

Original Article

**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**

Mohammadreza Shiri,<sup>1\*</sup> Afshar Estakhr,<sup>2</sup> Sharareh Fareghi,<sup>3</sup> Hamid Najafinezhad,<sup>4</sup> Saeed Khavari Khorasani,<sup>5</sup> Morteza Eshraghi-Nejad,<sup>6</sup> Aziz Afarinesh,<sup>7</sup> Kamran Anvari,<sup>8</sup> Laleh Ebrahimi<sup>9</sup>

<sup>1</sup> Department of Maize and Forage Crops Research, Seed and Plant Improvement Institute, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Karj, Iran

<sup>2</sup> Crop and Horticultural Science Research Department, Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Shiraz, Iran

<sup>3</sup> Crop and Horticultural Science Research Department, Kermanshah Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Kermanshah, Iran

<sup>4</sup> Crop and Horticultural Science Research Department, Kerman Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Kerman, Iran

<sup>5</sup> Crop and Horticultural Science Research Department, Khorasan Razavi Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Mashhad, Iran

<sup>6</sup> Crop and Horticultural Science Research Department, South Kerman Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Jiroft, Iran

<sup>7</sup> Crop and Horticultural Science Research Department, Safiabad Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Dezful, Iran

<sup>8</sup> Crop and Horticultural Science Research Department, West Azerbaijan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Urmia, Iran

<sup>9</sup> Iranian Research Institute of Plant Protection, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran

**Introduction:** Multi-environment trials are essential for evaluating the performance of genotypes across diverse environments and identifying stable genotypes with high performance, either as varieties or parental lines in breeding programs. These trials are often conducted across multiple locations and years, where the combination of year and location is considered as the environment. Most previous models, such as the widely used AMMI (Additive Main Effects and Multiplicative Interaction) and GGE biplot (Genotype + Genotype-by-Environment Interaction) models, calculate genotype-by-environment interaction (GEI) based on the combination of location and year, without separating GEI into genotype-by-location interaction (GLI), genotype-by-year interaction (GYI), and genotype  $\times$  location  $\times$  year interaction (GLYI). Since year-induced variations are often random, less repeatable, and do not show consistent trends, using these previous models for interpreting interaction effects face significant challenges. As a result, genotype rankings differ depending on the years of evaluation, making it difficult to select superior genotypes for

---

\* Corresponding Author Email Address: sdezhsetan@uma.ac.ir

target locations. Therefore, this study was conducted to compare the efficiency of the HO-AMMI, AMMI, and GGE biplot methods for selecting stable and high-yielding maize hybrids in multi-environment trial.

**Material and Methods:** To evaluate the usefulness of separating GLI from GEI, an experiment was conducted with 14 promising maize hybrids along with two commercial control hybrids (Hybrids 15, and 16) in a randomized complete block design with four replications across eight locations (Karaj, Shiraz, Kermanshah, Kerman, Mashhad, Isfahan, Miandoab, and Dezful) over two years (2020 and 2021). Each plot consisted of four 6.5 m rows spaced 0.75 m apart, 0.36 m between hills with two plants in each. To eliminate the marginal effect, only the two middle rows were harvested. Grain yield was then measured at the moisture content of 14%. The AMMI and GGE biplot models were used to estimate GEI, while the HO-AMMI (Higher-order-AMMI) model was used to estimate GLI.

**Results and Discussion:** Based on the average grain yield across 16 environments, hybrids No. 10 and 14 had the highest grain yields, with 12.42 and 12.36 tons per hectare, respectively. According to the results, the HO-AMMI model successfully distinguished the high-yielding hybrids (Hybrids No. 10 and 14) with less yield variation than other hybrids. In contrast, the AMMI and GGE biplot model could not separate the other hybrids from the high-yielding group. It appears that the GGE biplot method more accurately identifies specific adaptability. In general, Hybrid No. 14 has less yield variability than other high-yielding hybrids, and hence may be recommended to farmers.

**Conclusion:** In the HO-AMMI model, selecting genotypes for the desired location is easier than with the AMMI model. The GLI biplot in the HO-AMMI model operates based solely on genotype and location, without the confounding effect of year. Conversely, the year effect in the AMMI model may overshadow the location effect, making genotype selection more difficult. The HO-AMMI model provides an accurate ranking of genotypes for a specific location without the confounding effects of GYI and GLYI, enabling breeders to identify high-yielding genotypes for target locations. Therefore, the HO-AMMI model can be effectively used in multi-environment trials to select stable, high-yielding genotypes.

**Keywords:** Compatibility, genotype-by-environment interaction, genotype-by-location interaction

## ارزیابی کارآیی مدل‌های تجزیه پایداری AMMI، GGE بای پلات و HO-AMMI

### برای انتخاب هیبریدهای پرمحصول و پایدار ذرت در آزمایش‌های چندمحیطی

محمد رضا شیری<sup>۱</sup>، افشار استخر<sup>۲</sup>، شراره فارغی<sup>۳</sup>، حمیدنجفی نژاد<sup>۴</sup>، سعیدخاوری خراسانی<sup>۵</sup>، مرتضی اشراقی نژاد<sup>۶</sup>، عزیز آفرینش<sup>۷</sup>، کامران انوری<sup>۸</sup>، لاله ابراهیمی<sup>۹</sup>

- <sup>۱</sup> بخش تحقیقات اصلاح ذرت و گیاهان علوفه‌ای، موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران
- <sup>۲</sup> بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی فارس، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، شیراز، ایران
- <sup>۳</sup> بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی کرمانشاه، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرمانشاه، ایران
- <sup>۴</sup> بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی کرمان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرمان، ایران
- <sup>۵</sup> بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مشهد، ایران
- <sup>۶</sup> بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی جنوب کرمان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، جیرفت، ایران
- <sup>۷</sup> بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی دزفول، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، دزفول، ایران
- <sup>۸</sup> بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی آذربایجان غربی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ارومیه، ایران
- <sup>۹</sup> بخش تحقیقات کنترل بیولوژیک، موسسه تحقیقات گیاهپزشکی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

**سابقه و هدف:** آزمایش‌های چند محیطی برای ارزیابی عملکرد ژنوتیپ‌ها در محیط‌های مختلف و شناسایی ژنوتیپ‌های پایدار با عملکرد بالا به عنوان وارثه یا والدین در برنامه‌های اصلاحی ضروری هستند. در این آزمایش‌ها، ارزیابی‌ها اغلب در چندین مکان و سال انجام می‌شود و ترکیب سال و مکان به عنوان محیط در نظر گرفته می‌شود. اکثر مدل‌های قبلی، مانند مدل‌های پرکاربرد AMMI و GGE بای پلات، اثر متقابل ژنوتیپ × محیط (ترکیب مکان و سال، GEI) را محاسبه می‌کنند و GEI را به اثر متقابل ژنوتیپ × مکان (GLI)، اثر متقابل ژنوتیپ × سال (GYI) و برهمکنش ژنوتیپ × مکان × سال (GLYI) تفکیک نمی‌کنند. از آنجایی

<sup>†</sup> Corresponding Author Email Address: sdezhsetan@uma.ac.ir

که تغییرات ناشی از سال اغلب تصادفی و کمتر قابل تکرار بوده و همچنین روند ثابتی را نشان نمی‌دهد، استفاده از مدل‌های قبلی برای تفسیر اثرات متقابل با چالش‌های مهمی مواجه است؛ در نتیجه، رتبه‌بندی ژنوتیپ‌ها بر اساس سال‌های ارزیابی متفاوت بوده و انتخاب ژنوتیپ‌های برتر برای مکان‌های هدف را دشوار می‌کند. بنابراین این مطالعه با هدف مقایسه سودمندی و کارایی روش‌های AMMI، HO-AMMI و GGE بای‌پلات برای انتخاب هیبریدهای پایدار و پرمحصول ذرت در آزمایش‌های چند محیطی اجرا گردید.

**مواد و روش‌ها:** برای بررسی سودمندی تفکیک GLI از GEI، آزمایشی با ۱۴ هیبرید ذرت امیدبخش به همراه دو هیبرید تجاری شاهد (هیبریدهای شماره ۱۵ و ۱۶) در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با چهار تکرار در هشت مکان (کرج، شیراز، کرمانشاه، ارزوئیه کرمان، مشهد، اصفهان، میانک‌آب و دزفول) طی سال‌های زراعی ۱۳۹۹ و ۱۴۰۰ به اجرا در آمد. هر کرت آزمایشی شامل چهار خط کاشت به فاصله ۷۵ سانتی‌متر و به طول ۶/۵ متر بود. برای حذف اثر حاشیه ای، فقط دو ردیف میانی برداشت شد. سپس عملکرد دانه با رطوبت ۱۴ درصد تصحیح گردید. برای تخمین GEI از مدل‌های AMMI و GGE بای‌پلات و برای تخمین GLI از مدل HO-AMMI استفاده شد.

**نتایج و بحث:** بر اساس میانگین عملکرد دانه هیبریدها در ۱۶ محیط، هیبریدهای شماره ۱۰ و ۱۴ به ترتیب با 12/42 و 12/36 تن در هکتار بیشترین عملکرد دانه را داشتند. با توجه به نتایج، مدل HO-AMMI توانست هیبریدهای پرمحصول (هیبریدهای شماره ۱۰ و ۱۴) با تغییرات عملکرد دانه کمتر از سایر هیبریدها را به خوبی تشخیص دهد، در حالی که مدل AMMI و GGE بای‌پلات نتوانست هیبریدهای پرمحصول را از هیبریدهای دیگر تفکیک نماید. به نظر می‌رسد که روش GGE بای‌پلات انتخاب برای سازگاری خصوصی را با دقت بیشتری انجام می‌دهد. به طور کلی هیبرید شماره ۱۴ نسبت به سایر هیبریدهای پرمحصول تغییرات عملکرد کمتری داشت و از این رو می‌توان به عنوان رقم جدید به کشاورزان معرفی نمود.

**نتیجه‌گیری:** در مدل HO-AMMI، انتخاب ژنوتیپ برای مکان موردنظر آسان‌تر از مدل AMMI است. در واقع، بای‌پلات GLI در مدل HO-AMMI تنها بر اساس ژنوتیپ و مکان و بدون اثر مخدوش‌کننده سال عمل می‌کند. از سوی دیگر، اثر سال در مدل AMMI ممکن است اثر مکان را بپوشاند؛ بنابراین انتخاب ژنوتیپ را دشوارتر می‌کند. مدل HO-AMMI رتبه‌بندی دقیقی از ژنوتیپ‌ها را برای یک مکان بدون اثرات مخدوش‌کننده GYI و GLYI ارائه می‌کند و به اصلاح‌کنندگان این امکان را می‌دهد تا به طور خاص، ژنوتیپ‌های پرمحصول را برای مکان‌های هدف شناسایی کنند. از این رو، مدل HO-AMMI می‌تواند اثرات

مخدوش‌کننده GYI و GLYI بر GLI را برای شناسایی دقیق ژنوتیپ برای مکان هدف حذف کند. بنابراین، مدل HO-AMMI را می‌توان در آزمایش‌های چندمحیطی برای انتخاب ژنوتیپ‌های پایدار با عملکرد بالا استفاده کرد.

**واژه‌های کلیدی:** سازگاری، اثر متقابل ژنوتیپ × محیط، اثر متقابل ژنوتیپ × مکان

## مقدمه

آزمایش‌های چند محیطی برای ارزیابی عملکرد ژنوتیپ‌ها در محیط‌های مختلف و شناسایی ژنوتیپ‌های پایدار با عملکرد بالا به عنوان وارپته یا والدین در برنامه‌های اصلاحی ضروری هستند (Lee *et al.*, 2023). بر اساس نظر Yan and Kang (2003)، میانگین عملکرد در محیط‌های مختلف برای انتخاب ژنوتیپ‌ها تنها زمانی که برهمکنش ژنوتیپ در محیط معنی‌دار نباشد، می‌تواند معیار مناسبی برای ارزیابی باشد. با این حال، در آزمایش‌های چند محیطی، وقوع برهمکنش ژنوتیپ در محیط اجتناب‌ناپذیر می‌باشد. بنابراین پیش‌بینی رفتار ژنوتیپ‌ها در مکان‌ها و سال‌های مختلف قبل از ارائه توصیه‌های رقم، موضوع مهمی برای اصلاح‌کنندگان گیاهی است (Angelini *et al.*, 2019). برای افزایش تولید گیاهان زراعی، یکی از عوامل مهم، بهبود دانش فعلی در مورد مواد ژنتیکی مورد استفاده است. این بهبود نه تنها شامل افزایش عملکرد از طریق ژنوتیپ‌های اصلاح‌شده می‌شود، بلکه به برهمکنش ژنوتیپ‌ها با شرایط محیطی مختلف نیز وابسته است (Hudson *et al.*, 2022).

برهمکنش ژنوتیپ در محیط به عنوان تفاوت در پاسخ ژنوتیپ‌ها به محیط‌های مختلف تعریف می‌شود (Bradshaw, 1965). این برهمکنش وابستگی بین فنوتیپ و ژنوتیپ را کاهش می‌دهد و در نتیجه پیشرفت برنامه‌های اصلاحی به شدت کاهش می‌یابد (Romagosa *et al.*, 2009). برهمکنش ژنوتیپ در محیط را می‌توان به دو گروه از برهمکنش متقاطع یا کیفی و برهمکنش غیرمتقاطع یا کمی تقسیم کرد. برهمکنش کیفی یا متقاطع زمانی ایجاد می‌شود که رتبه‌بندی ژنوتیپ‌ها در محیط‌ها به طور قابل توجهی متفاوت باشد. در مقابل، برهمکنش غیر متقاطع زمانی اتفاق می‌افتد که عملکرد ژنوتیپ‌ها در محیط‌ها متفاوت بوده با این حال رتبه ژنوتیپ‌ها در محیط‌ها ثابت می‌ماند. در برنامه‌های به‌نژادی، سازگاری خصوصی یا عمومی ممکن است به عنوان استراتژی اصلی انتخاب بسته به اهداف به‌نژادگران در نظر گرفته شود (Singh *et al.*, 1999). برهمکنش متقاطع برای اصلاح‌کنندگان مهم‌تر است، زیرا که اگر برهمکنش متقاطع اثر اصلی برهمکنش

ژنوتیپ در محیط باشد، عملکرد ژنوتیپ‌ها کمتر قابل پیش‌بینی بوده و نمی‌توان آن را صرفاً بر اساس میانگین ژنوتیپ و معیارهای محیطی توجیه کرد (Ebdon and Gauch, 2002).

در حضور برهمکنش متقاطع، ژنوتیپ‌هایی که در محیط‌های خاص عملکرد خوبی دارند، می‌توانند به عنوان ارقام یا والدین برای برنامه‌های اصلاحی انتخاب و توصیه شوند (Singh et al., 1999; Angelini et al., 2019). وقتی که برهمکنش از نوع برهمکنش غیر متقاطع است، تأکید می‌تواند بر انتخاب ژنوتیپ‌هایی با سازگاری عمومی باشد، یعنی ژنوتیپ‌هایی که در طیف وسیعی از محیط‌ها عملکرد خوبی دارند. این می‌تواند به به‌نژادگران کمک کند تا ارقام گیاهی انعطاف‌پذیرتر و سازگارتر را ایجاد کنند که می‌توانند در شرایط محیطی متنوع عملکرد خوبی داشته باشند (Ceccarelli, 1996).

برای عملکرد ذرت، برهمکنش نوع متقاطع بیشتر از نوع غیر متقاطع اتفاق می‌افتد (Shiri, 2013; Liu et al., 2010). Ceccarelli (1996) پیامدهای برهمکنش متقاطع بر استراتژی‌های اصلاحی مورد بررسی قرار داده و تأکید کرد در صورت وجود برهمکنش متقاطع بایستی استراتژی سازگاری خصوصی به جای سازگاری عمومی در نظر گرفته شود. بنابراین، درک ماهیت برهمکنش ژنوتیپ در محیط و تطبیق ژنوتیپ‌ها با مکان‌های خاص، هدف اصلی هر برنامه به‌نژادی است.

چندین مدل آماری برای مطالعه برهمکنش ژنوتیپ در محیط و بهره‌برداری از ظرفیت آن‌ها در فرایند آزادسازی رقم ارائه شده است. این مدل‌ها برای تجزیه و تحلیل و تفسیر ساختارهای پیچیده داده‌ها در آزمایش‌های چند محیطی، بهره‌برداری از برهمکنش ژنوتیپ در محیط و تسهیل تصمیم‌گیری برای آزادسازی رقم در برنامه‌های به‌نژادی ضروری هستند (Becker and Leon, 1988; Flores et al., 1998; Lin et al., 1986; Zobel et al., 1988). در میان آن‌ها، مدل‌های AMMI (اثرات جمع‌پذیر و اثرات متقابل ضرب‌پذیر) و GGE بای‌پلات (ژنوتیپ + ژنوتیپ × محیط) دو روش متداول برای تجزیه و تحلیل برهمکنش ژنوتیپ در محیط و ارزیابی ژنوتیپ‌ها هستند. این مدل‌ها روش‌های آماری چندمتغیره هستند و در تجزیه گرافیکی برهمکنش‌های ژنوتیپ و شناسایی ژنوتیپ‌های پایدار و با عملکرد بالا سودمند هستند (Samonte et al., 2004; Yan et al., 2000; Zobel et al., 1988).

فرایند برهمکنش‌های مدل AMMI در گام اول با تجزیه واریانس (ANOVA) شروع و به دنبال آن تجزیه به مؤلفه اصلی (PCA) است که بر روی مجموع مربع‌های تخصیص یافته از طریق ANOVA برای برهمکنش ژنوتیپ در محیط اعمال می‌شود. این مدل، اثر اصلی ژنوتیپ و محیط را با برهمکنش آن‌ها ترکیب کرده و امکان شناسایی ژنوتیپ‌های پایدار و با عملکرد بالا را در محیط‌های مختلف فراهم می‌کند (Zobel et al., 1988).

متدولوژی GGE بای پلات توسط Yan *et al.* (2000) در سال ۲۰۰۰ ارائه شده است و از آن زمان به طور گسترده توسط به‌نژادگران برای تجزیه و تحلیل داده‌های آزمایش‌های چندمحیطی استفاده شده است. اگرچه هر دو مدل (GGE بای پلات و AMMI) PCA و بای پلات برای توجیه برهمکنش ژنوتیپ در محیط ادغام می‌کنند. اما در مرحله اول تجزیه و تحلیل این دو مدل تفاوت‌هایی وجود دارد. در مدل AMMI اثر ژنوتیپ از GE (ژنوتیپ × محیط) جدا می‌گردد و در صورتی که در مدل GGE بای پلات مستقیماً G+GE (ژنوتیپ + ژنوتیپ × محیط) مورد تجزیه قرار می‌گیرد و در نهایت در آخرین مرحله تجزیه و تحلیل، در هر دو مدل نمودار بای پلات ترسیم می‌شود (Gauch, 2006).

مدل‌های AMMI و GGE بای پلات، برهمکنش ژنوتیپ × محیط را با استفاده از ترکیب مکان و سال به‌عنوان محیط برآورد می‌کنند و برهمکنش ژنوتیپ در محیط را به GLI (برهمکنش ژنوتیپ × مکان)، GYI (برهمکنش ژنوتیپ × سال) و GLYI (برهمکنش ژنوتیپ × مکان × سال) تفکیک نمی‌کنند. با این حال، مدلی که اخیراً توسط Ajay *et al.* (2022) به نام "تجزیه مرتبه بالاتر اثرات جمع‌پذیر و اثرات متقابل ضرب‌پذیر (Higher Order AMMI)" معرفی شده است، می‌تواند برهمکنش ژنوتیپ در محیط را به GYI، GLI و GLYI تفکیک نماید و PCA‌هایی مربوط به GLI به تنهایی و بدون اثرات مخدوش‌کننده GYI و GLYI محاسبه نماید. مدل HO-AMMI در مطالعه برهمکنش ژنوتیپ × مکان و شناسایی ژنوتیپ‌های پایداری که عملکرد خوبی در چندین مکان دارند، مفید است (Ajay *et al.*, 2022). هدف این مطالعه مقایسه سودمندی و کارایی روش‌های AMMI، HO-AMMI و GGE بای پلات برای انتخاب هیبریدهای پایدار و پر محصول ذرت در آزمایش‌های چند محیطی بود.

## مواد و روش‌ها

### مواد و طرح آزمایشی

تعداد ۱۴ هیبرید ذرت امیدبخش به همراه دو هیبرید تجاری شاهد (هیبریدهای شماره ۱۵ و ۱۶) در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با چهار تکرار در هشت مکان (کرج، شیراز، کرمانشاه، ارزوئیه کرمان، مشهد، اصفهان، میاندوآب و دزفول) طی سال‌های زراعی ۱۳۹۹ و ۱۴۰۰ مورد بررسی قرار گرفتند. هر کرت آزمایشی شامل چهار خط کاشت به فاصله ۷۵ سانتیمتر و به طول ۶/۵ متر بود که در روی هر خط جهت اطمینان از سبز شدن چهار بذر در ۱۸ کپه به فاصله ۳۵ سانتی‌متر به صورت دستی کاشته شد. پس از تنک کردن در مرحله ۴-۵ برگی (حدود ۱۸ روز بعد از کاشت) دو بوته در هر کپه نگه داشته شد و تراکم کشت در حدود ۷۴ هزار بوته در هکتار تنظیم گردید. از زمان کاشت تا برداشت کلیه

مراقبت‌های زراعی لازم از قبیل آبیاری، مبارزه با علف‌های هرز، کوددهی و غیره به عمل آمد. میزان کود اوره و فسفات آمونیم بر اساس تجزیه خاک و توصیه فنی در هر منطقه بود که کل کود فسفات و نیمی از کود اوره در زمان کاشت و نیمی دیگر از اوره در زمان هفت برگه شدن بوته‌ها به صورت سرک مصرف شد. به منظور تعیین عملکرد دانه، بلال‌های دو خط وسط هر کرت بعد از حذف بوته‌های حاشیه‌ای برداشت و با ترازوی حساس ۰/۰۵ توزین شد، سپس عملکرد بلال با درصد چوب بلال و رطوبت ۱۴ درصد تصحیح و میزان عملکرد دانه (تن در هکتار) مشخص شد.

## تجزیه‌های آماری

### مدل AMMI

در مدل AMMI، ابتدا اثرات افزایشی برای اثر اصلی ژنوتیپ‌ها (G) و محیط (E) با استفاده از ANOVA و سپس اثرات ضربی برای برهمکنش ژنوتیپ × محیط توسط تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) برازش شدند. مدل AMMI با توجه به معادله گاج (Gauch, 1992) به شرح زیر بیان می‌شود:

$$Y_{ij} = \mu + \beta_j + \sum_{k=1}^k \lambda_k \gamma_{ik} \delta_{jk} + \varepsilon_{ij} \quad (1)$$

که در آن  $Y_{ij}$  عملکرد دانه هیبرید  $i$  در محیط  $j$ ،  $\mu$  میانگین کل هیبریدها،  $\alpha_i$  اثر اصلی ژنوتیپ به عنوان انحراف از میانگین،  $\beta_j$  اثر اصلی محیط به عنوان انحراف از میانگین،  $n$  تعداد محورهای PCA باقیمانده در مدل تعدیل شده،  $\lambda_n$  مقدار ویژه PCA برای محور  $n$ ،  $\delta_{jn}$  نمره ژنوتیپ PCA برای محور  $n$ ،  $\gamma_{in}$  نمره بردار ویژه PCA برای محور  $n$  و  $\rho_{ij}$  و  $\varepsilon_{ijk}$  به ترتیب نویز مدل AMMI و خطا است که در مدل AMMI می‌تواند به عنوان باقیمانده در نظر گرفته شود. یکی از خروجی‌های اصلی مدل AMMI نمودار بای‌پلات است که بر اساس نمرات IPC1 و IPC2 رسم می‌شود. تجزیه مدل AMMI در محیط نرم‌افزار R-3.1.2 و با استفاده از بسته Agricola انجام گرفت.

### مدل GGE بای‌پلات

مدل GGE بای‌پلات به طور گسترده برای تقریب داده‌های برهمکنش ژنوتیپ × محیط به SVD (تجزیه به مقادیر منفرد) استفاده می‌شود و برابر با اثرات ژنوتیپ + ژنوتیپ × محیط می‌باشد (Yan et al., 2007). مدل GGE بای‌پلات را می‌توان با معادله زیر بیان کرد (Cossa et al., 2004):

$$Y_{ij} = \mu + \beta_j + \sum_{k=1}^k \lambda_k \gamma_{ik} \delta_{jk} + \varepsilon_{ij} \quad (2)$$



که در آن  $\beta_j$  اثر اصلی محیط  $j$ ،  $k$  تعداد PC،  $\lambda_k$  مقدار منفرد برای PC  $k$ م (PCK) و  $\gamma_{ik}$  و  $\delta_{jk}$  به ترتیب نمرات ژنوتیپ و محیط برای محور  $k$ م ژنوتیپ  $i$  و محیط  $j$  و  $\varepsilon_{ij}$  میانگین خطا می‌باشند.

مدل GGE بای پلات، همان‌طور که توسط Yan and Kang (2003) نشان داده شده است، داده‌ها را از طریق یک فاکتور مقیاس‌بندی به نام  $f$  به SVD دو مؤلفه اصلی اول تبدیل می‌کند تا نمرات ژنوتیپ و محیط را به دست آورد. در مدل GGE بای پلات، دو مؤلفه اول بهترین تطابق را برای ایجاد بای پلات‌های GGE دارند و بیشترین واریانس را دارا هستند. تجزیه GGE بای پلات با استفاده از نرم‌افزار GGE bipolt انجام شد.

### مدل HO-AMMI

مدل مرتبه بالاتر AMMI (HO-AMMI) یک مدل تجزیه پایداری جدید است که برای مطالعه برهمکنش ژنوتیپ  $\times$  مکان در آزمایش‌های چند محیطی استفاده می‌شود (Ajay *et al.*, 2022). مدل HO-AMMI تمام برهمکنش‌های احتمالی دو طرفه و سه‌طرفه، مانند GLI (برهمکنش ژنوتیپ  $\times$  مکان)، GYI (برهمکنش ژنوتیپ  $\times$  سال)، GLYI (برهمکنش ژنوتیپ  $\times$  مکان  $\times$  سال) را به‌طور جداگانه برای محاسبه مقادیر پایداری بدون اثرات مخدوش‌کننده سایر برهمکنش‌ها بر روی یکدیگر محاسبه می‌کند.

IPCA تخمین زده شده با استفاده از GLI می‌تواند برای تعیین دقیق ژنوتیپ برای محیط‌های هدف استفاده شوند. معادله مورد استفاده در مدل HO-AMMI به صورت زیر می‌باشد (Ajay *et al.*, 2022):

$$X_{ijk} = \mu + Y_i + L_j + G_k + YL_{ij} + GY_{ik} + GL_{jk} + GLY_{ijk} + \varepsilon_{ijk} \quad (3)$$

که در آن  $X_{ijk}$  عملکرد ژنوتیپ  $k$  در سال  $i$  و مکان  $j$ ،  $\mu$  میانگین کل هیبریدها،  $Y_i$  اثر اصلی تصادفی سال  $i$ ،  $L_j$  اثر اصلی ثابت مکان  $j$ ،  $G_k$  اثر اصلی ثابت ژنوتیپ  $k$ ،  $YL_{ij}$  اثر متقابل تصادفی سال  $i$  و مکان  $j$ ،  $GY_{ik}$  اثر متقابل تصادفی ژنوتیپ  $k$  و سال  $i$ ،  $GL_{jk}$  اثر متقابل تصادفی ژنوتیپ  $k$  و مکان  $j$ ،  $GLY_{ijk}$  اثر متقابل تصادفی ژنوتیپ  $k$  در سال  $i$  و مکان  $j$ ،  $\varepsilon_{ijk}$  میانگین خطای مرتبط با پاسخ ژنوتیپ  $k$  در سال  $i$  و مکان  $j$  می‌باشند. در مدل HO-AMMI، تمام برهمکنش‌های دو طرفه (GLI، GYI) و سه طرفه (GLYI) به‌طور جداگانه با توجه به روش پیشنهاد شده توسط Gollob (1968) و Gauch (1988) با استفاده از مدل تحلیل عاملی محاسبه می‌شوند.

SVD مربوط به مدل HO-AMMI را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$X_{ijk} = \mu + Y_i + L_j + G_k + \sum_{n=1}^t \lambda_{n(ki)} \alpha_{kn} \gamma_{in} + \sum_{n=1}^t \lambda_{n(kj)} \alpha_{kn} \gamma_{jn} + \sum_{n=1}^t \lambda_{n(ij)} \alpha_{jn} \gamma_{in} + \sum_{n=1}^t S_n U_{kn} V_{ijn} + \varepsilon_{ijk} \quad (4)$$

که در آن عملکرد ژنوتیپ  $k$  در سال  $i$  مکان  $j$ ،  $\mu$  میانگین کل هیبریدها،  $Y_i$  اثر اصلی تصادفی سال  $i$ ،  $L_j$  اثر اصلی ثابت مکان  $j$ ،  $G_k$  اثر اصلی ثابت ژنوتیپ  $k$ ،  $\lambda_{n(ki)}$  مقدار منفرد  $n$  مؤلفه ضربی برای ژنوتیپ  $k$  در سال  $i$ ،  $\alpha_{kn}$  بردار منفرد  $n$  برای ژنوتیپ  $k$ ،  $\gamma_{in}$  بردار منفرد  $n$  برای سال  $i$ ،  $\lambda_{n(kj)}$  مقدار منفرد  $n$  مؤلفه ضربی برای ژنوتیپ  $k$  در مکان  $j$ ،  $\alpha_{kn}$  بردار منفرد  $n$  برای ژنوتیپ  $k$ ،  $\gamma_{jn}$  بردار منفرد  $n$  برای مکان  $j$ ،  $\lambda_{n(ij)}$  مقدار منفرد  $n$  مؤلفه ضربی برای سال  $i$  در مکان  $j$ ،  $\alpha_{jn}$  بردار منفرد  $n$  برای مکان  $j$ ،  $\gamma_{in}$  بردار منفرد  $n$  برای سال  $i$  است،  $S_n$  مقدار منفرد  $n$  مؤلفه ضربی برای ژنوتیپ  $k$  در سال  $i$  و مکان  $j$ ،  $U_{kn}$  بردار منفرد مرکب  $n$  برای ژنوتیپ  $k$ ،  $V_{ijn}$  بردار منفرد  $n$  برای سال  $i$  در مکان  $j$  و  $\varepsilon_{ijk}$  میانگین خطای مرتبط با پاسخ ژنوتیپ  $k$  در سال  $i$  و مکان  $j$  می‌باشند. تجزیه HO-AMMI در محیط نرم‌افزار R-3.1.2 با استفاده از برنامه‌ای که در توسط معرفی‌کنندگان این مدل توسعه یافته است، مورد تجزیه قرار گرفت.

## نتایج

### مقایسه عملکرد دانه هیبریدها در محیط‌های مورد مطالعه

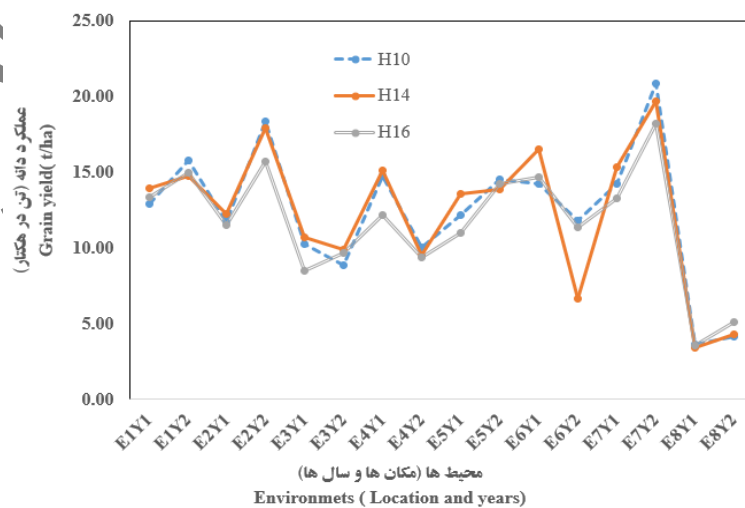
میانگین هیبریدها در ۱۶ محیط (هشت مکان در دو سال) نشان داد دامنه تغییرات عملکرد هیبریدها بین ۹/۷۵ تا ۱۲/۴۲ تن در هکتار متغیر بود. همچنین میانگین عملکرد دانه محیط‌ها نیز بین ۳/۹۵ تا ۱۵/۱۸ متغیر بود. عملکرد دانه هیبریدهای مورد بررسی با توجه به محیط‌ها متفاوت بود. در این میان برخی از هیبریدها مورد بررسی سازگاری عمومی را در حالی که برخی دیگر سازگاری خصوصی به برخی از محیط‌ها را نشان دادند.

بر اساس میانگین دو ساله عملکرد دانه هیبریدها در هشت مکان، هیبریدهای شماره ۱۰ و ۱۴ به ترتیب با ۱۲/۴۲ و ۱۲/۳۶ تن در هکتار بالاترین عملکرد دانه را داشتند. هیبرید شاهد سینگل کراس ۷۰۴ نیز با ۱۱/۶۹ تن در هکتار در رتبه سوم قرار داشت. بالاترین میانگین رتبه نیز به ترتیب مربوط به این دو هیبرید مربوط بود (جدول ۱). بررسی تغییرات عملکرد دانه دو هیبرید پرمحصول (هیبرید شماره ۱۰ و ۱۴) در طول سال‌ها و مکان‌ها می‌تواند در انتخاب بهترین هیبرید با تغییرات متعادل عملکرد دانه برای انتخاب و معرفی رقم با عملکرد بالا و پایدار بسیار کمک‌کننده باشد. از روش‌های مختلف تجزیه پایداری می‌توان برای انتخاب هیبرید پرمحصول و پایدار در آزمایش‌های چند محیطی استفاده کرد، با این حال اثربخشی یک روش زمانی بالا خواهد بود که بتواند ژنوتیپ‌های دارای بهترین عملکرد و پایدار را از سایر ژنوتیپ‌ها تشخیص دهد. به منظور درک بهتر ماهیت تغییرات عملکرد هیبریدها در مکان‌های مورد مطالعه، تغییرات عملکرد دانه دو هیبرید برتر به همراه رقم شاهد (سینگل کراس ۷۰۴)، در شکل ۲ به نمایش گذاشته شده است. بر اساس شکل ۲، به نظر می‌رسد که هیبرید پرمحصول شماره ۱۴ عملکرد دانه بالاتری نسبت به هیبرید پرمحصول دیگر (هیبرید شماره ۱۰) در بیشتر محیط‌ها داشت. این وضعیت در نمودار ویولن (شکل ۳) بهتر نشان داده شده است، به طوری که مشهود است که در محیط‌های با پتانسیل بالا، هیبرید شماره ۱۴ نسبت به هیبرید پرمحصول شماره ۱۰ تغییرات عملکرد دانه کمتری دارد. به نظر می‌رسد هیبرید پرمحصول شماره ۱۴ قابل معرفی به بهره‌برداران و کشاورزان می‌باشد. به طور کلی در بین روش‌های تجزیه پایداری، مدلی که بتواند این دو هیبرید را از سایر هیبریدها تفکیک نماید کند، مدل موثرتری خواهد بود.

جدول ۱: عملکرد دانه و رتبه عملکرد دانه هیبریدهای مورد مطالعه در ۱۶ محیط.

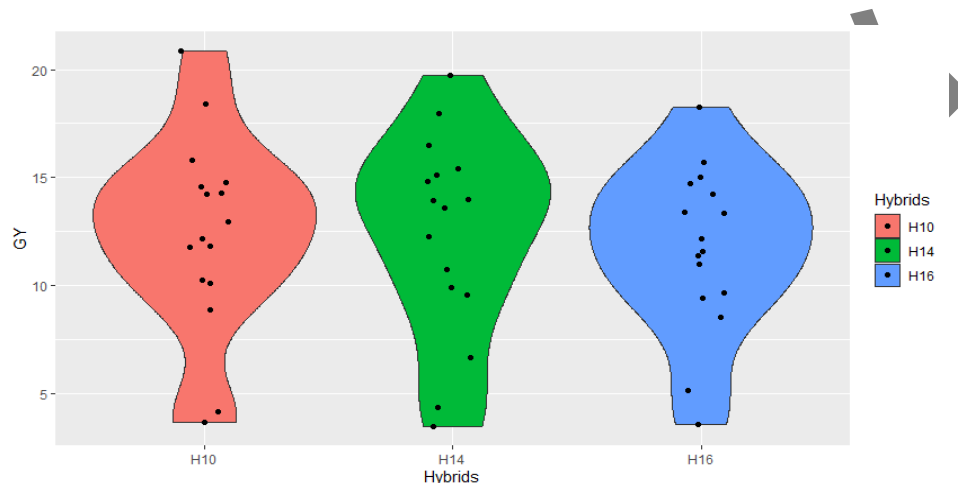
**Table 1: The Grain yield and grain yield ranks of the studied hybrids over the ۱۶ environments.**

| شماره هیبرید | پدگیری                                | عملکرد دانه (تن در هکتار)  | رتبه میانگین عملکرد دانه | میانگین رتبه          |
|--------------|---------------------------------------|----------------------------|--------------------------|-----------------------|
| Hybrids No.  | Pedigree                              | Grain yield (ton/ hectare) | Mean Grain yield rank    | Grain yield Mean rank |
| 1            | KLM8911/1-4-1-2-1-1×K1263/1           | 10.92                      | 13                       | 12                    |
| 2            | K47/2-2-1-3-3-1-1-1×K1264/1           | 11.64                      | 4                        | 5                     |
| 3            | KLM83002/90/2-1 ×K1264/1              | 11.49                      | 8                        | 6                     |
| 4            | KLM8916/1-7-2-1-1-1×MO17              | 11.5                       | 7                        | 7                     |
| 5            | KLM77012/4-1-1-5-1-2-1×MO17           | 11.21                      | 11                       | 8                     |
| 6            | KLM8908/1-2-2-4-1-1×K1263/1           | 9.75                       | 16                       | 15                    |
| 7            | K47/2-2-1-3-3-1-1-1×K1263/1           | 11.05                      | 12                       | 13                    |
| 8            | KLM91005/3-1-2-2-2-1×MO17             | 10.74                      | 14                       | 14                    |
| 9            | KLM91015/2-2-1-1-1-1×MO17             | 11.39                      | 9                        | 9                     |
| 10           | K47/2-2-1-4-1-1-1 × K18               | 12.42                      | 1                        | 1                     |
| 11           | KLM77012/4-1-1-5-1-2-1 × B73          | 10.2                       | 15                       | 16                    |
| 12           | K18 X 2- CHTHIY, 2002/90/77-3×K3640/3 | 11.56                      | 5                        | 10                    |
| 13           | K47/2-2-1-2-2-1-1-1×K3640/3           | 11.56                      | 6                        | 3                     |
| 14           | SC718B                                | 12.36                      | 2                        | 2                     |
| 15           | TWC647                                | 11.31                      | 10                       | 11                    |
| 16           | SC704                                 | 11.69                      | 3                        | 4                     |
| LSD5%        | -                                     | 0.58                       | -                        | -                     |



شکل ۱ تغییرات عملکرد دانه دو هیبرید پرمحصول (هیبرید شماره ۱۰ و ۱۴) به همراه هیبرید شاهد سینگل کراس ۷۰۴ (هیبرید شماره ۱۶) در محیط‌های مورد بررسی (مکان‌ها و سال‌ها).

**Figure 1. Variation in grain yield of the two top-yielding hybrids (hybrids No. 10 and 14) along with the commercial check (SC704) in the tested environments (locations and years).**



شکل ۲ نمودار ویولن پراکنش عملکرد دانه دو هیبرید پرمحصول (هیبرید شماره ۱۰ و ۱۴) به همراه هیبرید شاهد سینگل کراس ۷۰۴ (هیبرید شماره ۱۶) در محیط‌های مورد بررسی (مکان‌ها و سال‌ها).

**Figure 2. Violin plot of the grain yield distribution of the two top-yielding hybrids (hybrids No. 14 and 14) along with the commercial check (SC704) in the tested environments (locations and years).**

مدل‌های AMMI (GE)، GGE (G+GE) و HO-AMMI (GL)

تجزیه واریانس AMMI برای ۱۶ هیبرید ذرت در هشت مکان در دو سال (۱۶ محیط) نشان داد که هر سه منبع تغییر اثر ژنوتیپ (G)، اثر محیط (E)، و برهمکنش ژنوتیپ × محیط (GE) به طور معنی‌دار بر عملکرد دانه هیبریدهای ذرت تأثیر گذاشتند (جدول ۲). در این مدل اثر افزایشی اصلی محیط بر عملکرد دانه برابر با ۸۷/۷۰ درصد از مجموع مربعات کل بود. مقدار بالای این پارامتر نشان دهنده تفاوت فاحش در میانگین محصول دهی محیط می‌باشد. نتایج بیانگر این است که بیان صفت به طور معنی‌داری با تغییر شرایط یک محیط معین تغییر می‌کند که برای صفت چند ژنی پیچیده مانند عملکرد مشهود بود. میزان اثر اصلی افزایشی برای ژنوتیپ و برهمکنش ژنوتیپ × محیط به ترتیب برابر با ۲/۸۰ و ۹/۵۰ درصد از تغییرات مشاهده شده بود. این بدان معنی است که تنها ۱۲/۳ درصد از تغییرات عملکرد دانه می‌تواند

برای شناسایی ژنوتیپ‌های سازگار استفاده شود. در این مدل محیط بیشترین تنوع را داشت، به دنبال آن GEI در حالی که کمترین تأثیر را داشت. در این بررسی، شش IPCA معنی‌دار بودند که ۸۷/۵۲ درصد از تغییرات مجموع مربعات برهمکنش ژنوتیپ در محیط را توضیح می‌دادند (جدول ۲).

مشابه AMMI، تجزیه GGE بای‌پلات نیز از تجزیه به مؤلفه‌های اصلی برای بررسی تغییرات در داده‌ها استفاده می‌کند. در این مدل، دو مؤلفه اصلی اول بیشترین درصد تغییرات را به ترتیب ۳۵/۱۲ و ۱۵/۷ درصد توجیه نمودند (شکل ۶). با این حال، برخلاف مدل AMMI، در روش GGE بای‌پلات، مؤلفه‌های اصلی از ماتریس برهمکنش ژنوتیپ + ژنوتیپ × محیط (سال و مکان) به دست می‌آید تا اهمیت بیشتری به واریانس ژنوتیپ داده شود. سهم واریانس GGE از کل واریانس ۱۲/۳۰ درصد و سهم G از کل تغییرات GGE برابر با ۲۲/۷۶ درصد می‌باشد.

بر خلاف مدل AMMI که اثرات E، G و GEI را محاسبه می‌کند، در مدل HO-AMMI اثرات L، G و Y مستقیماً و همچنین اثر ضربی همه برهمکنش‌های ممکن (GLYI، LYI، GYI، GLI) برآورد می‌شوند. در این بررسی منابع L، G، LYI، GLI و GYI اثرات معنی‌داری بر عملکرد دانه داشتند (جدول ۳). در این رویه، منبع مکان حداکثر تغییرات با ۶۴/۸۸ درصد را توضیح داد و به دنبال آن LYI، GLI، GYI و G قرار گرفتند. منابع تغییر LYI (IPCA1LY) و GYI (IPCA1GY) هر کدام یک برهمکنش مؤلفه اصلی معنی‌دار در این بررسی داشتند. منبع GLI نیز دارای دو IPCA معنی‌دار بود که ۵۲/۶۳ درصد از مجموع مربعات GLI را توضیح می‌دهد که نشان می‌دهد بدون در نظر گرفتن سال‌های ارزیابی، GLI اطلاعات قابل اعتمادی را در مورد عملکرد ژنوتیپ در چندین مکان ارائه می‌دهد. GLYI نیز دو IPCA معنی‌دار در این تحقیق داشت (جدول ۳).

جدول ۲ تجزیه واریانس AMMI برای مطالعه برهمکنش ژنوتیپ در محیط (GEI) برای ۱۶ هیبرید مورد مطالعه در ۱۶ محیط (مکان و سال).

**Table 2 AMMI analysis of variance to study genotype-environment interactions (GEI) for 16 hybrids studied across 16 environments (locations and years).**

| منابع تغییرات       | درجه آزادی        | مجموع مربعات       | (%) تجمعی | میانگین مربعات | احتمال      |
|---------------------|-------------------|--------------------|-----------|----------------|-------------|
| Source of variation | Degree of freedom | Sum of square (SS) | % SS      | Mean Square    | Probability |
| Environment         |                   |                    |           |                |             |
| (E)                 | 15                | 13982.39           | 87.70     | 932.16         | 0.000       |

|              |     |         |       |        |       |       |
|--------------|-----|---------|-------|--------|-------|-------|
| Genotype (G) | 15  | 446.15  | 2.80  | 90.50  | 29.74 | 0.000 |
| E×G          | 225 | 1514.05 | 9.50  | 100.00 | 6.73  | 0.000 |
| PC1          | 29  | 364.91  | 24.00 | 24.10  | 12.58 | 0.000 |
| PC2          | 27  | 307.72  | 20.20 | 44.20  | 11.40 | 0.000 |
| PC3          | 25  | 249.03  | 16.45 | 60.87  | 9.96  | 0.000 |
| PC4          | 23  | 196.98  | 13.01 | 73.88  | 8.56  | 0.000 |
| PC5          | 21  | 107.48  | 7.10  | 80.98  | 5.12  | 0.047 |
| PC6          | 19  | 98.98   | 6.54  | 87.52  | 5.21  | 0.048 |
| PC7          | 17  | 74.51   | 4.92  | 92.44  | 4.38  | 0.153 |
| PC8          | 15  | 43.61   | 2.88  | 95.32  | 2.91  | 0.566 |
| PC9          | 13  | 41.70   | 2.75  | 98.08  | 3.21  | 0.458 |
| PC10         | 11  | 14.22   | 0.94  | 99.02  | 1.29  | 0.957 |
| PC11         | 9   | 8.62    | 0.57  | 99.58  | 0.96  | 0.976 |
| PC12         | 7   | 3.96    | 0.26  | 99.85  | 0.57  | 0.990 |
| PC13         | 5   | 1.97    | 0.13  | 99.98  | 0.39  | 0.988 |
| PC14         | 3   | 0.34    | 0.02  | 100.00 | 0.11  | 0.991 |
| PC15         | 1   | 0.02    | 0.00  | 100.00 | 0.02  | 0.936 |
| PC16         | -1  | 0.00    | 0.00  | 100.00 | 0.00  | NA    |
| Residuals    | 768 | 2510.31 | 0.00  | 0.00   | 3.27  | NA    |

در مدل HO-AMMI منابع GLI، GYI یا LYI، اجزای برهمکنش به ترتیب تغییرات نزولی مرتب شده‌اند و از توزیع  $\chi^2$  پیروی می‌کنند (Gollob, 1968). GYI توزیع  $\chi^2$  غیرمرکزی دارد (Gollob, 1968) و به ترتیب نزولی رتبه‌بندی نمی‌شود. در این مطالعه، کمترین تغییرات را با مجموع مربعات غیرمعنی‌دار توضیح داد. IPCA2<sub>GLY</sub> حداکثر تغییر و سپس IPCA3<sub>GLY</sub> را به ترتیب با ۵۴/۳۹ و ۳۵/۶۷ درصد توجیه نمودند. از آنجا که IPCA1<sub>GLY</sub> منفی و ناچیز بود، از واریانس معمول حذف گردید (جدول ۳). نتایج مشابهی توسط Ajay *et al.* (2022) نیز گزارش شده است.

برآورد میزان برهمکنش ژنوتیپ × محیط در مدل‌های HO-AMMI، AMMI و GGE با پلات متفاوت بود. به طوری که در این مطالعه، مدل HO-AMMI درصد تغییرات برهمکنش ژنوتیپ × محیط (۹/۵۰ درصد) را به اجزای آن GLI (۳/۷۶ درصد)، GYI (۱/۲۱ درصد) و GYI (۳/۲۴) تجزیه نمود (جدول ۳). این نشان می‌دهد مدل HO-AMMI می‌تواند GYI و GLI را از GLI تفکیک نماید. همان‌طور که توسط Arief *et al.* (2019) و Ajay *et al.* (2022) قبلاً اشاره شده است واریانس‌های G و GL با واریانس‌های GY و GLY اختلاط پیدا می‌کنند. مدل HO-AMMI همزمان با تخمین

تغییرات GL، اثرات مخدوشگر GY و GYL را حذف می‌کند. مدل HO-AMMI نسبت به مدل AMMI درصد بیشتری از تغییرات واریانس توجیه داده شده، توسط مؤلفه‌های ضریبی را تبیین می‌کند. مقایسه درصد توجیه تغییرات توسط سه مدل مورد بررسی نشان داد که HO-AMMI با دو مؤلفه اول این مدل ۵۲/۶۳ از تغییرات را توجیه نمود، در صورتی که این تغییرات در GGE بای پلات و AMMI به ترتیب برابر با ۵۰/۹ و ۴۴/۲ درصد بود. این نشان می‌دهد بای پلات حاصله از مدل HO-AMMI از سهم بیشتری از تغییرات کل نسبت به دو مدل دیگر به ویژه AMMI استفاده می‌کند و در نتیجه بای پلات حاصله دارای اعتبار بیشتری است.

جدول ۳ تجزیه واریانس مرتبه بالاتر AMMI (HO-AMMI) برای مطالعه برهمکنش ژنوتیپ × مکان × سال (GLYI) برای ۱۶ هیبرید مورد مطالعه در هشت مکان و دو سال.

**Table 3 Higher order AMMI analysis of variance (HO-AMMI) to study genotype-location-year interaction (GLYI) for 16 hybrids studied in eight locations and over two years.**

| منابع تغییرات       |         | درجه آزادی        | مجموع مربعات       | میانگین مربعات | %SS    |
|---------------------|---------|-------------------|--------------------|----------------|--------|
| Source of variation |         | Degree of freedom | Sum of square (SS) | Mean Square    | %SS    |
| Location            | L       | 7                 | 11972.70           | 1710.39***     | 64.88  |
| Year                | Y       | 1                 | 7.90               | 7.90ns         | 0.04   |
| Hybrid (Hy)         | G       | 15                | 446.20             | 29.74**        | 2.42   |
| Replication         | Rep     | 3                 | 33.20              | 11.06ns        | 0.18   |
| L:Rep               | Rep(L)  | 21                | 225.70             | 10.75**        | 1.22   |
| Rep:Y               | Rep(Y)  | 3                 | 75.60              | 25.19**        | 0.41   |
| L:Y                 | L×Y     | 7                 | 2001.70            | 285.96**       | 10.85  |
| PC1                 | IPCA1LY | 7                 | 2001.74            | 285.96**       | 100.00 |
| Y:Hy                | G×Y     | 15                | 223.00             | 14.87**        | 1.21   |
| PC1                 | IPCA1GY | 15                | 223.01             | 14.87**        | 100.00 |
| L:Hy                | G×L     | 105               | 693.60             | 6.61**         | 3.76   |
| PC1                 | IPCA1GL | 21                | 230.14             | 10.96**        | 33.18  |
| PC2                 | IPCA2GL | 19                | 134.90             | 7.10*          | 19.45  |
| PC3                 | IPCA3GL | 17                | 116.09             | 6.83ns         | 16.74  |
| PC4                 | IPCA4GL | 15                | 94.33              | 6.29ns         | 13.60  |



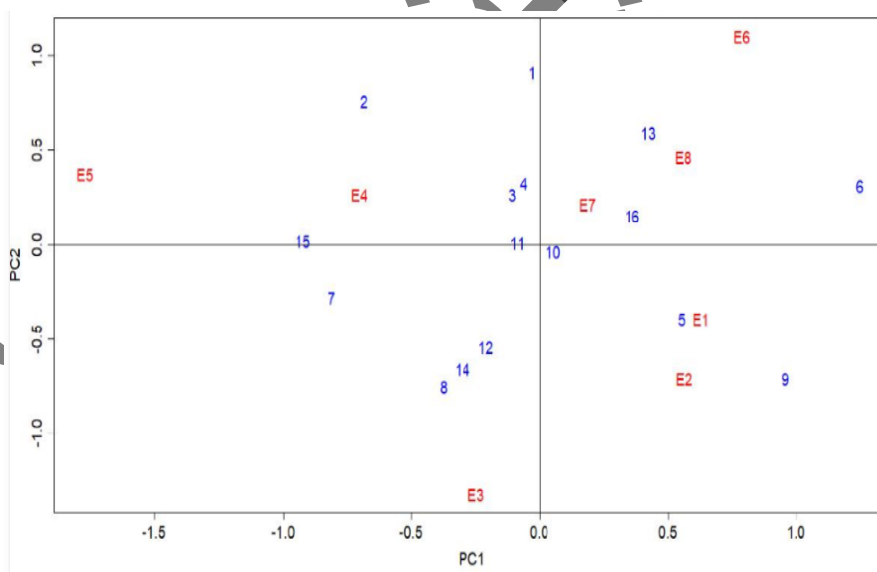
|           |          |     |         |           |        |
|-----------|----------|-----|---------|-----------|--------|
| PC5       | IPCA5GL  | 13  | 64.80   | 4.99ns    | 9.34   |
| PC6       | IPCA6GL  | 11  | 32.79   | 2.98ns    | 4.73   |
| PC7       | IPCA7GL  | 9   | 20.59   | 2.29ns    | 2.97   |
| L:Y:Hy    | G×L×Y    | 105 | 597.40  | 5.69**    | 3.24   |
| PC1       | IPCA1GLY | -21 | 238.76  | -11.37 ns | -39.97 |
| PC2       | IPCA2GLY | 19  | 324.92  | 17.10**   | 54.39  |
| PC3       | IPCA3GLY | 17  | 213.07  | 12.53**   | 35.67  |
| PC4       | IPCA4GLY | 15  | 119.89  | 7.99ns    | 20.07  |
| PC5       | IPCA5GLY | 13  | 63.18   | 4.86ns    | 10.58  |
| PC6       | IPCA6GLY | 11  | 67.48   | 6.13ns    | 11.29  |
| PC7       | IPCA7GLY | 9   | 37.57   | 4.18ns    | 6.29   |
| PC8       | IPCA8GLY | 7   | 10.05   | 1.44ns    | 1.68   |
| Residuals | Error    | 741 | 2175.80 | 2.94      | 11.79  |

مقایسه بای پلات مدل های AMMI، HO-AMMI و GGE بای پلات هنگامی که محیط هم مکان و هم سال را شامل می شود، انتخاب ژنوتیپ برای یک مکان خاص در مدل های AMMI و GGE بای پلات دشوار می شود زیرا اثر GLI توسط اثر متقابل GYI و GLYI پوشانده می شود. اثر مخدوش کننده سال در مدل HO-AMMI حذف می گردد و GEI به GLI، GYI و GLYI تقسیم می نماید. برای بررسی سودمندی مدل ها در انتخاب هیبرید پایدار و پرمحصول، بای پلات GLI مدل HO-AMMI با مدل های AMMI و GGE بای پلات مورد مقایسه قرار گرفتند. شکل ۴ بای پلات مثبتی بر GLI را برای HO-AMMI و شکل های ۵ و ۶ به ترتیب بای پلات حاصل از GEI را برای مدل های AMMI و GGE بای پلات نشان می دهند.

در بای پلات مدل HO-AMMI، پراکنش هیبریدها در بای پلات نشان داد که هیبریدهای شماره ۱۰ و ۱۱ با حداقل اثرات GL به مرکز بای پلات نزدیک بودند، در حالی که سایر هیبریدها دور از مبدا قرار گرفتند و تحت تأثیر اثر GLI قرار گرفتند. بنابراین می توان نتیجه گرفت که هیبریدهای شماره ۱۰ و ۱۱ سازگاری عمومی خوبی دارند. هیبرید شماره ۱۱ علی رغم پایداری خوب به دلیل عملکرد دانه پایین قابل معرفی به کشاورزان نمی باشد. هیبرید شماره ۱۲، ۱۴، ۸ و ۷ برهمکنش مثبتی با مکان E3 داشتند و بنابراین نشان دهنده سازگاری خصوصی این هیبریدها با این محیط می باشد و چنین استدلالی می توان برای هیبریدها و محیط هایی که در یک ناحیه قرار گرفتند، نیز می توان انجام داد (شکل ۴).

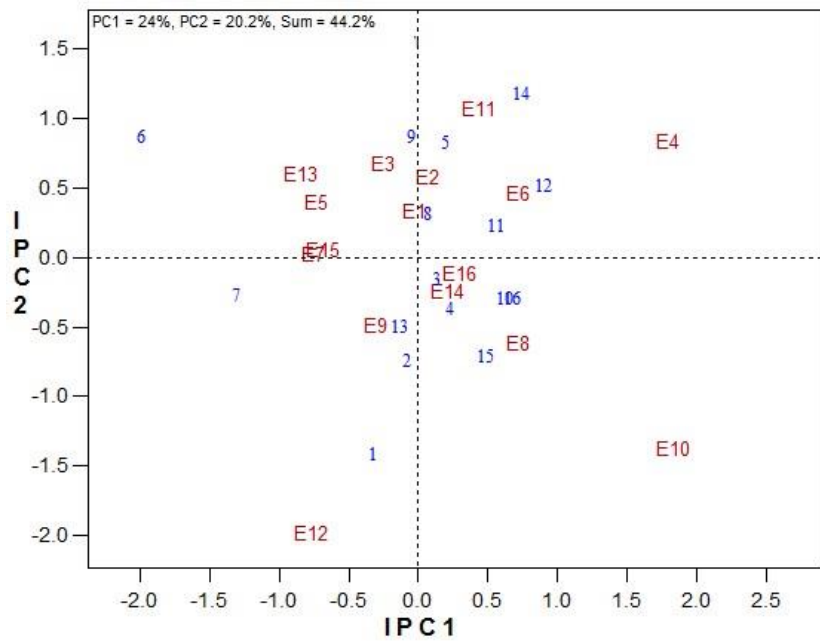
شکل ۵ بای پلات مدل AMMI را نشان می‌دهد. هیبریدهای شماره ۴ و ۳ نزدیک به مبدأ با حداقل اثرات GEI قرار داشتند و سایر هیبریدها به برخی از محیط‌های آزمایش بسیار حساس بودند و در نتیجه سازگاری خصوصی به برخی محیط‌ها داشتند. در این روش، هیچ یک از دو هیبرید پربازده (هیبریدهای شماره ۱۰ و ۱۴) بر اساس سازگاری عمومی مورد انتخاب قرار نگرفتند (شکل ۵). بنابراین بر این اساس می‌توان گفت که مدل AMMI قادر به انتخاب هیبریدهای پرمحصول شماره ۱۰ و ۱۴ نبود.

شکل ۶ توزیع هیبریدها بر اساس GGE بای پلات نشان داد که هیبریدهای شماره ۳ و ۴ با کمترین اثر GE به مبدأ نزدیک بودند در حالی که باقیمانده هیبریدها دور از مبدأ قرار گرفتند و تحت تأثیر  $G + GEI$  قرار گرفتند. در این روش نیز مانند مدل AMMI، هیچ یک از دو هیبرید پربازده (هیبریدهای شماره ۱۰ و ۱۴) بر اساس سازگاری عمومی مورد انتخاب قرار نگرفتند. در روش GGE بای پلات به دلیل اهمیت دادن به اثر ژنوتیپ، تا حدودی اثر اختلاط اثر ژنوتیپ  $\times$  سال جبران می‌شود، لذا به نظر می‌رسد این مدل امکان گروه‌بندی هیبریدها با اهمیت دادن بیشتر به سازگاری خصوصی را فراهم می‌کند (شکل ۶).



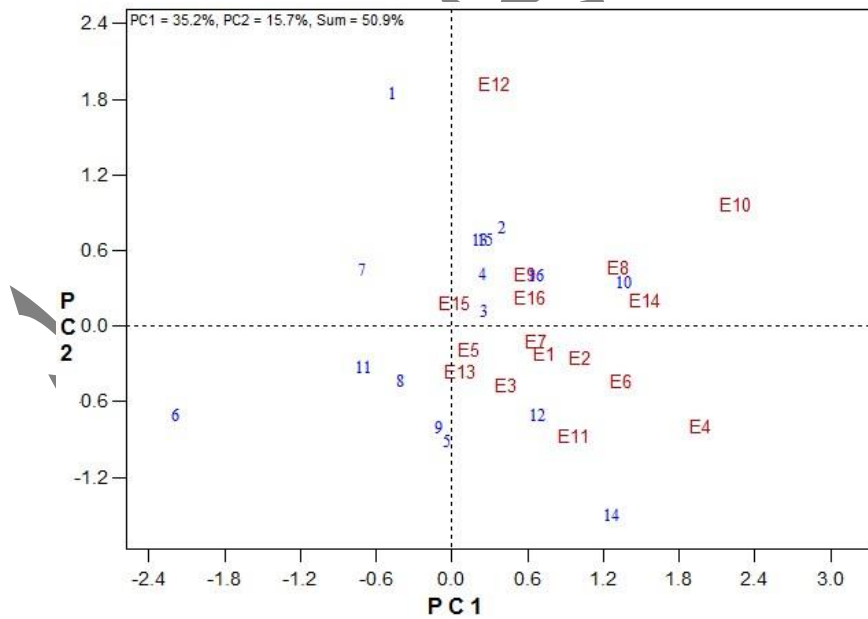
شکل ۴. بای پلات HO-AMMI بر اساس PC1 و PC2 حاصله از برهمکنش ژنوتیپ  $\times$  مکان (GLI).

Figure 4. Biplot based on PC1 and PC2 of genotype  $\times$  location interaction (GLI) for HO-AMMI.



شکل ۵. بای پلات AMMI براساس PC1 و PC2 حاصله از برهمکنش ژنوتیپ × محیط (GEI).

Figure 5. Biplot based on PC1 and PC2 of genotype × environment interaction (GEI) for AMMI model.



شکل ۶. بای پلات GGE براساس PC1 و PC2 حاصله از برهمکنش ژنوتیپ + ژنوتیپ × محیط (G + GEI).

Figure 6. Biplot based on PC1 and PC2 of genotype + genotype × environment interaction (G + GEI) for GGE model.

## بحث

در برنامه اصلاحی ذرت یا هر گیاه زراعی دیگر، همواره تلاش می‌شود تا ارقام را بهتر از ارقام تجاری موجود اصلاح و در اختیار کشاورزان قرار گیرد. با این حال، در سال‌های اخیر، تشدید تغییرات اقلیمی باعث افزایش دما، کمبود آب، افزایش شدت آفات و بیماری‌ها و همچنین افزایش آسیب‌های ناشی از آفات جدید شده است و در نتیجه فشار بر ارقام تجاری موجود افزایش یافته و منجر به کاهش شدیدتر عملکرد شده است. به تبع آن تولید محصولات کشاورزی در مقیاس جهانی با کاهش روبرو شده است. بنابراین، برای غلبه بر این تهدیدات، نیاز به اصلاح واریته‌های پایدار و متحمل از نظر ژنتیکی با افزایش عملکرد در واحد سطح با کاهش جلوگیری از عملکرد محصول در جهت کمک به تولید جهانی غذا، ضرورت بیشتر نسبت به قبل وجود دارد؛ بنابراین، به‌زادگران نه‌تنها نیاز به انجام تحقیقات در قالب شبکه‌های تحقیقاتی دارند، بلکه به ابزارهای آماری دقیق‌تری نیز نیاز دارند که به آن‌ها اجازه می‌دهد نتایج به دست آمده را با دقت بالا به درستی تفسیر کنند. به‌زادگران گیاه اغلب آزمایش‌های چند محیطی را برای ارزیابی عملکرد ژنوتیپ‌ها در محیط‌های مختلف به منظور غلبه بر GEI و استفاده از آن برای شناسایی ژنوتیپ‌های پایدار انجام می‌دهند. یک واریته را نمی‌توان به تنهایی بر اساس بالاترین میانگین عملکرد در تمام محیط‌های آزمایشی و بدون مطالعه پایداری آن در محیط‌های مختلف به کشاورزان توصیه کرد (Thamson and Philips, 2006).

در آزمایش‌های چند محیطی، تعدادی ژنوتیپ در چندین محیط (معمولاً ترکیبی از مکان‌ها و سال‌ها) مقایسه می‌شوند. بنابراین، GEI در ANOVA را می‌توان به بر همکنش‌های مختلفی از جمله مکان  $\times$  سال، ژنوتیپ  $\times$  مکان، ژنوتیپ  $\times$  سال و ژنوتیپ  $\times$  مکان  $\times$  سال تقسیم کرد. مدل‌های AMMI و GGE بای‌پلات، میزان GEI را با استفاده از ترکیب مکان و سال به عنوان محیط محاسبه می‌کنند و GEI را به GLI، GYI و GLYI تقسیم نمی‌کنند. اگرچه تغییرات ناشی از سال اغلب تصادفی بوده و روند ثابتی را نشان نمی‌دهند و همچنین کمتر قابل تکرار هستند. لذا استفاده از آن‌ها (GYI و GLYI) برای بهره برداری از اثرات متقابل با یک مشکل جدی مواجه است. در نتیجه، رتبه‌بندی ژنوتیپ‌ها با توجه به تعداد سال‌های ارزیابی متفاوت خواهد بود و انتخاب ژنوتیپ‌ها برای مکان‌های هدف را با مشکل روبرو می‌کند. بنابراین، چون مدل‌های ذکرشده در بالا نمی‌توانند به طور جداگانه اثرات GLI و GYI را تخمین بزنند، (Ajay *et al.* (2022) مدل مرتبه بالاتر AMMI (HO-AMMI) را برای رفع این اشکال معرفی کرد. مدل HO-AMMI قادر به محاسبه GLI بدون

اثرات مخدوش‌کننده GYI و GLYI است. بر اساس نظر (Ajay *et al.*, 2022)، مدل‌های AMMI و HO-AMMI الگوهای متفاوتی از تغییرات را برای اثرات ژنوتیپ، محیط و ژنوتیپ بر اساس برهمکنش محیطی با تعداد سال‌ها و ژنوتیپ ارزیابی شده نشان می‌دهند.

در مدل AMMI، تغییرات توجیه شده توسط ژنوتیپ با تعداد سال‌های ارزیابی شده افزایش می‌یابد، در حالی که GEI کاهش می‌یابد و اثر ژنوتیپ با تعداد ژنوتیپ‌های ارزیابی شده افزایش می‌یابد، در حالی که GEI با تعداد ژنوتیپ‌های ارزیابی شده تغییر نمی‌کند. در مدل HO-AMMI با تعداد ژنوتیپ‌های ارزیابی شده، اثر ژنوتیپ افزایش و اثرات اصلی مکان و سال کاهش می‌یابد. سهم GLI با تعداد سال‌های ارزیابی افزایش می‌یابد، در حالی که سهم LYI و GLYI با تعداد سال‌های ارزیابی کاهش می‌یابد. تغییر اثر متقابل GE و GL در طول سال‌ها نشان می‌دهد که ژنوتیپ باید برای سال‌های بیشتری ارزیابی شود تا دقت برهمکنش در هر دو مدل افزایش یابد (Ajay *et al.*, 2022).

در مدل HO-AMMI، ارتباط و توزیع ژنوتیپ‌ها با مکان‌ها، بدون توجه به تعداد سال‌های ارزیابی، ثابت ماند. این در تضاد با مدل AMMI است که در آن توزیع محیط‌ها متفاوت است، حتی اگر توزیع ژنوتیپ تقریباً یکسان است. در این مطالعه، HO-AMMI توانست هیبریدهای پرمحصول (هیبریدهای شماره ۱۰ و ۱۴) با پایداری عمومی بالا از سایر هیبریدها تشخیص دهد، در حالی که AMMI و GGE بای‌پلات نتوانست هیبریدهای با سازگاری عمومی بالا را از سایر هیبریدها جدا کند.

در مدل HO-AMMI، انتخاب ژنوتیپ برای مکان موردنظر آسان‌تر از مدل AMMI است. در واقع، بای‌پلات GLI در مدل AMMI تنها بر اساس ژنوتیپ و مکان بدون اثر مخدوش‌کننده سال است. از سوی دیگر، اثر سال در مدل AMMI ممکن است اثر مکان را بپوشاند، بنابراین انتخاب ژنوتیپ را دشوارتر می‌کند. مدل HO-AMMI رتبه‌بندی دقیقی از ژنوتیپ‌ها را برای یک مکان بدون اثرات مخدوش‌کننده GYI و GLYI ارائه می‌کند و به اصلاح‌کنندگان این امکان را می‌دهد تا به طور خاص ژنوتیپ‌های پرمحصول را برای مکان‌های هدف شناسایی کنند. بای‌پلات GLI مدل HO-AMMI نیز تصویر واضحی از ارتباط ژنوتیپ‌ها با مکان هدف را به تصویر می‌کشد که اغلب در مدل‌های AMMI وجود ندارد. این مزیت مدل HO-AMMI می‌تواند به اصلاح‌کنندگان در انتخاب ژنوتیپ‌های مناسب برای مکان‌های هدف خاص کمک کند و در نتیجه عملکرد و پایداری عملکرد را بهبود بخشد.

**نتیجه‌گیری**

بر اساس میانگین عملکرد دانه هیبریدها در ۱۶ محیط، هیبریدهای شماره ۱۰ و ۱۴ به ترتیب با ۱۲/۴۲ و ۱۲/۳۶ تن در هکتار بیشترین عملکرد دانه را داشتند. با توجه به نتایج، مدل HO-AMMI توانست هیبریدهای پرمحصول با تغییرات عملکرد دانه کمتر از سایر هیبریدها را به خوبی تشخیص دهد، در حالی که مدل AMMI و GGE بای پلات نتوانست هیبریدهای پرمحصول را از هیبریدهای دیگر تفکیک نماید. در واقع، بای پلات GLI در مدل HO-AMMI تنها بر اساس ژنوتیپ و مکان و بدون اثر محدودش کننده سال عمل می کند. مدل HO-AMMI رتبه بندی دقیقی از ژنوتیپها را برای یک مکان بدون اثرات محدودش کننده GYI و GLYI ارائه می کند. لذا انتخاب ژنوتیپ برای مکان موردنظر در این مدل آسان تر از مدل AMMI بوده و بنابراین، مدل HO-AMMI را می توان در آزمایش های چندمحیطی برای انتخاب ژنوتیپهای پایدار با عملکرد بالا استفاده کرد.

## References

- Ajay, B. C., Abdul, F. R., Bera, S. K., Kumar, N., Gangadhar, K., Kona, P., Rani, K. and Radhakrishnan, T. 2022. Higher Order AMMI (HO-AMMI) analysis: A novel stability model to study genotype-location interactions. *Indian Journal of Genetics and Plant Breeding* 82(1): 25-30.
- Angelini, J., Faviere, G. S., Bortolotto, E. B., Arroyo, L., Valentini, G. H., and Cervigni G. D. L. 2019. Biplot pattern interaction analysis and statistical test for crossover and non-crossover genotype-by-environment interaction in peach. *Scientia Horticulturae* 252: 298-309.
- Arief V.N., Desmae H., Hardner C., DeLacy I. H., Gilmour, A., Bull, J. K. and Basford K. E. 2019. Utilization of multiyear plant breeding data to better predict genotype performance. *Crop Science* 59: 480-490.
- Becker, H.C. and Leon, J. 1988. Stability analysis in plant breeding. *Plant Breeding* 101, 1-23.
- Bradshaw, A.D. 1965. Evolutionary significance of phenotypic plasticity in plants. *Advances in Genetics* 13: 115-155.
- Ceccarelli, S. 1996. Positive interpretation of genotype by environment interactions in relation to sustainability and biodiversity. In: Cooper, M., Hammer, G.L. (Eds.), *Plant Adaptation and Crop Improvement*. CAB International, Wallingford (UK), pp.467-486.
- Crossa, J., Yang, R. C. and Cornelius, P.L. 2004. Studying crossover genotype  $\times$  environment interaction using linear-bilinear models and mixed models. *Journal of Agricultural, Biological, and Environmental Statistics* 9: 362-380.

- Ebdon, J.S. and Gauch, H.G. 2002. Additive main effect and multiplicative interactions analysis of national turf grass performance trials: I. Interpretation of genotype  $\times$  Environment Interaction. *Crop Science* 42: 489–496.
- Flores, F., Moreno, M.T. and Cubero, J.I. 1998. A comparison of univariate and multivariate method to analyze environments. *Field Crops Research* 56, 271–286.
- Gauch, H. G. 2006. Statistical analysis of yield trials by AMMI and GGE. *Crop Science* 46(4): 1488-1500.
- Gauch, H.G. 1988. Model selection and validation for yield trials with interaction. *Biometrics* 44: 705–715.
- Gauch, H.G. 1992. *Statistical Analysis of Regional Yield Trials: AMMI Analysis of Factorial Designs*. Elsevier, Amsterdam.
- Gollob, H.F. 1968. A statistical model which combines features of factor analytic and analysis of variance techniques. *Psychometrika*, 33: 73–115.
- Hudson, A. I., Odell, S. G., Dubreuil, P., Tixier, M. H., Praud, S., Runcie D. E. and Ross-Ibarra, J. 2022. Analysis of genotype-by-environment interactions in a maize mapping population. *G3*,12(3): jkac013.
- Lee, S. Y., Lee, H. S., Lee, C. M., Ha, S. K., Park, H. M., Lee, S. M., Kwon, Y., Jeung, J. U. and Mo, Y. 2023. Multi-environment trials and stability analysis for yield-related traits of commercial rice cultivars. *Agriculture* 13(2), 256.
- Lin, C.S., Binns, M.R. and Lefkovich, L.P. 1986. Stability analysis: Where do we stand? *Crop Science* 26: 894–900.
- Liu, Y. J., Chuan, D. U. A. N., Tian, M. L., Hu, E. L. and Huang, Y. B. 2010. Yield stability of maize hybrids evaluated in maize regional trials in southwestern china using nonparametric methods. *Agricultural Sciences in China* 9(10): 1413-1422.
- Romagosa, I., Van Eeuwijk, F.A. and Thomas, W.T.B. 2009. Statistical analyses of genotype by environment data. *Cereals Handbook of Plant Breeding* 3: 291–331.
- Samonte, S.O.P.B., Wilson, L.T., McClung, A.M. and Medley, J.C. 2004. Targeting Cultivars onto Rice Growing Environments Using AMMI and SREG GGE Biplot Analyses. *Crop Science* 45: 2414–2424.
- Shiri, M. 2013. Grain yield stability analysis of maize (*Zea mays* L.) hybrids in different drought stress conditions using GGE biplot analysis. *Crop Breeding Journal* 3(2): 107-112.
- Singh, M., Ceccarelli, S., and Grando, S. 1999. Genotype  $\times$  environment interaction of crossover type: detecting its presence and estimating the crossover point. *Theoretical and Applied Genetics* 99: 988-995.
- Thamson, W.E., and Philips, S.B. 2006. Methods to evaluate wheat cultivar testing environment and improve cultivar selection protocols. *Field Crops Research* 99, 87–95.
- Yan, W., and Kang, M. 2003. *GGE Biplot Analysis: A Graphical Tool for Breeders, Geneticists, and Agronomists*. CRC Press, Boca Raton, FL, pp. 288.
- Yan, W., Hunt, L.A., Sheng, Q., and Szlavnic, Z. 2000. Cultivar evaluation and mega-environment investigation based on the GGE biplot. *Crop Science* 40: 597–605.

Zobel, R.W., Wright, M.J., and Gauch, H.G. 1988. Statistical analysis of a yield trial. *Agronomy Journal* 80: 388–393.

نسخه پیش انتشار