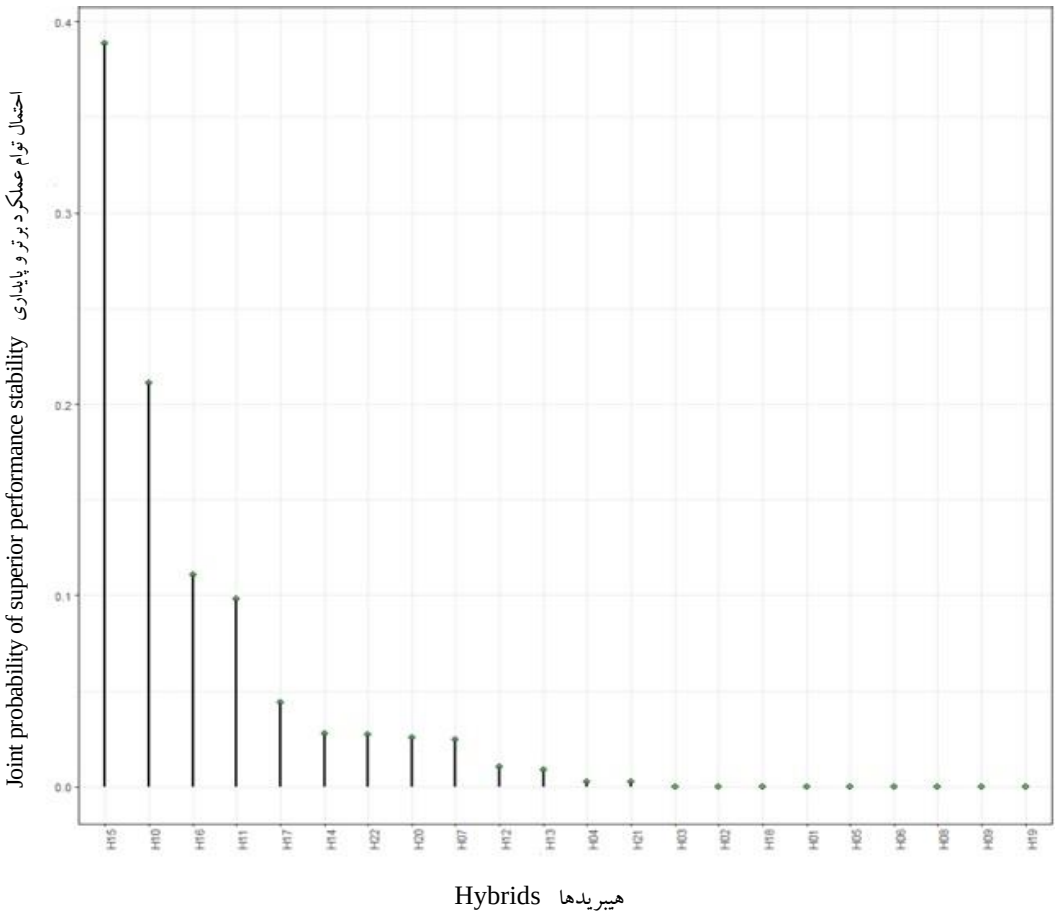
بنابراین، احتمالات پیشنهادی دیاس و همکاران (Dias *et al*., 2022) امکان شناسایی هیبریدهای دارای پایداری عملکرد با سازگاری عمومی یا سازگاری خصوصی برای

برخی محیط‌های مورد نظر را فراهم کرده و منجر به توصیه‌ای قابل اعتمادتر از ارقام خواهد شد. در این راستا، هیبریدهای H15، H10 و H16 که دارای بالاترین احتمال توأم عملکرد و پایداری بودند، به عنوان سه گزینه برتر برای توصیه و معرفی با این شاخص شناخته شدند (شکل ۶). در تحلیل بیزی، ارزیابی همگرایی بر اساس نمونه‌های حاصل از توزیع پسین برای تحلیل برهمکنش ژنوتیپ × محیط ضروری است. این فرآیند به ارزیابی دقیق سازگاری، عملکرد دانه و پایداری آن در محیط‌های مختلف کمک می‌کند و در نتیجه، پتانسیل موفقیت یا شکست ژنوتیپ‌ها را در شرایط غیرقابل پیش‌بینی آشکار می‌سازد.



شکل ۵- احتمال پایداری برتر برای عملکرد دانه (تن در هکتار) ۲۲ هیبرید (H01–H22) ذرت در نه محیط

Fig. 5. Probability of superior stability for grain yield (ton ha^{-1}) of 22 maize hybrids (H01–H22) in nine environments



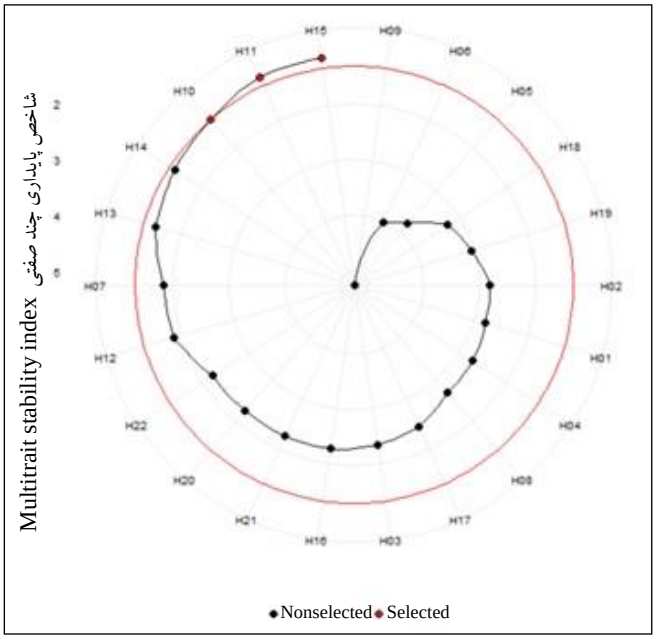
شکل ۶- احتمال توام عملکرد برتر و پایداری برای عملکرد دانه (تن در هکتار) ۲۲ هیبرید (H01–H22) ذرت در نه محیط

Fig. 6. Joint probability of superior performance and stability for grain yield (ton ha^{-1}) of 22 maize hybrids (H01–H22) in nine environments

هیبریدهای ذرت مورد ارزیابی در این پژوهش با استفاده از شاخص پایداری چندصفتی (MTSI) برای عملکرد دانه، تعداد روز تا رسیدن فیزیولوژیک و تعداد روز لازم تا رسیدن به رطوبت دانه قابل برداشت نشان رتبه بندی شدند (شکل ۷). با این روش، هیبریدهای H15 ، H11 و H10 به‌ترتیب با MTSI برابر با ۱/۱۸، ۱/۳۵ و ۱/۵۹ به عنوان هیبریدهای برتر در شدت گزینش ۲۰ درصدی انتخاب شدند که نقطه برش با دایره قرمز مشخص (MSTI = 1.59) شده است (شکل ۷).

پایه محاسباتی این شاخص مبتنی بر تجزیه عاملی اکتشافی (Exploratory factor analysis = EFA) است که با تحلیل ساختار همبستگی بین صفات (van Eeuwijk *et al.*, 2016; Olivoto *et al.*, 2017) از طریق تعیین تعداد عوامل مؤثر، بررسی روابط بین متغیرها و محاسبه نمرات نهایی عوامل، مشکل چندهم‌خطی

(Multicollinearity) در تحلیل‌های آماری چندمتغیره را مرتفع می‌سازد (Ullman, 2006). شیری و همکاران (Shiri *et al*., 2024) در انتخاب هیبریدهای برتر ذرت، با به‌کارگیری این روش، اثربخشی آن را در بهبود راهبردهای گزینش ارقام در شرایط چندصفتی نشان دادند. شاخص MTSI، یک فرآیند انتخاب منحصر به فرد و آسان است که امکان انتخاب هم زمان براساس عملکرد دانه و پایداری آن را برای بسیاری از به نژادگران و متخصصان زراعت در شرایط چندصفتی فراهم می‌کند (Olivoto *et al*., 2019).



شکل ۷- رتبه‌بندی هیبریدها و هیبریدهای انتخاب شده بر پایه شاخص پایداری چندصفتی (MTSI)

Fig. 7. Ranking of hybrids and selected hybrids based on the multi-trait stability index (MTSI)

به طورکلی با در نظر در گرفتن نتایج پارامترهای مختلف، احتمال حاشیه‌ای عملکرد برتر (H15، H10، H17، H20 وH16)، احتمال حاشیه‌ای پایداری برتر(H07، H03، H13، H12 وH15) و احتمال توام عملکرد برتر و پایداری عملکرد (H15، H10 وH16) و شاخص پایداری چندصفتی (H15،H11 وH10)، می توان نتیجه گیری شود که هیبریدهای H15 و H10 برای معرفی و توصیه به عنوان هیبریدهای جدید به تولید کنندگان ذرت مناسب می باشند. همچنین مدل‌های بیزی احتمالی می‌توانند به توصیه‌های دقیق‌تری در مورد هیبرید های ذرت که در چند محیط ارزیابی می شوند، کمک کنند، زیرا این مدل‌ها امکان تفسیر مستقیم و دقیقی از عملکرد و

پایداری آن برای هیبرید های امیدبخش را فراهم می‌کنند.

سپاسگزاری

این مقاله بر اساس داده‌های حاصل از پروژه تحقیقاتی شماره ۰-۰۳-۰۳-۰۸۳-۰۱۰۷۲۴ مصوب موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر تهیه و نگارش شده است. نگارندگان بدینوسیله از پشتیبانی مالی و مساعدت های موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر و مراکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان های همکار سپاسگزاری می‌کنند.

عدم تعارض منافع

نگارندگان اعلام می دارند که هیچ گونه تعارض منافعی با یکدیگر و سایر اشخاص حقیقی/ حقوقی ندارند.

References

Annicchiarico, P. 1992. Cultivar adaptation and recommendation from alfalfa trials in Northern Italy. *Journal of Genetics and Plant Breeding*, *46*, pp.269–278.

Balestre, M., Von Pinho, R.G., Souza, J.C. and Oliveira, R.L. 2009. Genotypic stability and adaptability in tropical maize based on AMMI and GGE biplot analysis. *Genetic Molecular Research*, *8*(4), pp.1311–1322. DOI: 10.4238/vol8-4gmr658

Bornhofen, E., Benin, G., Storck, L., Woyann, L.G., Duarte, T., Stoco, M.G. and Marchioro, S.V. 2017. Statistical methods to study adaptability and stability of wheat genotypes. *Bragantia*, *76*(1), pp.1–10. DOI: 10.1590/1678-4499.557

Carpenter, B., Gelman, A., Hoffman, M.D., Lee, D., Goodrich, B., Betancourt, M., Brubaker, M., Guo, J., Li, P. and Riddell, A. 2017. Stan: A probabilistic programming language. *Journal of Statistical Software*, *76*(1), pp.1-33. DOI: 10.18637/jss.v076.i01

Chaves, S.F.S., Krause, M.D., Dias, L.A.S., Garcia, A.A.F. and Dias, K.O.G. 2024. ProbBreed: A novel tool for calculating the risk of cultivar recommendation in multi-environment trials. *G3 Genes|Genomes|Genetics*, *14*(3), jkae013. DOI: 10.1093/g3journal/jkae013

Cotes, J.M., Crossa, J., Sanches, A. and Cornelius, P.L. 2006. A Bayesian approach for assessing the stability of genotypes. *Crop Science*, *46*(6), pp.2654–2665. DOI: 10.2135/cropsci2006.04.0227

Crossa, J. 2012. From genotype x environment interaction to gene by environment interaction. *Current Genomics*, *13*(3), pp.225–244. DOI: 10.2174/138920212800543066

Crossa, J., Perez-Elizalde, S., Jarquin, 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*(4), pp.1458–1469. DOI: 10.2135/cropsci2010.06.0343

Cruz, C.D., Torres, R.A. A. and Vencovsky, R. 1989. An alternative approach to the stability analysis proposed by Silva and Barreto. *Brazilian Journal of Genetics*, *12*(3), pp.567–580.

Dias, K.O.G., Gezan, S.A., Guimarães, C.T., Parentoni, S.N., Guimarães, P.E.O., Carneiro, N.P., Portugal, A.F., Bastos, E.A., Cardoso, M.J., Anoni, C.O., Magalhães, J.V., Souza, J.C., Guimarães, L.J.M. and Pastina, M.M. 2018. Estimating genotype × environment interaction for and genetic correlations among drought tolerance traits in maize via factor analytic multiplicative mixed models. *Crop Science*, *58*(1), pp.72–83. DOI: 10.2135/cropsci2016.07.0566

Dias, K.O.G., Santos, J.P.R., Krause, M.D., Piepho, H.P., Guimarães, L.J.M., Pastina, M.M. and Garcia, A.A.F. 2022. Leveraging probability concepts for cultivar recommendation in multi-environment trials. *Theoretical and Applied Genetics*, *135*(4), pp.1385–1399. DOI: 10.1007/s00122-022-04041-y

Eberhart, S.A. and Russell, W.A. 1966. Stability parameters for comparing varieties. *Crop Science*, *6*(1), pp.36–40. DOI: 10.2135/cropsci1966.0011183X000600010011x

Eskridge, K.M. 1990. Selection of stable cultivars using a safety first rule. *Crop Science*, *30*(2), pp.369–374. DOI: 10.2135/cropsci1990.0011183X003000020025x

Fabreti, L.G. and Höhna, S. 2022. Convergence assessment for Bayesian phylogenetic analysis using MCMC simulation. *Methods in Ecology and Evolution*, 13(1), pp. 77–90. DOI: 10.1111/2041-210X.13727

Finlay, K.W., and Wilkinson, G.N. 1963. The analysis of adaptation in a plant-breeding programme. *Australian Journal of Agricultural Research*, *14*(6), pp.742–754. DOI: 10.1071/AR9630742

Gauch, H.G. and Zobel, R.W. 1988. Predictive and postdictive success of statistical analyses of yield trials. *Theoretical and Applied Genetics*, 76(1), pp.1–10. DOI: 10.1007/BF00288824

Gelman, A., Carlin, J.B., Stern, H.S., Dunson, D.B., Vehtari, A. and Rubin, D.B. 2013. Bayesian data analysis. 3rd edition. Chapman and Hall/CRC. 675 pp. DOI: 10.1201/b16018

Guiver, J. and Snelson, E. 2009. Bayesian inference for Plackett–Luce ranking models. pp.377–384. In Proceedings of the 26th annual international conference on machine

learning, Montreal, Quebec, Canada.

Josse, J., van Eeuwijk, F.A., 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*(2), pp.240–257. DOI: 10.1007/s13253-014-0168-z

Lin, C.S. and Binns, M.R. 1988. A method of analyzing cultivar x location x year experiments: A new stability parameter. *Theoretical and Applied Genetics*, *76*(3), pp.425–430. DOI: 10.1007/BF00265344

Luce, R.D. 1959. Individual choice behavior: a theoretical analysis. John Wiley. 153 pp. DOI: 10.1037/14396-000

Malikouski, R.G., Ferreira, F.M., Chaves, S.F.S., Couto, E.G.O., Dias, K.O.G. and Bhering, L.L. 2024. Recommendation of Tahiti acid lime cultivars through Bayesian probability models. *PLOS ONE, 19*(3), e0299290. DOI: 10.1371/journal.pone.0299290

Malosetti, M., Ribaut, J.-M. and van Eeuwijk, F.A. 2013. The statistical analysis of multi-environment data: modeling genotype by environment interaction and its genetic basis. *Frontiers in Physiology*, *4*, pp.1–17. DOI: 10.3389/fphys.2013.00044

Miranda, I.R., Dias, K.O.G., Júnior, J.D.P., Carneiro, P.C.S., Carneiro, J.E.S., Carneiro, V.Q., Souza, E.A., Melo, L.C., Pereira, H.S., Vieira, R.F. and Martins, F.A.D. 2024. Use of Bayesian probabilistic model approach in common bean varietal recommendation. *Crop Science*, *64*(6), pp.3163-3173. DOI: 10.1002/csc2.21340

Nardino, M., Baretta, D., Carvalho, I.R., Olivoto, T., Follmann, D.N., Vincius, J.S., Ferrari, M., de Pelegrin, A.J., Konflanz, V.A. and de Souza, V.Q. 2016. Restricted maximum likelihood/best linear unbiased prediction (REML/BLUP) for analyzing the agronomic performance of corn. A*frican Journal of Agricultural Research*, *11*(48), pp.4864-4872. DOI: 10.5897/AJAR2016.11691

Olivoto, T., Lúcio, A.D.C., da Silva, J.A.G., Marchioro, V.S., de 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*(6), pp.2949-2960. DOI: 10.2134/agronj2019.03.0220

Olivoto, T., Nardino, M., Carvalho, I.R., Follmann, D.N., Ferrari, M., Szareski, V.J., de Pelegrin, A.J. and de Souza, V.Q. 2017. REML/BLUP and sequential path analysis in estimating genotypic values and interrelationships among simple maize grain yield-related traits. *Genetics and Molecular Research, 16*(1), pp.1-19. DOI: 10.4238/gmr16019525

Piepho, H.P., Möhring, J., Melchinger, A.E. and Büchse, A. 2008. BLUP for phenotypic selection in plant breeding and variety testing. *Euphytica*, *161*(1), pp.209–228. **DOI:** 10.1007/s10681-007-9449-8

Piepho, H.-P. 1997. Analyzing genotype-environment data by mixed models with multiplicative terms. *Biometrics*, *53*(2), pp.761–766. DOI: 10.2307/2533976

Plackett, R.L. 1975. The analysis of permutations. *Journal of the Royal Statistical Society Series C: Applied Statistics*, *24*(2), pp.193–202.

Plaisted, R.L. and Peterson, L.C. 1959. A technique for evaluating the ability of selections to yield consistently in different locations and seasons. *American Potato Journal*, 36, pp.381-385. DOI: 10.1007/BF02852735

Przystalski, M. and Lenartowicz, T. 2023. Organic system vs. conventional-A Bayesian analysis of Polish potato post-registration trials. *The Journal of Agricultural Science*, *161*(1), pp.97–108. DOI: 10.1017/S0021859623000084

R Core Team. 2023. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. pp. 3921.

Shiri, M., Moharramnejad, S., Estakhr, A., Fareghi, Sh., Najafinezhad, H., Khavari Khorasani, S., Afarinesh, A., Anvari, K. and Eshraghi-Nejad, M. 2024. Determining the stability of new maize hybrids with WAASBY and MTSI indices. *Journal of Crop Breeding*, *16*(2), pp.14-28 (in Persian). DOI: 10.61186/jcb.16.2.14

Shukla, G.K. 1972. Some statistical aspects of partitioning genotype environmental components of variability. *Heredity*, *29*(2), pp.237–245. DOI: 10.1038/hdy.1972.87

Smith, A.B. and Cullis, B.R. 2018. Plant breeding selection tools built on factor analytic mixed models for multi-environment trial data. *Euphytica*, *214*(8), pp.1-19. DOI: 10.1007/s10681-018-2220-5

Smith, A.B., Cullis, B.R. and Thompson, R. 2001. Analyzing variety by environment data using multiplicative mixed models and adjustments for spatial field trend. *Biometrics*, *57*(4), pp.1138–1147. DOI: 10.1111/j.0006-341X.2001.01138.x

Smith, A.B., Cullis, B.R. and Thompson, R. 2005. The analysis of crop cultivar breeding and evaluation trials: An overview of current mixed model approaches. *The Journal of Agricultural Science*, *143*(6), pp.449–462. DOI: 10.1017/S0021859605005587

Toler, J.E. 1990. Patterns of genotypic performance over environmental arrays. Ph. D. Dissertation. Clemson University. Clemson University. 154 pp.

Ullman, J.B. 2006. Structural equation modeling: Reviewing the basics and moving forward. *Journal*

of Personality Assessment, *87*, pp.35-50. DOI: 10.1207/s15327752jpa8701_03

van Eeuwijk, F.A., Bustos-Korts, D. and Malosetti, M. 2016. What should students in plant breeding know about the statistical aspects of genotype × environment interactions? *Crop Science*, *56*(5), pp.2119–2140. DOI: 10.2135/cropsci2015.06.0375

Verma, M.M., Chahal, G.S. and Murty, B.R. 1978. Limitations of conventional regression analysis a proposed modification. *Theoretical and Applied Genetics*, *53*(2), pp.89–91. DOI: 10.1007/BF00817837

Wricke, G. 1965. Zur berechnung der ökovalenz bei sommerweizen und hafer. *Zeitschrift fur Pflanzenzuchtung*, *52*(2), pp.127–138.

Yan, W., Hunt, L.A., Sheng, Q. and Szlavnics, Z. 2000. Cultivar evaluation and mega-environment investigation based on the GGE biplot. *Crop Science*, *40*(3), pp.597–605. DOI: 10.2135/cropsci2000.403597x

RESEARCH ARTICLE

DOI: 10.22092/spj.2025.368724.1410

Employing Bayesian Probabilistic Approach for Risk Assessment in Selection and Recommendation of New Maize *(Zea mays* L.) Hybrids

M. R. Shiri[1*], A. Estakhr[2], H. Najafinezhad[3], H. Hassanzadeh Moghaddam[4], A. Shirkhani[5] and R. Ataei[6]

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, Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Shiraz, Iran.
3. Associate Professor, Crop and Horticultural Science Research Department, Kerman Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Kerman, Iran.
4. Assistant Professor, Crop and Horticultural Science Research Department, Khorasan-e-Razavi Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Mashhad, Iran.
5. Assistant Professor, Crop and Horticultural Science Research Department, Kermanshah Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Kermanshah, Iran.
6. Assistant Professor, Maize and Forage Crops Research Department, Seed and Plant Improvement Institute, Agricultural Research Education and Extension Organization, Karaj, Iran.

ABSTRACT

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).

Multi-environments trails are crucial elements in development and recommendation of new crop cultivars. Crop yield is influenced by genetic, environmental, and genotype × environment interaction (GEI). This study employed a Bayesian probabilistic method to study GEI by integrating adaptation and grain yield stability assessments of 22 maize hybrids within a unified framework. Using grain yield data from 22 maize hybrids tested across five research field stations (Karaj, Shiraz, Kermanshah, Kerman and Mashhad) in two years, genotypes were ranked by success probability under a 20% selection intensity. H15, H10, and H17 hybrids showed the highest marginal probability of superior performance. H15 outperformed all tested hybrids, while H10 exceeded most ($p > 0.90$) except H15. For grain yield stability, H20, H16, and H05 hybrids ranked highest. Combining performance and grain yield stability probabilities, H20, H16, and H15 hybrids were top candidates. The Bayesian approach effectively identified genotypes with high grain yielding and yield stability, providing a robust tool for maize breeding programs. By quantifying probabilistic outcomes, this method enhances decision-making, ensuring precise selection and recommendation of maize hybrids tailored for target environments.

Keywords: Maize, multi-environment trial, probability, genotype × environment interaction, grain yield stability.

Introduction

Genotype × environment interaction (GEI) explains how genotypes perform across different environments, which can be either simple (no change in genotype rankings) or complicated (rankings change inversely). Complicated GEI challenges plant breeders, as it indicates instability in performance of genotype, making cultivar recommendations difficult. To address this challenge, yield stability and adaptability analyses are conducted to identify adapted genotypes with high yield and yield stability across environments. Various methods have been proposed, differing in their statistical approaches and adaptability concepts. A novel approach introduced by Dias *et al*. (2022) introduces a Bayesian probabilistic method, which integrates prior information and ranks genotypes by superiority using selection intensity. This method addresses critical issues, such as the probability of a new genotype outperforming existing ones and the risk of failure in specific environments. By combining information from multi-environment trails, the Bayesian approach provides greater inferential power, enabling more accurate predictions and decision-making in plant breeding programs. This advancement helps breeders to identify adapted genotypes with high yield and yield stability reducing the risks associated with GEI and improving cultivar development. This study aimed to employ Bayesian probabilistic approach for risk assessment in selection and recommendation of new maize *(Zea mays* L.) hybrids for target environments.

Materials and Methods

In this study 20 promising maize hybrids and two commercial hybrids (H21 and H22) were evaluated in five research filed stations (Karaj, Shiraz, Kermanshah, Kerman and Mashhad) over two years (2023 and 2024). The experimental design was randomized complete block design with four replications. Each plot consisted four rows of 6.12 meters length with 75 centimeter row spacing, and plant density of 78,000 ha^{-1}. Three seeds were planted in each hill, thinned to two plants at the 4-5 leaf stage. Crop management practices including; irrigation, weed control, and fertilization applications, were followed as recommended for each location. Initial statistical analysis involved simple analysis of variance for each environment to assess genotypic variation, experimental precision, and residual variance homogeneity. Then, combined analysis of variance was performed, which revealed significant genotype × environment interaction (GEI). Adaptability and grain yield stability were estimated using the method introduced by Dias *et al*. (2022) implemented through the ProbBreed package in R.

Results and Discussion

Combined analysis of variance revealed that the effects of hybrids, environments, and genotype × environment interaction (GEI) were significant ($p < 0.01$). This highlights the complication of GEI, and indicated that top-performing hybrids in one environment may not be excel in others, necessitating environment-specific cultivar recommendations over general adaptability. Bayesian probabilistic models were justified for more reliable

recommendations.

Hybrid H15 as the most promising, had the highest marginal probability of superior performance. This hybrid outperformed other hybrids, including checks, in seven out of nine environments. Hybrids H10 and H17 also ranked high with 98% and 94% probabilities, respectively, of belonging to the top-performing subset. While hybrid H15 had 71% probability of outperforming over Hybrid H10, as it underperformed in environments E03 and E07, where hybrid H10 and H17 were selected and recommended. At the 20% selection intensity, hybrid H15 was the only hybrid common to both the top-performing (H15, H10, H17, H20, H16) and high grain yield stability (H07, H03, H13, H12, H15) groups. High-performing with high grain yield stability hybrids like H15, H10, and H17 reduce risks of new hybrids selection and recommendation for target environments. These findings are in accordance with results reported by Malikouski *et al.* (2024) and Miranda *et al*. (2024), validating the reliability of Bayesian approaches in crop breeding strategies. Using the multi-traits stability index (MTSI), hybrids H15, H11, and H10 were the top-ranked hybrids.

In conclusion, hybrids H15 and H10 combining superior performance, grain yield stability, and adaptability, were identified as the most promising hybrids for recommendation to target environments. Bayesian probabilistic approaches provided precise, reliable tool for hybrids recommendations by directly interpreting genotype performance and grain yield stability across test environments, enhancing decision-making in maize breeding programsu.

References

Dias, K.O.G., Santos, J.P.R., Krause, M.D., Piepho, H.-P., Guimarães, L.J.M., Pastina, M.M. and Garcia, A.A.F. 2022. Leveraging probability concepts for cultivar recommendation in multi-environment trials. *Theoretical and Applied Genetics*, *135*(4), pp.1385–1399. DOI: 10.1007/s00122-022-04041-y

Malikouski, R.G., Ferreira, F.M., Chaves, S.F.S., Couto, E.G.O., Dias, K.O.G., and Bhering, L.L. 2024. Recommendation of Tahiti acid lime cultivars through Bayesian probability models. *PLOS ONE, 19*(3), e0299290. DOI: 10.1371/journal.pone.0299290

Miranda, I.R., Dias, K.O.G., Júnior, J.D.P., Carneiro, P.C.S., Carneiro, J.E.S., Carneiro, V.Q., Souza, E.A., Melo, L.C., Pereira, H.S., Vieira, R.F. and Martins, F.A.D. 2024. Use of Bayesian probabilistic model approach in common bean varietal recommendation. *Crop Science, 64*(6), pp.3163-3173. DOI: 10.1002/csc2.21340

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

Received: 05 November 2024
Accepted: 07 December 2024

2023© Seed and Plant. This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0), which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source.