



University of Guilan
Faculty of Agricultural Sciences



Studying genotype \times environment interaction effect in promising bread wheat genotypes in the cold climate using AMMI and GGE-Biplot methods

Ashkboos Amini^{1*}, Ali Akbar Asadi², Mohammad Rezaie Moradala³, Marefat Ghasemi⁴, Mehrdad Chaichi⁵, Masoud Ezat-Ahmadi⁶, Seyed Karim Hosseini Bay⁷, Ali Akbar Mahmoodi Pirahani⁸, Parviz Salehi⁹, Nader Mir Fakhraie¹⁰, Taghi Babaei¹¹ and Adel Ghadiri¹¹

1. Research Associate Professor, Seed and Plant Improvement Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran (* Corresponding author: amini_ashk@yahoo.com)
2. Research Assistant Professor, Zanjan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Zanjan, Iran
3. Research Associate Professor, West Azarbaijan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Urmia, Iran
4. Research Assistant Professor, Ardabil Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Ardabil, Iran
5. Research Assistant Professor, Hamedan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Hamedan, Iran
6. Research Assistant Professor, Razavi Khorasan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Mashhad, Iran
7. Researcher, Gazvin Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Gazvin, Iran
8. Researcher, Razavi Khorasan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Mashhad, Iran
9. Researcher, Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Shiraz, Iran
10. Researcher, East Azarbaijan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tabriz, Iran
11. Researcher, Markazi Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Arak, Iran

Comprehensive abstract

Introduction

Genotype \times environment interaction is one of the complex issues in plant breeding programs to introduce high yielding and stable genotypes, which is evaluated using multi-regional experiments before the release of new cultivars. The presence of genotype \times environment interaction causes the yield of cultivars to be affected by the environment and leads to differences in the yield of cultivars in different environments. AMMI and GGE-Biplot models are very important among the multivariate methods and have high resolution in identifying high yielding and stable genotypes. The objective of this study was to evaluate the stability of promising bread wheat genotypes and to identify high yielding and stable genotypes in the cold climate of the Iran.

Materials and methods

Fourteen wheat genotypes with winter and intermediate (facultative) growth type along with Mihan, Heydari, Zarrineh and Zare varieties as controls (a total of 18 genotypes) were investigated in randomized complete block design with three replications in research stations of Karaj, Hamadan, Mashhad, Jalgarokh, Miandoab, Ardabil, Arak, Eqlid, Tabriz and Qazvin. To analyze the data, first analysis of variance was separately done in each year and location, and then combined analysis of variance was performed for grain yield after confirming the homogeneity of the variances of



experimental errors. AMMI and GGE-Biplot methods were used to investigate the stability of the studied genotypes. AMMI stability parameters and simultaneous selection indices were also calculated based on these parameters.

Research findings

The results of combined analysis of variance showed that the main effect of environment and genotype and the interaction of genotype×environment accounted for 47.2, 9.8 and 28.3 percent of the total sum of squares, respectively. Genotypes G7, G8, G12, G2 and G1 had the highest grain yield and genotypes G15, G18, G10, G13, G14 and G16 had the lowest grain yield among the studied genotypes respectively. The results of AMMI analysis showed the existence of significant differences between environments, genotypes and their interactions. The first 12 significant principal components of AMMI analysis explained 98% of the genotype×environment interaction variance, and the first and second principal components explained a total of 46.27% of this variance. Based on the AMMI1 biplot, genotypes G8, G3, G1 and G4 and environments E9 and E5 with the higher grain yield than average grain yield and the lowest value of the first principal component were recognized as the most stable genotypes and environments. AMMI2 biplot did not identify a specific genotype as the genotype with general compatibility, however, G3 and G4 genotypes showed somewhat better general compatibility than the others. The simultaneous selection indices based on AMMI parameters identified G8, G12, G1, G4, and G3 genotypes with the lowest total rank as the stable and high yielding genotypes, respectively. The results of GGE-Biplot method based on biplot of the average yield and stability, introduced G8, G4, G3 genotypes followed by G1 as the most stable genotypes, due to grain yield higher than the average of the studied genotypes. Which-won-where biplot pattern divided the studied genotypes and environments into five and three groups, respectively, so that G12, G11, G3 and G4 genotypes in Karaj and Miandoab and G5, G7 and G8 genotypes in Jalgerokh and Mashhad showed better adaptation in both years. According to the biplot of the ranking of genotypes, there was no ideal genotype, but G8, G3, G5, G7 and G4 genotypes with the smallest distance from the hypothetical ideal genotype were identified as the best genotypes.

Conclusion

The results of this study showed that there is a little difference between AMMI and GGE-Biplot analyzes and both methods presented the same genotypes as superior genotypes. However, it is more logical to select genotypes using simultaneous selection indices based on AMMI analysis parameters, because all significant components are included in the calculation of these parameters. Therefore, based on simultaneous selection indices, genotypes G8, G12, G1, G4 and G3 with the lowest total rank are introduced as stable and high yielding genotypes.

Keywords: Compatibility, Multi-regional experiments, Simultaneous selection index, Stability

Received: March 13, 2024

Accepted: June 7, 2024

Cite this article:

Amini, A., Asadi, A.A., Rezaie Moradala, M., Ghasemi, M., Chaichi, M., Ezat Ahmadi, M., Hosseini Bay, S.K., Mahmoodi Pirahani, A.A., Salehi, P., Mir Fakhraie, N., Babae, T., & Ghadiri, G. (2024). Studying genotype×environment interaction effect in promising bread wheat genotypes in the cold climate using AMMI and GGE-Biplot methods. *Cereal Research*, 14(1), 99-124. doi: [10.22124/CR.2024.27052.1819](https://doi.org/10.22124/CR.2024.27052.1819).



مطالعه برهمکنش ژنوتیپ × محیط در ژنوتیپ‌های امیدبخش گندم نان در اقلیم سرد با استفاده از روش‌های AMMI و GGE-Biplot

اشکبوس امینی^{۱*}، علی‌اکبر اسدی^۲، محمد رضایی مراداعلی^۳، معرفت قاسمی کلخوران^۴، مهرداد چایچی^۵، مسعود عزت احمدی^۶، سید کریم حسینی بای^۷، علی‌اکبر محمودی پیراهنی^۸، پرویز صالحی^۹، نادر میرفخرایی^{۱۰}، تقی بابایی^{۱۱} و عادل غدیری^{۱۱}

- ۱- دانشیار پژوهش، موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران (* نویسنده مسئول: amini_ashk@yahoo.com)
- ۲- استادیار پژوهش، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی زنجان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، زنجان، ایران
- ۳- دانشیار پژوهش، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی آذربایجان غربی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ارومیه، ایران
- ۴- استادیار پژوهش، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی اردبیل، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اردبیل، ایران
- ۵- استادیار پژوهش، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی همدان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، همدان، ایران
- ۶- استادیار پژوهش، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مشهد، ایران
- ۷- محقق، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی قزوین، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، قزوین، ایران
- ۸- محقق، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مشهد، ایران
- ۹- محقق، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی فارس، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، شیراز، ایران
- ۱۰- محقق، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی آذربایجان شرقی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تبریز، ایران
- ۱۱- محقق، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان مرکزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اراک، ایران

چکیده جامع

مقدمه: برهمکنش ژنوتیپ × محیط یکی از مسائل پیچیده در برنامه‌های به‌نژادی گیاهان برای تهیه ژنوتیپ‌های با عملکرد بالا و پایدار است که قبل از آزادسازی رقم‌های جدید طی آزمایش‌های چندناحیه‌ای ارزیابی می‌شود. وجود برهمکنش ژنوتیپ × محیط باعث می‌شود که عملکرد ارقام تحت تاثیر محیط قرار گیرد و منجر به تفاوت عملکرد ارقام در محیط‌های مختلف شود. در میان روش‌های چند متغیره، مدل‌های AMMI و GGE-Biplot از اهمیت بالایی برخوردار هستند و قدرت تفکیک بالایی در شناسایی ژنوتیپ‌های پایدار و با عملکرد بالا دارند. هدف از این مطالعه، ارزیابی پایداری ژنوتیپ‌های امیدبخش گندم نان و شناسایی ژنوتیپ‌های پایدار و با عملکرد بالا در اقلیم سرد کشور بود.

مواد و روش‌ها: تعداد ۱۴ لاین گندم آبی با تیپ رشد زمستانه و بینابین (Facultative) به‌همراه ارقام شاهد میهن، حیدری، زرینه و زارع (جمعاً ۱۸ ژنوتیپ) در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در ایستگاه‌های تحقیقاتی کرج، همدان، مشهد، جلگه رخ، میان‌دوآب، اردبیل، اراک، اقلید، تبریز و قزوین بررسی شدند. برای تجزیه داده‌ها ابتدا تجزیه واریانس ساده در هر سال و مکان و سپس تجزیه واریانس مرکب برای عملکرد دانه پس از تایید همگنی واریانس خطاهای آزمایشی انجام شد.

برای بررسی پایداری ژنوتیپ‌های مورد مطالعه نیز از دو روش AMMI و GGE-Biplot استفاده شد. همچنین، پارامترهای پایداری AMMI و شاخص‌های انتخاب هم‌زمان بر مبنای این پارامترها محاسبه شدند.

یافته‌های تحقیق: نتایج تجزیه مرکب نشان داد که اثرات اصلی محیط و ژنوتیپ و برهمکنش ژنوتیپ × محیط به ترتیب ۴۷/۲، ۹/۸ و ۲۸/۳ درصد از مجموع مربعات کل داده‌ها را توجیه کردند. ژنوتیپ‌های G7، G8، G12، G2 و G1 به ترتیب بیش‌ترین و ژنوتیپ‌های G15، G18، G10، G13، G14 و G16 کم‌ترین مقدار عملکرد دانه را در بین ژنوتیپ‌های مورد بررسی دارا بودند. نتایج تجزیه AMMI وجود اختلاف معنی‌دار میان محیط‌ها، ژنوتیپ‌ها و برهمکنش بین آن‌ها را نشان داد. در این روش، ۱۲ مؤلفه اصلی معنی‌دار با توجیه ۹۸ درصد از واریانس برهمکنش ژنوتیپ × محیط شناسایی شد و دو مؤلفه اصلی اول و دوم ۴۶/۲۷ درصد از تغییرات برهمکنش را تبیین کردند. بر اساس بای‌پلات AMMI1، ژنوتیپ‌های G1، G3، G8 و G4 و محیط‌های E9 و E5 با داشتن عملکرد دانه بسیار بالاتر از میانگین و مقدار بسیار پایین مؤلفه اول، به‌عنوان پایدارترین ژنوتیپ‌ها و محیط‌ها شناخته شدند. بای‌پلات AMMI2 ژنوتیپ خاصی را به‌عنوان ژنوتیپ با سازگاری عمومی شناسایی نکرد، با این حال ژنوتیپ‌های G3 و G4 تا حدودی نسبت به بقیه سازگاری عمومی بهتری را نشان دادند. بر اساس شاخص‌های انتخاب هم‌زمان مبتنی بر پارامترهای AMMI به ترتیب ژنوتیپ‌های G8، G12، G1، G4 و G3 با کم‌ترین مجموع رتبه، به‌عنوان ژنوتیپ‌های پایدار و با عملکرد بالا انتخاب شدند. نتایج روش GGE-Biplot بر اساس بای‌پلات میانگین عملکرد و پایداری، ژنوتیپ‌های G8، G4، G3 و سپس G1 که دارای عملکرد دانه بالاتر از میانگین ژنوتیپ‌ها بودند را به‌عنوان پایدارترین ژنوتیپ‌ها معرفی کرد. بای‌پلات الگوی کدام-برتر-کجا، ژنوتیپ‌ها و محیط‌ها را به ترتیب به پنج و سه گروه تفکیک کرد. بر این اساس، ژنوتیپ‌های G12، G11، G3 و G4 در کرج و میاندوآب و ژنوتیپ‌های G5، G7 و G8 در جلگه رخ و مشهد در هر دو سال سازگاری بهتری را نشان دادند. با توجه به بای‌پلات رتبه‌بندی ژنوتیپ‌ها، ژنوتیپ ایده‌آلی وجود نداشت، ولی ژنوتیپ‌های G8، G3، G5، G7 و G4 با کم‌ترین فاصله از ژنوتیپ ایده‌آل فرضی به‌عنوان برترین ژنوتیپ‌ها شناسایی شدند.

نتیجه‌گیری: نتایج این مطالعه نشان داد که تفاوت اندکی بین دو روش AMMI و GGE-Biplot وجود دارد و هر دو روش تا حدودی ژنوتیپ‌های یکسانی را به‌عنوان ژنوتیپ‌های برتر معرفی کردند. ولی انتخاب ژنوتیپ‌ها بر مبنای شاخص‌های انتخاب هم‌زمان مبتنی بر پارامترهای تجزیه AMMI به دلیل در بر گرفتن تمامی مؤلفه‌های معنی‌دار در محاسبه این پارامترها منطقی‌تر است. بنابراین بر مبنای شاخص‌های انتخاب هم‌زمان، ژنوتیپ‌های G8، G12، G1، G4 و G3 که دارای کم‌ترین مجموع رتبه بودند، به‌عنوان ژنوتیپ‌های پایدار و با عملکرد بالا معرفی می‌شوند.

واژه‌های کلیدی: آزمایش‌های چند ناحیه‌ای، پایداری، سازگاری، شاخص انتخاب هم‌زمان

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۱۸

نحوه استناد به این مقاله:

امینی، اشکبوس، اسدی، علی‌اکبر، رضایی مراد اعلی، محمد، قاسمی کلخوران، معرفت، چایچی، مهرداد، عزت احمدی، مسعود، حسینی بای، سید کریم، محمودی پیراهنی، علی‌اکبر، صالحی، پرویز، میرفخرایی، نادر، بابایی، تقی، و غدیری، عادل. (۱۴۰۳). مطالعه برهمکنش ژنوتیپ × محیط در ژنوتیپ‌های امیدبخش گندم نان در اقلیم سرد با استفاده از روش‌های AMMI و GGE-Biplot. *تحقیقات غلات*، ۱۴(۱)، ۹۹-۱۲۴. doi: [10.22124/CR.2024.27052.1819](https://doi.org/10.22124/CR.2024.27052.1819)

مقدمه

گزارش‌ها نشان می‌دهند که اگرچه سطح زیر کشت گندم در سال‌های اخیر کاهش یافته است، اما میزان تولید افزایش نشان می‌دهد (FAO, 2022). این افزایش تولید ناشی از افزایش عملکرد در واحد سطح می‌باشد و افزایش عملکرد در واحد سطح نیز بنا به نظر بسیاری از محققین دلایل متعددی مانند معرفی ارقام با عملکرد بالا، کودپذیری، مقاوم به تنش‌های زیستی و غیر زیستی، بهبود روش‌های به‌زرایی و سیاست‌های تشویقی و حمایتی دولت‌ها دارد (Jalal Kamali *et al.*, 2012).

برای ارزیابی پایداری و سازگاری ارقام در برنامه‌های به‌نژادی، اطلاعات ارزش‌مندی از اثرات محیط بر عملکرد، ویژگی‌های زراعی رقم‌ها و در نهایت معرفی رقم‌های پایدار با عملکرد بالا به‌دست می‌آید (Maleia *et al.*, 2017). اگرچه بیش‌تر صفات گیاهی به‌ویژه عملکرد تابع عوامل محیطی هستند، اما به‌نژادگران سعی می‌کنند واریته‌های با عملکرد بالا و پایدار را معرفی کنند. برهمکنش ژنوتیپ × محیط (GEI, Genotype Environment Interaction) موجب پیچیده شدن ارزیابی و کاهش بازده ناشی از انتخاب ژنوتیپ‌ها در برنامه‌های به‌نژادی می‌شود و از این‌رو مطالعه برهمکنش GE کاملاً ضروری است (Mostafavi *et al.*, 2014; Carvalho *et al.*, 2015). اگرچه برهمکنش GE یکی از مسائل پیچیده در برنامه‌های به‌نژادی گیاهان زراعی برای تهیه ژنوتیپ‌های با عملکرد بالا و پایدار است (Gauch, 2006)، اما اطلاعات حاصل از آن کمک می‌کند تا ژنوتیپ‌های با عملکرد بالا و پایدار با دقت بیش‌تری ارزیابی و انتخاب شوند (Roy, 2000). برای این منظور، قبل از آزادسازی یک رقم جدید، اثرات اصلی ژنوتیپ و محیط و برهمکنش ژنوتیپ × محیط طی آزمایش‌های چند ناحیه‌ای ارزیابی می‌شود تا ضمن شناسایی ژنوتیپ‌های پایدار و سازگار، ژنوتیپ برتر برای هر منطقه گزینش شوند. ژنوتیپ‌های پایدار، واکنش مشابهی را در محیط‌های مختلف نشان می‌دهند (Karadavut *et al.*, 2010)، اما برهمکنش GE باعث می‌شود که عملکرد ژنوتیپ‌ها تحت تاثیر محیط قرار گیرد و منجر به تفاوت عملکرد آن‌ها در محیط‌های مختلف شود (Scapim *et al.*, 2000).

مطالعه برهمکنش GE نیازمند روش‌های آماری دقیق و قدرت‌مندی است. روش‌های متفاوتی جهت ارزیابی برهمکنش GE به‌وسیله محققین مختلف ارائه شده است

که به دو گروه تک‌متغیره و چندمتغیره تقسیم می‌شوند. در میان روش‌های چندمتغیره، دو مدل AMMI (Gauch & Yan & Tinker, 1997) و GGE-Biplot (Zobel, 1997) از اهمیت بالاتری برخوردار هستند. روش AMMI (Additive Main Effects and Multiplicative Interaction) در واقع ترکیبی از مدل تجزیه واریانس و تجزیه به مؤلفه‌های اصلی است. بخش اول مدل AMMI یعنی بخش جمع‌پذیر از تجزیه واریانس استفاده می‌کند، در حالی که در بخش دوم که قسمت ضرب‌پذیر مدل AMMI را شامل می‌شود، از روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی جهت تجزیه برهمکنش GE به یک تا n مؤلفه اصلی استفاده می‌شود (Gauch & Zobel, 1997). دلیل استفاده گسترده از این مدل، قدرت تفکیک بالای اثرات اصلی و برهمکنش GE و نیز توجیه بخش بزرگی از مجموع مربعات این برهمکنش می‌باشد (Ebdon & Gauch, 2002). روش AMMI جهت طراحی برنامه‌های اصلاحی مانند سازگاری خصوصی و انتخاب محیط مناسب استفاده می‌شود (Gauch & Zobel, 1997). تراکانوواس و روزگاس (Tarakanovas & Ruzgas, 2006) روش AMMI را به‌عنوان روشی مؤثر برای مطالعه برهمکنش GE معرفی کردند و بیان داشتند که بای‌پلات حاصل از آن می‌تواند ژنوتیپ‌های مناسب برای کشت در محیط‌های مختلف و یا شرایط محیطی خاص را مشخص و معرفی کند. طبق نظر محققان (Gauch & Zobel, 1997; Yan & Hunt, 2001)، بهترین حالت جهت بررسی برهمکنش GE در مدل AMMI، داشتن دو مؤلفه اول معنی‌دار است. محققین متعددی از روش تجزیه AMMI در بررسی پایداری و سازگاری ژنوتیپ‌های گندم در محیط‌های مختلف استفاده کرده‌اند (Karimizadeh *et al.*, 2021; Najafi Mirak *et al.*, 2021; Omrani *et al.*, 2022; Amini *et al.*, 2023).

روش GGE-Biplot نیز بر اساس روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی پیشنهاد شده است (Kempton, 1984; Yan *et al.*, 2000; Hongyu *et al.*, 2014). مفهوم GGE (Genotype and Genotype Environment Interaction) از اثرات اصلی ژنوتیپ و برهمکنش GE گرفته شده است (Yan & Kang, 2002). این روش از طریق نمایش گرافیکی برهمکنش GE به محقق کمک می‌کند تا پایداری ژنوتیپ‌ها و ترکیب پایداری با عملکرد ژنوتیپ‌ها را در محیط‌های مختلف را بررسی کند. استفاده

دیسک، دو بار لولر عمود بر هم، کودپاشی و ایجاد فارو (عرض ۶۰ سانتی‌متر) بود. کود پتاسیم از منبع سولفات پتاسیم، کود فسفره از منبع فسفات آمونیم به‌صورت پایه و کود ازته از منبع اوره در دو نوبت پایه و سرک مصرف شد. مساحت کرت‌های آزمایشی شش متر مربع بود. میزان بذر مصرفی بر اساس ۴۵۰ بذر در مترمربع و با در نظر گرفتن وزن هزار دانه برای هر ژنوتیپ تعیین شد. بذرها قبل از کاشت به‌منظور جلوگیری از سیاهک پنهان با قارچ‌کش کاربوکسین تیرام به نسبت دو در هزار ضدعفونی شدند. برای مبارزه با علف‌های هرز پهن‌برگ و باریک‌برگ، مخلوطی از علف‌کش‌های گرانستار و پوماسوپر به‌ترتیب به مقدار ۲۰ گرم و یک لیتر در هکتار در مرحله پنجه‌زنی تا ساقه رفتن استفاده شد.

پس از برداشت و اندازه‌گیری عملکرد دانه هر ژنوتیپ، تجزیه واریانس ساده در هر سال و هر مکان انجام شد. از آزمون‌های بارتلت و F_{max} هارتلی جهت بررسی و اثبات همگنی و یکنواختی واریانس خطاهای آزمایشی استفاده و سپس تجزیه واریانس مرکب عملکرد دانه انجام شد. آزمون F برای منابع تغییرات جدول تجزیه واریانس بر اساس امید ریاضی میانگین مربعات و با فرض تصادفی بودن سال‌ها و مکان‌ها (محیط‌ها) و ثابت بودن ژنوتیپ‌ها انجام شد. برای بررسی پایداری ژنوتیپ‌ها، از روش‌های AMMI و GGE-Biplot استفاده شد. ضمن انجام تجزیه واریانس AMMI، مقادیر مؤلفه‌های اصلی برای هر ژنوتیپ و محیط، استخراج و با ترسیم بای‌پلات‌های مربوطه، سازگاری عمومی و خصوصی ژنوتیپ‌ها تعیین شد (Rodriguez et al., 2007). همچنین، پارامترهای پایداری بر اساس مدل ثابت AMMI شامل آماره پایداری AMMI یا ASV (Purchase et al., 2000)، مجموع نمره‌های محورهای مؤلفه یا SIPC (Sneller et al., 1997)، مقدار ویژه پارامتر پایداری AMMI یا EV (Zobel et al., 1988)، قدر مطلق سهم نسبی مولفه‌های اصلی در اثر متقابل یا ZA (Zali et al., 2012)، پارامتر پایداری مبتنی بر AMMI یا ASTB (Rao & Prabhakaran, 2005)، شاخص پایداری AMMI یا ASI (Jambhulkar et al., 2014)، مقیاس پایداری مبتنی بر مدل AMMI برازش شده یا FA (Raju, 2002)، پارامتر D ژانگ یا DZ (Zhang et al., 1998)، پارامتر D آنیچاریکو یا DA (Annicchiarico, 1997)، شاخص پایداری AMMI تعدیل‌شده یا MASI (Ajay et al., 2018)، ارزش

از این روش امکان بررسی روابط میان محیط‌ها و شناسایی محیط‌های هدف در برنامه‌های اصلاحی را به‌سادگی میسر می‌سازد (Yan et al., 2001). از کاربردهای مهم GGE-Biplot گروه‌بندی محیط‌های هدف در برنامه‌های به‌نژادی محصولات مختلف است. با استفاده از GGE-Biplot محیط‌های مورد بررسی به چندین گروه محیطی که در آن محیط‌ها از نظر واکنش به ژنوتیپ‌ها نسبتاً مشابه عمل می‌کنند، گروه‌بندی می‌شوند (Makumbi et al., 2015). ویژگی منحصر به‌فرد GGE-Biplot این است که به استناد نمودارهای حاصل می‌توان اظهار کرد که کدام ژنوتیپ در کدام محیط از پتانسیل عملکردی بالاتری برخوردار است (Farshadfar et al., 2012). از این روش نیز پژوهش‌گران مختلفی جهت بررسی پایداری و سازگاری ژنوتیپ‌ها در گندم نان و گندم دوروم استفاده کرده‌اند (Koutis et al., 2012; Karimizadeh et al., 2020; Suresh & Bishnoi, 2020; Mahdavi et al., 2022; Saeidnia et al., 2023).

شناسایی ژنوتیپ‌های با عملکرد بالا و پایدار، عموماً مهم‌ترین هدف برنامه‌های به‌نژادی در شرایط متغیر محیطی است. از طرف دیگر، مناسب‌ترین ابزار برای محققین در ارزیابی مواد ژنتیکی مورد مطالعه، به‌کارگیری روش‌های آماری مناسب و تعیین بهترین مدل جهت رسیدن به اهداف برنامه‌های به‌نژادی است. هدف از این آزمایش، تعیین ژنوتیپ‌های پایدار گندم نان حاصل از برنامه‌های به‌نژادی و گزینش ژنوتیپ‌های با عملکرد بالا و پایدار برای محیط‌های مورد مطالعه در اقلیم سرد کشور با استفاده از مدل‌های چند متغیره بود.

مواد و روش‌ها

مواد گیاهی این آزمایش، تعداد ۱۴ لاین گندم آبی (دارای تیپ رشد زمستانه و بینابین منتخب از آزمایش‌های مقایسه عملکرد پیشرفته سراسری اجرا شده در سال زراعی ۹۸-۱۳۹۷ در موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر) بودند که به‌همراه ارقام شاهد میهن، حیدری، زرینه و زارع در مجموع به‌تعداد ۱۸ ژنوتیپ (جدول ۱) بودند که در شرایط آبیاری نرمال در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار طی سال‌های زراعی ۱۳۹۸ تا ۱۴۰۰ در ایستگاه‌های تحقیقاتی کرج، همدان، مشهد، جلگه رخ، میاندوآب، اردبیل، اراک، اقلید، تبریز و قزوین مورد بررسی قرار گرفتند (جدول ۲). عملیات تهیه زمین شامل شخم،

حاصل جمع رتبه ژنوتیپ‌ها بر پایه هر یک از شاخص‌های پایداری AMMI و رتبه میانگین عملکرد ژنوتیپ‌ها در محیط‌ها است (Farshadfar, 2008). همچنین، نمودارهای بای‌پلات روش GGE-Biplot نیز رسم شد. تجزیه واریانس مرکب با استفاده از نرم‌افزار SAS و تجزیه‌های AMMI و GGE-Biplot با استفاده از بسته تجزیه آزمایش‌های چند محیطی به نام Metan (Multi Environment Trial Analysis) در نرم‌افزار R انجام شد (Olivoto, 2019).

پایداری AMMI تعدیل‌شده یا MASV (Zali et al., 2012)، مجموع محیط‌های GEI مطلق مدل‌سازی شده توسط AMMI یا AVAMGE (Zali et al., 2012) و در نهایت بر اساس مدل مختلط، شاخص میانگین وزنی نمرات مطلق یا WAAS (Olivoto, 2019) محاسبه شدند (جدول ۳). پس از محاسبه این پارامترها، شاخص انتخاب هم‌زمان (SSI=Simultaneous Selection Index) نیز برای هر یک از این پارامترها محاسبه شد که

جدول ۱- نام و شجره ژنوتیپ‌های گندم ارزیابی شده در مناطق مختلف اقلیم سرد کشور

Table 1. The names and pedigree of wheat genotypes investigated in different cold climate regions of Iran

Code	Pedigree
G1	Mihan
G2	Heydari
G3	Zarrineh
G4	Zareh
G5	Alvd/4/Ghk"s"/Bow"s ⁹ /"Zhong87/3/Shiroodi
G6	Alvd/4/Ghk"s"/Bow"s ⁹ /"Zhong87/3/Shiroodi
G7	Charger/CMH80A.768/3*Cno79/3/Zrn
G8	Charger/CMH80A.768/3*Cno79/3/Zrn
G9	Spb"s"/K1349/Go/3/Vee"s"/4/Bkt/90-Zhong 87
G10	Shahpasand/Norman
G11	Alvd/4/Ghk"s"/Bow"s"/90Zhong87/3/Shiroodi
G12	Alvd/4/Ghk"s"/Bow"s"/90Zhong87/3/Shiroodi
G13	Alvd/4/Ghk"s"/Bow"s"/90Zhong87/3/Shiroodi
G14	Spb"s"/K1349/Go/3/Vee"s"/4/Bkt/90-Zhong 87
G15	AU/3/MINN//HK/38MA/4/YMH/ERA/5/PMF//CNO/GLL/6/KAUZ//ALTAR 84/AOS/7/TAM 105/3/NE70654/BBY//BOW"S"/4/Century*3/TA2450
G16	GRK79/TUKURU
G17	MV NEMERE
G18	ARS97135-9/O3A-B4//KS06O3A~49

جدول ۲- محیط‌های مورد مطالعه در آزمایش یکنواخت سراسری

Table 2. Studied environments in nationwide uniform test

Code	Environment	Code	Environment	Code	Environment	Code	Environment
E1	Karaj-1 st year	E6	Arak-1 st year	E11	Karaj-2 nd year	E16	Arak-2 nd year
E2	Qazvin-1 st year	E7	Miandoab-1 st year	E12	Qazvin-2 nd year	E17	Miandoab-2 nd year
E3	Eqlid-1 st year	E8	Mashhad-1 st year	E13	Eqlid-2 nd year	E18	Mashhad-2 nd year
E4	Hamedan-1 st year	E9	Jolge rokh-1 st year	E14	Hamedan-2 nd year	E19	Jolge rokh-2 nd year
E5	Ardebil-1 st year	E10	Tabriz-1 st year	E15	Ardebil-2 nd year	E20	Tabriz-2 nd year

نتایج و بحث

نتیجه‌گیری شود که واریانس‌های خطاهای آزمایشی یکنواخت هستند (Valizadeh & Moghaddam, 2010). بنابراین با توجه به معنی‌دار بودن آزمون بارتلت و معنی‌دار نبودن آزمون F_{max} هارتلی می‌توان نتیجه‌گیری کرد که واریانس خطای آزمایشی برای ۲۰ آزمایش انجام شده (۱۰ مکان و دو سال) یکنواخت است و از این‌رو می‌توان تجزیه واریانس مرکب داده‌ها را انجام داد.

ابتدا یکنواختی واریانس خطاهای آزمایشی محاسبه شده برای عملکرد طی دو سال انجام آزمایش در ایستگاه‌های مورد مطالعه با استفاده از آزمون‌های بارتلت و F_{max} هارتلی ارزیابی شد (جدول ۴). بهتر است از چند آزمون برای آزمون غیریکنواختی واریانس‌ها استفاده کرد و در صورت معنی‌دار نبودن حتی یکی از روش‌ها،

جدول ۳- پارامترها، شاخص‌ها و معادلات مورد استفاده برای انتخاب هم‌زمان ژنوتیپ‌ها

Table 3. Parameters, indices and the equations used for the simultaneous selection of genotypes

No.	Equation of AMMI parameter †	No.	Equation of AMMI parameter
(1)	$ASV = \sqrt{\frac{(SSIPCA\ 1)}{(SSIPCA\ 2)}(IPCA\ 1)^2 + (IPCA\ 2)^2}$	(2)	$WAAS_i = \frac{\sum_{k=1}^p IPCA_{ik} \times EP_k }{\sum_{k=1}^p EP_k}$
(3)	$EV = \sum_{n=1}^N \frac{Y_{in}^2}{n}$	(4)	$SIPC = \sum_{n=1}^N \lambda_n^{0.5} Y_{in}$
(5)	$Za = \sum_{n=1}^N \theta_n Y_{in} $	(6)	$ASTB = \sum_{n=1}^N \lambda_n Y_{in}^2$
(7)	$ASI = \sqrt{[PC_1^2 \times \theta_1^2] + [PC_2^2 \times \theta_2^2]}$	(8)	$FA = \sum_{n=1}^N \lambda_n^2 Y_{in}^2$
(9)	$DZ = \sum_{n=1}^N Y_{in}^2$	(10)	$MASI = \sqrt{\sum_{n=1}^N PC_n^2 \times \theta_1^2}$
(11)	$DA = \sqrt{\sum_{n=1}^N (\lambda_n \lambda_{in})^2}$	(12)	$MASV = \sqrt{\sum_{n=1}^{N-1} \left(\frac{SSIPC_n}{SSIPC_{n+1}} \right) \times (PC_n)^2 \times (PC_N)^2}$
(13)	$AVAMGE = \sum_{j=1}^E \sum_{n=1}^N \lambda_n Y_{in} \delta_{jn} $		

† ASV, AMMI stability value; WAAS, weighted average of absolute scores; SIPC, sum of IPCs scores; EV, eigen value stability parameter of AMMI; Za, absolute value of relative contribution of IPCs to the interaction; ASTB, AMMI based stability parameter; ASI, AMMI stability index; FA, stability measure based on fitted AMMI model; DZ, Zhang's D parameter; DA, Annicchiarico's D parameter; MASV, modified AMMI stability index; MASV, modified AMMI stability value; AVAMGE, sum across environments of absolute of GEI modelled by AMMI.

جدول ۴- واریانس خطای آزمایش در محیط‌های مختلف به همراه آزمون‌های F_{max} هارتلی و بارتلت جهت بررسی یکنواختی واریانس‌ها
Table 4. Variance of experimental error in different environments along with the F_{max} Hartley and Bartlett's tests to evaluate the uniformity of variances

Year	Error mean square									
	Karaj	Qazvin	Oghlid	Hamedan	Ardabil	Arak	Miandoab	Mashhad	Jolge-Rokh	Tabriz
First	0.26	0.274	0.272	0.326	0.342	0.325	0.279	0.313	0.201	0.26
Second	0.217	0.392	0.2	0.287	0.376	0.324	0.285	0.382	0.201	0.381

Hartley's $F_{max} = 1.96$ ^{ns}
Bartlett's statistic = 62.485 ^{**}

تجزیه واریانس

(محیط) نیز نشان می‌دهد که ژنوتیپ‌ها در محیط‌های مختلف پاسخ‌های متفاوتی نشان دادند و به عبارت دیگر اختلاف بین ژنوتیپ‌ها از محیطی به محیط دیگر یکسان نبود. در این مورد، علاوه بر تفاوت‌های ژنتیکی بین ژنوتیپ‌ها، تفاوت واکنش آن‌ها نسبت به عوامل جغرافیایی و اقلیمی حاکم بر مناطق مختلف نیز مؤثر بوده است، به طوری که تفاوت بین محیط‌ها را می‌توان به تفاوت‌های اقلیمی، خاک و مدیریت زراعی در سال‌ها و مکان‌های مختلف طی دوره رشد گیاه نسبت داد. واکنش ژنوتیپ‌های مختلف به طور معمول به دلیل پاسخ متفاوت ژن‌ها و یا قدرت تظاهر متفاوت آن‌ها در محیط‌های مختلف است (Jafari & Farshadfar, 2018).

جهت بررسی واکنش ژنوتیپ‌ها در محیط‌های مختلف، تجزیه واریانس مرکب عملکرد دانه ۱۸ ژنوتیپ مطالعه شده در ۱۰ مکان و دو سال با فرض تصادفی بودن سال و مکان و ثابت بودن ژنوتیپ‌ها انجام شد. نتایج نشان داد که اثر ژنوتیپ در سطح احتمال پنج درصد و برهمکنش سال × مکان و ژنوتیپ × سال × مکان در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۵). این امر دلیل بر وجود اختلاف شرایط محیطی در مناطق و سال‌های مورد آزمایش می‌باشد. معنی‌دار شدن اثر سال × مکان تأثیر زیاد آن را در معنی‌دار شدن برهمکنش سه‌جانبه نشان می‌دهد. همچنین، معنی‌دار شدن اثر سه‌جانبه ژنوتیپ × سال × مکان

به‌زادگی گندم نسبت داد (Golkari *et al.*, 2016). بررسی میانگین عملکرد دانه ژنوتیپ‌های گندم نشان داد که ژنوتیپ‌های G7, G8, G12, G2 و G1 به ترتیب بیش‌ترین و ژنوتیپ‌های G15, G18, G10, G13, G14 و G16 کم‌ترین مقدار عملکرد دانه را در بین ژنوتیپ‌های مورد مطالعه داشتند. با توجه به معنی‌دار شدن برهمکنش ژنوتیپ × سال × مکان (ژنوتیپ × محیط) در این آزمایش، صرفاً نمی‌توان بر اساس مقایسه میانگین‌ها، ژنوتیپ‌های با عملکرد دانه بیش‌تر را انتخاب کرد، بلکه لازم است با انجام تجزیه پایداری، ضمن شناسایی ژنوتیپ‌های با عملکرد دانه بالا، ژنوتیپ‌های با نوسانات عملکرد کم‌تر و سازگار با مناطق مختلف تعیین شوند. به این ترتیب، تجزیه پایداری عملکرد دانه ژنوتیپ‌ها با روش‌های AMMI و GGE-Biplot انجام شد تا ژنوتیپ‌های با عملکرد دانه بالاتر و نوسانات عملکرد کم‌تر شناسایی شوند.

اثر اصلی محیط (مجموع اثرات اصلی و برهمکنش) و برهمکنش ژنوتیپ × محیط (مجموع اثرات دوگانه و سه‌گانه) به ترتیب با ۴۷/۲ و ۲۸/۳ درصد، بیش‌ترین سهم را در مجموع مربعات کل مشاهده شده در آزمایش‌ها داشتند (جدول ۵). در مجموع، وقتی اثر محیط زیاد و اثر متقابل کم باشد، می‌توان استنباط کرد که ژنوتیپ‌های مورد بررسی دارای پایداری خوبی هستند (Ehyaei *et al.*, 2022). احیایی و همکاران (Ehyaei *et al.*, 2022) و امینی و همکاران (Amini *et al.*, 2023) در مطالعات خود به این نتیجه رسیدند که محیط بیش‌ترین مقدار از مجموع مربعات کل را به‌خود اختصاص داد که نشان دهنده متنوع بودن محیط‌های آزمایش بود. با توجه به معنی‌دار شدن اثر اصلی ژنوتیپ، سهم اندک ژنوتیپ در مجموع مربعات کل (۹/۸ درصد) را می‌توان به انتخاب مؤثر این ژنوتیپ‌ها در آزمایش‌های مقدماتی در برنامه‌های

جدول ۵- تجزیه واریانس مرکب عملکرد دانه ژنوتیپ‌های گندم نان طی دو سال در ده اقلیم سرد کشور

Table 5. Combined analysis of variance of grain yield of bread wheat genotypes in ten cold climate of Iran during two years

Source of variation	Degree of freedom	Sum of square	Mean square	Percentage of total sum of square
Year	1	142.35	142.35	0.086
Place	9	268.61	29.85	0.162
Year × Place	9	370.61	41.18**	0.224
Replication / (Year × Place)	40	40.3	1.007	0.024
Genotype	17	161.44	9.496*	0.098
Genotype × Year	17	17.14	1.008	0.01
Genotype × Place	153	242.64	1.586	0.147
Genotype × Year × Place	153	209.11	1.367**	0.126
Error	680	200.756	0.295	0.121
CV (%)			7.70	

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

به‌عنوان محیط در نظر گرفته شده‌اند. این اعداد نشان می‌دهند که ژنوتیپ، کم‌ترین میزان تنوع عملکرد دانه را ایجاد کرد که بیانگر تنوع پایین بین ژنوتیپ‌ها است. اثر محیط در تمامی آزمایش‌ها بیش‌تر از دو عامل دیگر بود که به‌دلیل انجام آزمایش در دو سال و تعداد زیاد مکان‌ها بوده و این امر جامعیت دارد، به‌طوری که در تمامی آزمایش‌های چندناحیه‌ای، محیط همیشه یک عامل غالب در منبع تغییرات عملکرد است و اثر ژنوتیپ و ژنوتیپ × محیط نسبتاً کوچک هستند (Gauch & Zobel, 1997). بزرگی اثر محیط بیانگر تنوع محیط‌هاست که باعث ایجاد تفاوت در عملکرد دانه ژنوتیپ‌ها شده است. علاوه بر این

تجزیه AMMI

نتایج حاصل از تجزیه واریانس بر اساس مدل AMMI (جدول ۶) نشان داد که میانگین مربعات اثرات اصلی ژنوتیپ و محیط و برهمکنش ژنوتیپ × محیط در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. این موضوع نشان‌دهنده وجود تنوع میان ژنوتیپ‌ها، محیط‌ها و برهمکنش بین آن‌ها می‌باشد. همچنین، محیط، ژنوتیپ و برهمکنش ژنوتیپ × محیط به ترتیب ۳۶/۸، ۷/۶ و ۲۲/۱ درصد از مجموع مربعات کل عملکرد دانه را توجیه کردند. دلیل تفاوت بین جدول‌های ۵ و ۶ از نظر درصد واریانس توجیه شده این است که در تجزیه AMMI، مکان و سال با هم

ژنوتیپ‌های با مقادیر نزدیک به صفر برهمکنش کم‌تری دارند. نتایج نشان داد که کم‌ترین مقدار IPCA1 مربوط به ژنوتیپ‌های G16، G15، G8، G3 و G1 بود. از بین این ژنوتیپ‌ها، ژنوتیپ‌های G1 و G3 عملکرد دانه بالاتری از میانگین کل عملکرد نشان دادند (جدول ۷)، و به همین دلیل می‌توانند به‌عنوان ژنوتیپ‌های پایدار و با سازگاری عمومی بالا معرفی شوند. از آنجایی که در این مطالعه، مؤلفه اصلی اول ۳۰/۷ درصد از مجموع مربعات کل را تبیین کرد، از این‌رو از مؤلفه اصلی دوم (IPC2) با تبیین ۱۵/۶ درصد از واریانس کل نیز استفاده شد. ژنوتیپ‌های G5، G16، G9، G6 و G7 دارای بیش‌ترین ژنوتیپ‌های G13، G4، G10، G17 و G3 دارای کم‌ترین مقادیر مؤلفه اصلی دوم بودند و بنابراین تنها ژنوتیپ G3 را می‌توان به‌عنوان ژنوتیپ پایدار معرفی کرد. البته با توجه به کم بودن مقدار مؤلفه دوم ژنوتیپ G8، می‌توان این ژنوتیپ را نیز تا حدودی پایدار معرفی کرد. از طرفی، هر دو ژنوتیپ فوق، عملکرد بالاتری از میانگین کل دارند و بنابراین می‌توانند به‌عنوان ژنوتیپ‌های پایدار و با عملکرد بالا در تمامی محیط‌ها معرفی شوند.

نتایج، تفکیک بخش ضرب‌پذیر تنوع کل عملکرد دانه (برهمکنش ژنوتیپ × محیط) بر اساس مدل AMMI به مؤلفه‌های اصلی نشان داد که ۱۲ مؤلفه اصلی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بودند و ۹۸ درصد از تغییرات برهمکنش را توجیه کردند. دو مؤلفه اصلی اول و دوم در مجموع ۴۶/۲۷ درصد از تغییرات مربوط به برهمکنش ژنوتیپ × محیط را تبیین کردند. مجموع مربعات باقیمانده نیز با توصیف فقط دو درصد از تنوع کل، دارای کم‌ترین میانگین مربعات غیرمعنی‌دار در مدل AMMI بود.

ضرایب دو مؤلفه اول برهمکنش به‌عنوان ساده‌ترین پارامترهای پایداری جهت انتخاب ژنوتیپ‌ها قبلاً مورد استفاده قرار گرفته است (Annicchiarico, 1997; Purchase et al., 2000). گراس گروبر و همکاران (Grausgruber et al., 2000) در گندم نان و طاهریان و همکاران (Taherian et al., 2019) در جو از ضرایب مؤلفه‌های اصلی برهمکنش (IPCA) جهت گزینش ژنوتیپ‌های پایدار استفاده کردند. ژنوتیپ‌های دارای مقادیر بزرگ (مثبت یا منفی) مؤلفه اصلی اول (IPCA1)، برهمکنش بالایی با محیط نشان می‌دهند و در مقابل،

جدول ۶- تجزیه واریانس عملکرد دانه ژنوتیپ‌های گندم نان طی دو سال در ده اقلیم سرد کشور به‌روش AMMI

Table 6. Analysis of variance of grain yield of bread wheat genotypes during two years in ten cold climate of Iran using AMMI method

Source of variation	Degree of freedom	Sum of square	Mean square	Percentage of total sum of square
Environment (ENV)	19	781.57	41.13**	36.8
Replication / En	40	40.3	1.01	-
Genotype (GEN)	17	161.43	9.49**	7.6
GEN × ENV	323	468.89	1.452**	22.1
PC1	35	143.97	4.11**	30.67
PC2	33	73.34	2.22**	15.6
PC3	31	53.92	1.74**	11.5
PC4	29	42.75	1.47**	9.1
PC5	27	31.75	1.18**	6.8
PC6	25	28.03	1.12**	6
PC7	23	22.73	0.99**	4.8
PC8	21	17.28	0.82**	3.7
PC9	19	15.71	0.82**	3.4
PC10	17	11.58	0.68**	2.5
PC11	15	9.86	0.66**	2.1
PC12	13	8.56	0.66**	1.8
Noise	35	8.613	0.25	-
Residual	680	200.77	0.29	-

** Significant at 1% probability level.

جدول ۷- عملکرد و مؤلفه‌های اصلی اول تا دهم برای ژنوتیپ‌ها و محیط‌های مورد بررسی

Table 7. Yield and main components from the first to the tenth for the studied genotypes and environments

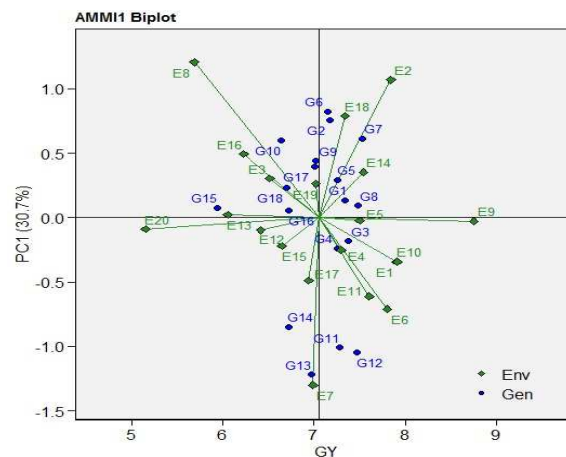
Genotype / Environment	Grain yield	IPCA1	IPCA2	IPCA3	IPCA4	IPCA5	IPCA6	IPCA7	IPCA8	IPCA9	IPCA10
G1	7.338	0.136	-0.560	0.398	0.346	0.081	-0.409	0.248	-0.224	0.114	-0.534
G2	7.174	0.760	-0.269	-0.478	0.278	-0.060	-0.181	0.071	0.787	-0.224	0.399
G3	7.36	-0.108	0.179	1.032	0.097	-0.480	0.309	0.266	0.114	0.69	0.049
G4	7.258	-0.236	-0.118	0.756	-0.097	0.153	0.423	-0.288	-0.187	-0.73	-0.088
G5	7.254	0.293	1.085	-0.49	0.346	0.045	0.193	0.491	-0.318	0.015	0.435
G6	7.145	0.826	0.741	0.083	1.163	-0.066	0.118	-0.128	-0.056	-0.100	-0.442
G7	7.525	0.616	0.657	0.595	-0.724	0.752	-0.611	0.146	0.179	-0.289	0.059
G8	7.483	0.093	0.371	-0.108	-0.737	-0.64	0.124	-0.126	0.501	-0.312	-0.088
G9	7.021	0.442	-0.802	0.302	-0.087	-0.238	0.899	0.095	-0.270	-0.286	0.408
G10	6.635	0.602	-0.125	-0.25	-0.526	-0.427	-0.446	-0.292	-0.609	0.509	0.257
G11	7.280	-1.007	-0.424	-0.079	0.081	-0.049	-0.204	0.774	0.479	-0.012	-0.254
G12	7.467	-1.044	0.559	-0.428	-0.314	-0.509	0.046	0.362	-0.226	-0.048	-0.810
G13	6.974	-1.219	0.035	0.284	0.205	0.797	0.018	-0.152	-0.396	-0.148	0.289
G14	6.718	-0.846	0.317	0.231	0.253	-0.067	-0.123	-1.110	0.425	0.317	0.144
G15	5.941	0.077	-0.491	0.179	0.091	-0.314	-0.859	-0.046	-0.402	-0.250	0.047
G16	6.719	0.056	-0.814	-0.427	0.421	0.199	-0.089	-0.027	0.203	0.170	0.351
G17	7.012	0.397	-0.128	-0.083	-0.502	0.853	0.485	0.096	0.120	0.678	-0.220
G18	6.699	0.235	-0.212	-0.95	-0.295	-0.029	0.306	-0.382	-0.120	-0.096	-0.722
E1	7.903	-0.344	0.859	-0.865	-0.289	-0.503	0.445	-0.08	0.395	0.473	-0.123
E2	7.842	1.069	-0.892	0.304	0.507	0.043	-0.204	0.065	0.084	0.197	-0.382
E3	6.512	0.304	0.559	-0.228	0.607	0.15	0.213	0.075	-0.410	-0.184	-0.203
E4	7.296	-0.251	0.256	0.749	0.174	-0.105	0.165	0.312	0.213	-0.791	-0.326
E5	7.502	-0.023	-0.171	0.918	-0.761	0.719	0.349	-0.097	0.383	0.408	-0.169
E6	7.803	-0.710	0.100	0.384	0.471	-0.139	-0.544	0.119	-0.277	0.583	-0.270
E7	6.987	-1.300	0.029	0.135	0.325	0.517	0.786	-0.247	-0.268	-0.026	0.110
E8	5.686	1.208	0.26	-0.099	-0.355	0.123	0.411	-0.026	0.094	-0.244	-0.049
E9	8.753	-0.028	0.335	-0.269	0.319	0.514	-0.910	0.587	-0.163	0.131	0.005
E10	7.914	-0.341	-0.877	-1.079	-0.450	0.462	-0.106	0.124	0.202	-0.449	-0.311
E11	7.603	-0.611	-0.546	-0.056	-0.396	0.129	-0.449	0.373	0.066	0.002	0.718
E12	6.412	-0.097	-0.274	-0.414	0.213	-0.099	-0.020	0.231	-0.272	0.219	-0.300
E13	6.054	0.024	-0.147	-0.221	0.095	-0.124	-0.479	-0.385	-0.167	-0.254	0.194
E14	7.453	0.354	-0.23	0.207	0.455	-0.101	0.336	-0.001	0.136	0.172	0.733
E15	6.648	-0.220	0.532	0.036	0.460	0.209	-0.614	-0.908	0.575	-0.329	0.076
E16	6.227	0.494	-0.386	-0.122	-0.321	-0.970	0.120	-0.894	-0.482	0.319	-0.273
E17	6.940	-0.489	-0.689	0.266	-0.035	-1.210	0.401	0.029	0.149	-0.217	-0.700
E18	7.341	0.789	0.279	-0.076	0.043	-0.053	0.167	0.298	-0.237	-0.167	0.494
E19	7.017	0.262	0.432	0.012	-0.085	-0.189	-0.392	0.365	0.655	0.345	-0.028
E20	5.152	-0.089	0.658	0.416	-0.977	-0.244	-0.494	0.062	-0.675	-0.188	-0.071

داشتن عملکرد دانه بسیار بالاتر از میانگین و مقدار بسیار کم مؤلفه اول به‌عنوان پایدارترین ژنوتیپ‌ها و محیط‌ها شناخته شدند. همچنین، اگر ژنوتیپ و محیطی از لحاظ مؤلفه اصلی اول برهمکنش (IPCA1) هم‌علامت باشند، برهمکنش مثبت و اگر هم‌علامت نباشند، برهمکنش منفی دارند. بر این اساس، محیط‌های E2، E14 و E18 با عملکرد دانه بالاتر از میانگین کل دارای برهمکنش مثبت با ژنوتیپ‌های G1، G7، G8، G1 و G5 و برهمکنش منفی با ژنوتیپ‌های G3، G4، G11 و G12 بودند.

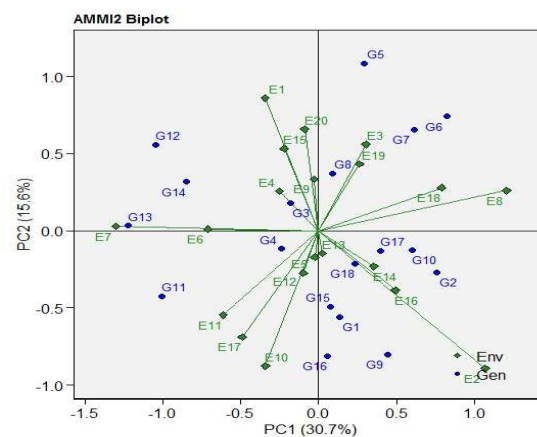
بای‌پلات AMMI1 یا میانگین عملکرد دانه در مقابل اولین مؤلفه اصلی برهمکنش ژنوتیپ × محیط (IPCA1) در شکل ۱ ارائه شده است. اگر یک ژنوتیپ یا محیط از نظر عملکرد دانه (محور افقی)، مقدار بیش‌تر و از نظر مؤلفه اول برهمکنش (محور عمودی)، مقدار کم‌تری (نزدیک به صفر) داشته باشد، ژنوتیپ یا محیط مناسب‌تری در مقایسه با سایر ژنوتیپ‌ها یا محیط‌ها خواهد بود (Khomari *et al.*, 2018). بر این اساس، ژنوتیپ‌های G3، G8، G1 و G4 و محیط‌های E9 و E5 به‌دلیل

محیط‌های مورد مطالعه نیز بر اساس مؤلفه‌های اول و دوم برهمکنش ژنوتیپ × محیط نزدیک به مبدأ مختصات واقع نشدند که نشان می‌دهد محیط‌های مورد مطالعه پتانسیل ایجاد برهمکنش را دارند. در مقابل، ژنوتیپ‌هایی که دور از مرکز بای‌پلات قرار گرفته‌اند، به‌ویژه آن‌هایی که در رأس چندضلعی این بای‌پلات قرار دارند، از پایداری عملکرد ضعیفی برخوردار بودند، ولی دارای سازگاری خصوصی با مکان‌هایی هستند که کم‌ترین زاویه را با بردار آن‌ها در بای‌پلات دارند (Gauch & Zobel, 1997). بر این اساس، می‌توان به سازگاری ژنوتیپ‌های G6، G7 و G8 با محیط‌های E3 و E19، ژنوتیپ‌های G2، G10، G17 و G18 با محیط‌های E2، E14 و E16 و ژنوتیپ G13 با محیط E7 اشاره کرد.

نمودار بای‌پلات مقادیر مؤلفه‌های اصلی اول و دوم برهمکنش برای ژنوتیپ‌ها و محیط‌ها در شکل ۲ ارائه شده است. این بای‌پلات در کل ۴۶/۳ درصد از تغییرات مربوط به اثر ضرب‌پذیر را تبیین می‌کند. بر اساس این نمودار، ژنوتیپ‌هایی که در مجاورت یک مکان قرار دارند، دارای سازگاری خصوصی با آن محیط و ژنوتیپ‌های نزدیک به مبدأ مختصات دارای سازگاری عمومی هستند. بر این اساس، هیچ‌یک از ژنوتیپ‌ها را به دلیل عدم نزدیکی با مبدأ مختصات نمی‌توان به‌عنوان ژنوتیپ با سازگاری عمومی معرفی کرد. با این حال، ژنوتیپ‌های G3 و G4 تا حدودی سازگاری عمومی بهتری نسبت به سایر ژنوتیپ‌ها نشان دادند و چون عملکرد بالاتری نسبت به میانگین کل داشتند، بنابراین می‌توانند قابل توصیه باشند. هیچ‌کدام از



شکل ۱- پراکنش ژنوتیپ‌ها و محیط‌های مورد مطالعه با استفاده از میانگین عملکرد و مؤلفه اصلی اول برهمکنش بر اساس مدل AMMI1
Figure 1. Distribution chart of the studied genotypes and environments using the average yield and first principal component of G×E interaction based on AMMI1 model



شکل ۲- پراکنش ژنوتیپ‌ها و محیط‌های مورد مطالعه با استفاده از اولین و دومین مؤلفه اصلی برهمکنش بر اساس مدل AMMI2
Figure 2. Distribution of the studied genotypes and environments using the first and second principal components of G×E interaction based on AMMI2 model

شاخص‌های پایداری مبتنی بر تجزیه AMMI و شاخص انتخاب هم‌زمان

محمدی و امری (Mohammadi & Amri, 2013)

از پارامترهای پایداری AMMI برای انتخاب ژنوتیپ‌های گندم دوروم استفاده کردند و بیان داشتند که این پارامترها در انتخاب ژنوتیپ‌های پایدار از کارایی لازم برخوردار هستند. نتایج این آزمایش (جدول ۸) نشان داد که بر مبنای شاخص ASV، ژنوتیپ‌های G3، G8، G4، G18 و G15 به‌عنوان پایدارترین ژنوتیپ‌ها بودند. پژوهش‌گران دیگری نیز از این شاخص برای تجزیه پایداری استفاده کرده‌اند (Danyali, et al., 2012; Pouresmael et al., 2019; Chimdesa et al., 2018). از آنجایی که در محاسبه شاخص WAAS همه مؤلفه‌های اصلی معنی‌دار استفاده می‌شوند، به‌نظر می‌رسد که این شاخص برتر از شاخص‌های دیگر تجزیه AMMI است و ژنوتیپ‌های پایدار شناسایی شده با این شاخص دارای اعتبار بیشتری هستند (Olivoto et al., 2019). بر پایه این شاخص، ژنوتیپ‌های G15، G8، G4، G16، G1 و به‌عنوان پایدارترین ژنوتیپ‌ها انتخاب شدند. همچنین، ژنوتیپ‌های G16، G4، G12، G8، G15 بر اساس شاخص SIPC، ژنوتیپ‌های G15، G8، G16، G4، G1 بر اساس شاخص ZA، ژنوتیپ‌های G16، G12، G4، G8 و G5 بر اساس شاخص EV، ژنوتیپ‌های G16، G4، G1، G87 و G15 بر اساس شاخص ASTB، ژنوتیپ‌های G3، G8، G4، G18 و G15 بر اساس شاخص ASI، ژنوتیپ‌های

G4، G1، G16، G15 و G8 بر اساس شاخص FA، ژنوتیپ‌های G16، G12، G4، G8 و G5 بر اساس شاخص DZ، ژنوتیپ‌های G4، G1، G16، G8 و G15 بر اساس شاخص DA، ژنوتیپ‌های G15، G8، G1، G4 و G18 بر اساس شاخص MASI، ژنوتیپ‌های G16، G1، G4، G8، G15 بر اساس شاخص MASV و ژنوتیپ‌های G1، G15، G4، G16 و G17 بر اساس شاخص AVAMGE به‌عنوان پایدارترین ژنوتیپ‌ها انتخاب شدند (جدول‌های ۸ و ۹). با توجه به رتبه‌بندی ژنوتیپ‌ها بر اساس پارامترهای پایداری (جدول ۹) مشاهده می‌شود که پارامترهای ASI و ASV، EV و DZ و FA و DA رتبه‌بندی یکسانی را نشان دادند و بنابراین می‌توان برخی از این پارامترها را حذف کرد.

تجزیه پایداری عملکرد به‌تنهایی ممکن است سودمند نباشد. در عمل رقم‌های پایدار در صورتی با استقبال کشاورزان مواجه می‌شوند که دارای عملکرد دانه بالایی نیز باشند. از این‌رو، به‌طور معمول شاخص‌های پایداری در کنار عملکرد دانه ارزیابی می‌شوند تا ژنوتیپ‌های پایدار و با عملکرد دانه بالا گزینش شوند. انتخاب ژنوتیپ‌های برتر با هر یک از شاخص‌های پایداری ذکر شده، فقط بر پایه جنبه پایداری ژنوتیپ‌ها و بدون در نظر گرفتن عملکرد دانه استوار است. به‌همین دلیل، ژنوتیپ‌های G15، G18، G10، G14 و G16 با عملکرد کم‌تر از متوسط عملکرد همه ژنوتیپ‌ها در کلیه محیط‌ها (۷/۰۵۵ کیلوگرم در هکتار) به‌عنوان ژنوتیپ‌های پایدار گزینش شده‌اند.

جدول ۸- شاخص‌های پایداری محاسبه‌شده برای ژنوتیپ‌های گندم نان مورد مطالعه

Table 8. Stability indices calculated for the studied bread wheat genotypes

Genotype	Yield	ASTAB	ASI	ASV	AVAMGE	DA	DZ	EV	FA	MASI	MASV	SIPC	ZA	WAAS
G1	7.338	1.77	0.097	0.621	6.99	2.28	0.852	0.061	5.19	0.117	1.6	3.91	0.147	0.296
G2	7.174	1.99	0.237	1.52	9.61	2.82	0.801	0.054	7.96	0.247	2.05	4.08	0.197	0.441
G3	7.36	2.29	0.062	0.399	9.43	2.79	0.869	0.063	7.77	0.143	1.92	4.09	0.162	0.324
G4	7.258	1.51	0.075	0.479	7.57	2.26	0.704	0.041	5.09	0.122	1.63	3.08	0.134	0.276
G5	7.254	2.28	0.192	1.23	11.6	3.07	0.791	0.052	9.44	0.205	2.02	4.05	0.197	0.424
G6	7.145	3.13	0.279	1.78	12.8	3.69	0.923	0.071	13.6	0.299	2.61	4.47	0.24	0.544
G7	7.525	2.77	0.215	1.38	12.2	3.4	0.849	0.06	11.6	0.244	2.3	4.68	0.251	0.55
G8	7.483	1.74	0.065	0.414	8.88	2.35	0.775	0.05	5.54	0.107	1.63	3.79	0.14	0.273
G9	7.021	2.18	0.185	1.18	10.5	2.90	0.804	0.054	8.4	0.197	1.98	4.13	0.196	0.422
G10	6.635	2.17	0.186	1.19	9.53	2.73	0.872	0.063	7.48	0.201	2.03	4.6	0.197	0.417
G11	7.28	2.49	0.316	2.02	12.6	3.32	0.864	0.062	11	0.32	2.47	4.18	0.215	0.495
G12	7.467	2.14	0.332	2.12	11.9	3.41	0.667	0.037	11.6	0.339	2.43	3.67	0.24	0.565
G13	6.974	2.68	0.374	2.39	12.1	3.71	0.808	0.054	13.8	0.381	2.7	4.04	0.23	0.541
G14	6.718	2.52	0.264	1.69	11.0	3.18	0.87	0.063	10.1	0.273	2.4	4.08	0.208	0.468
G15	5.941	1.92	0.080	0.514	7.47	2.35	0.867	0.063	5.52	0.103	1.66	3.82	0.132	0.255
G16	6.719	1.31	0.128	0.821	7.69	2.32	0.598	0.03	5.39	0.144	1.5	3.03	0.138	0.285
G17	7.012	2.05	0.124	0.79	8.65	2.58	0.837	0.058	6.65	0.149	1.86	3.93	0.162	0.335
G18	6.699	2.16	0.079	0.508	10.1	2.65	0.876	0.064	7.04	0.142	1.85	3.93	0.159	0.324

جدول ۹- رتبه شاخص‌های پایداری محاسبه‌شده برای ژنوتیپ‌های گندم نان مورد مطالعه

Table 9. The rank of stability indices calculated for the studied bread wheat genotypes

Genotype	Yield	ASTAB	ASI	ASV	AVAMGE	DA	DZ	EV	FA	MASI	MASV	SIPC	ZA	WAAS
G1	5	4	6	6	1	2	11	11	2	3	2	6	5	5
G2	9	6	13	13	9	10	6	6	10	13	12	11	10	12
G3	4	13	1	1	7	9	14	13	9	6	8	13	7	6
G4	7	2	3	3	3	1	3	3	1	4	3	2	2	3
G5	8	12	11	11	13	12	5	5	12	11	10	10	11	11
G6	10	18	15	15	18	17	18	18	17	15	17	16	16	16
G7	1	17	12	12	16	15	10	10	15	12	13	18	18	17
G8	2	3	2	2	6	4	4	4	5	2	4	4	4	2
G9	11	11	9	9	11	11	7	7	11	9	9	14	9	10
G10	17	10	10	10	8	8	16	14	8	10	11	17	12	9
G11	6	14	16	16	17	14	12	12	14	16	16	15	14	14
G12	3	8	17	17	14	16	2	2	16	17	15	3	17	18
G13	13	16	18	18	15	18	8	8	18	18	18	9	15	15
G14	15	15	14	14	12	13	15	15	13	14	14	12	13	13
G15	18	5	5	5	2	5	13	16	4	1	5	5	1	1
G16	14	1	8	8	4	3	1	1	3	7	1	1	3	4
G17	12	7	7	7	5	6	9	9	6	8	7	7	8	8
G18	16	9	4	4	10	7	17	17	7	5	6	8	6	7

سه رتبه دوم)، G12 (دو رتبه اول، یک رتبه دوم و یک رتبه چهارم)، G1 (یک رتبه اول، شش رتبه دوم، یک رتبه سوم و سه رتبه سوم)، G4 (یک رتبه اول، ۱۰ رتبه سوم و دو رتبه چهارم)، G3 (دو رتبه دوم، دو رتبه سوم و پنج رتبه چهارم) و G7 (دو رتبه چهارم و هشت رتبه پنجم) دارای کم‌ترین مجموع رتبه بودند (جدول ۱۰) و می‌توانند به‌عنوان ژنوتیپ‌های پایدار و با عملکرد بالا انتخاب و معرفی شوند. کریمی‌زاده و همکاران (Karimizadeh *et al.*, 2023) نیز در تجزیه پایداری ژنوتیپ‌های مختلف عدس از شاخص‌های پایداری مختلف استفاده کردند و در ارتباط با مقایسه شاخص‌ها، شاخص WAAS را به‌دلیل این‌که تمامی مؤلفه‌های اصلی معنی‌دار با وزن‌های متفاوت در محاسبه آن به‌کار گرفته می‌شوند و پایداری عملکرد را به‌شکل بهتری نشان می‌دهند، به‌عنوان بهترین شاخص جهت تعیین پایداری ژنوتیپ‌ها معرفی کردند.

تجزیه GGE-Biplot

به‌منظور بررسی تنوع ژنوتیپ‌ها و محیط‌ها و مطالعه برهمکنش ژنوتیپ × محیط از تجزیه گرافیکی به‌روش GGE-Biplot نیز استفاده شد. نتایج نشان داد که مؤلفه‌های اصلی اول و دوم به‌ترتیب ۳۱/۲۲ و ۲۲/۶۶ درصد و در مجموع ۵۳/۸۸ درصد از تغییرات کل را توجیه کردند که این امر بیانگر اعتبار نسبی بای‌پلات در توجیه

برای جلوگیری از گزینش ژنوتیپ‌های با عملکرد کم به‌عنوان ژنوتیپ برتر، شاخص انتخاب هم‌زمان (ssi) بر پایه هر یک از شاخص‌های پایداری پیشنهاد شده است (Farshadfar, 2008)، که در آن به هر دو جنبه عملکرد و پایداری توجه می‌شود. بررسی نتایج شاخص‌های انتخاب هم‌زمان (جدول ۱۰) نشان داد که بر اساس شاخص ssiASV ژنوتیپ‌های G1، G4، G3، G8، G7، بر پایه شاخص ssiWAAS ژنوتیپ‌های G1، G3، G4، G8 و G7، بر پایه شاخص ssiSIPC ژنوتیپ‌های G8، G12، G1، G4، G16، بر پایه شاخص ssiZA ژنوتیپ‌های G1، G4، G8، G3، G16، بر پایه شاخص ssiEV ژنوتیپ‌های G5، G7، G4، G8، G12، بر پایه شاخص ssiASTAB ژنوتیپ‌های G1، G4، G8، G12، G2، بر پایه شاخص ssiASI ژنوتیپ‌های G1، G4، G3، G8، G7، بر پایه شاخص ssiFA ژنوتیپ‌های G1، G4، G8، G3 و G7، بر پایه شاخص ssiDZ ژنوتیپ‌های G12، G4، G8، G5، بر پایه شاخص ssiDA ژنوتیپ‌های G1، G8، G4، G3، G7، بر پایه شاخص ssiMASI ژنوتیپ‌های G1، G8، G4، G3، G7، بر پایه شاخص ssiMASV ژنوتیپ‌های G1، G4، G8، G3، G7، و بر اساس شاخص ssiAVAMGE ژنوتیپ‌های G1، G8، G4، G3 و G7 به‌عنوان ژنوتیپ‌های پایدار و با عملکرد بالا انتخاب شدند (جدول ۱۰). در انتها بررسی مجموع پارامترها نیز نشان داد که ژنوتیپ‌های G8 (۱۰ رتبه اول،

تغییرات اثرات G+GE بود. نمودار بای‌پلات دارای دو محور است. محور افقی (PC1) معرف اثر اصلی ژنوتیپ و محور عمودی (PC2) معرف برهمکنش ژنوتیپ × محیط است و بنابراین محور PC2 می‌تواند معیاری برای سنجش پایداری ژنوتیپ‌ها باشد (Yan & Hunt, 2001). محمدی و همکاران (Mohammadi *et al.*, 2016) با ارزیابی پایداری عملکرد ژنوتیپ‌های گندم نان در ۲۱ محیط اظهار داشتند که GGE-Biplot در حدود ۳۹/۱۹ درصد از تغییرات را توجیه کرد، در حالی که عمرانی و همکاران (Omran *et al.*, 2017) در بررسی پایداری عملکرد ژنوتیپ‌های گندم نان در ۱۲ محیط تغییرات توجیه توسط GGE-Biplot را در حدود ۸۲ درصد گزارش کردند.

میانگین عملکرد و پایداری

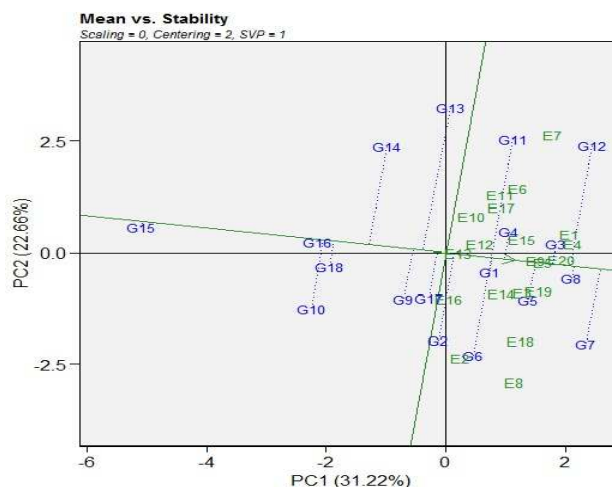
به‌منظور بررسی هم‌زمان پایداری و عملکرد در روش GGE-Biplot از بای‌پلات مختصات محیط متوسط (AEC = Average Environment Coordination) استفاده می‌شود که به آن بای‌پلات میانگین در مقابل پایداری نیز گفته می‌شود. در این بای‌پلات، تصاویر مربوط به علائم ژنوتیپ‌ها روی محور AEC می‌تواند برآوردی از عملکرد آن‌ها باشد (Yan *et al.*, 2007). محیط متوسط که با پیکان کوچکی در شکل ۳ نشان داده شده است، با

استفاده از میانگین نمره‌های IPC1 و IPC2 محیط تعریف و از دو خط افقی و عمودی تشکیل می‌شود. محور افقی پیکان‌دار که از میانگین محیط‌ها (محل پیکان) و مبدأ مختصات می‌گذرد، تقریبی از عملکرد ژنوتیپ‌ها (G) است و در مقابل خط عمودی نشان دهنده برهمکنش ژنوتیپ × محیط (GEI) و بیانگر پایداری ژنوتیپ‌ها است. بر این اساس، نتایج این بای‌پلات نشان داد که ژنوتیپ‌های G8، G4، G3 و تا حدودی ژنوتیپ G1 ضمن اینکه از نظر پتانسیل عملکرد از وضعیت مطلوبی برخوردار بودند و عملکرد بالاتری از میانگین کل ژنوتیپ‌ها داشتند، جزء پایدارترین ژنوتیپ‌ها نیز بودند. همچنین، ژنوتیپ‌های G7 و G12 با وجود عملکرد دانه بالایی که نسبت به سایر ژنوتیپ‌های سمت راست محور افقی AEC داشتند، دارای پایداری عملکرد ضعیفی بودند. در مقابل، ژنوتیپ‌های G15 و G16 که دارای کم‌ترین مقدار عملکرد دانه بودند، از پایداری عملکرد بالاتری نسبت به سایر ژنوتیپ‌ها برخوردار بودند. آکمل و سماءاله (Akmal & Samaullah, 2014) نیز اظهار داشتند که ژنوتیپ‌هایی که بالاترین عملکرد را دارند، لزوماً پایدارترین ژنوتیپ‌ها نیستند، بلکه ممکن است ژنوتیپ‌هایی با عملکرد پایین، از پایداری بالاتری برخوردار باشند.

جدول ۱۰- شاخص‌های انتخاب هم‌زمان بر مبنای شاخص‌های پایداری مختلف برای ژنوتیپ‌های گندم نان

Table 10. Simultaneous selection indices based on different stability indices for bread wheat genotypes

Genotype	Yield	ASTAB	ASI	ASV	AVAMGE	DA	DZ	EV	FA	MASI	MASV	SIPC	ZA	WAAS
G1	5	9	11	11	6	7	16	16	7	8	7	11	10	10
G2	9	15	22	22	18	19	15	15	19	22	21	20	19	21
G3	4	17	5	5	11	13	18	17	13	10	12	17	11	10
G4	7	9	10	10	10	8	10	10	8	11	10	9	9	10
G5	8	20	19	19	21	20	13	13	20	19	18	18	19	19
G6	10	28	25	25	28	27	28	28	27	25	27	26	26	26
G7	1	18	13	13	17	16	11	11	16	13	14	19	19	18
G8	2	5	4	4	8	6	6	6	7	4	6	6	6	4
G9	11	22	20	20	22	22	18	18	22	20	20	25	20	21
G10	17	27	27	27	25	25	33	31	25	27	28	34	29	26
G11	6	20	22	22	23	20	18	18	20	22	22	21	20	20
G12	3	11	20	20	17	19	5	5	19	20	18	6	20	21
G13	13	29	31	31	28	31	21	21	31	31	31	22	28	28
G14	15	30	29	29	27	28	30	30	28	29	29	27	28	28
G15	18	23	23	23	20	23	31	34	22	19	23	23	19	19
G16	14	15	22	22	18	17	15	15	17	21	15	15	17	18
G17	12	19	19	19	17	18	21	21	18	20	19	19	20	20
G18	16	25	20	20	26	23	33	33	23	21	22	24	22	23



شکل ۳- بای پلات مختصات محیط متوسط برای گزینش هم‌زمان پایداری و عملکرد ژنوتیپ‌های گندم نان در ۲۰ محیط
Figure 3. Biplot of the average environment coordination (AEC) for simultaneously selection of yield and stability of bread wheat genotypes in 20 environments

الگوی کدام - برتر - کجا

بهترین و یا ضعیف‌ترین ژنوتیپ‌ها در محیط‌های مورد بررسی باشند. بنابراین، در مجموع محیط‌های مورد بررسی را می‌توان به سه محیط کلان شامل محیط‌های با ژنوتیپ رأس G6، G7 و G12 تقسیم کرد (شکل ۴). ارزیابی ژنوتیپ‌ها در درون یک محیط کلان باید مبتنی بر میانگین عملکرد و پایداری باشد تا از برهمکنش تصادفی ژنوتیپ × محیط اجتناب شود (Farshadfar, 2015). برهمکنش ژنوتیپ × محیط را می‌توان با انتخاب ژنوتیپ‌های دارای سازگاری خصوصی با محیط‌های کلان و اختصاص آن‌ها به این محیط‌ها، کاهش داد و به این ترتیب، حداکثر تولید را داشت (Sadeghzadeh Ahari *et al.*, 2005).

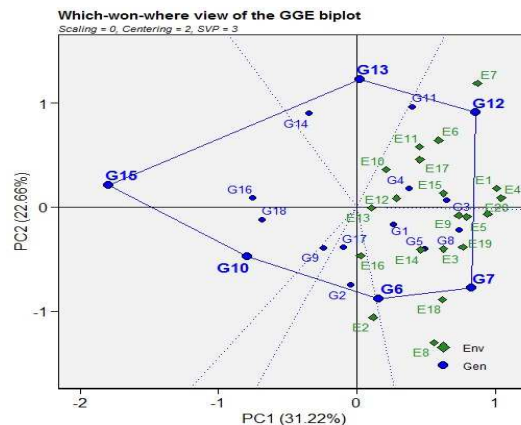
روابط بین محیط‌ها و ژنوتیپ‌ها

آزمایش‌های چند محیطی بیش‌تر جهت ارزیابی ژنوتیپ‌ها به‌کار می‌روند، اما برای ارزیابی محیط‌ها نیز می‌توان از اطلاعات به‌دست‌آمده استفاده کرد. توانایی تفکیک و تمایز یک محیط به توانایی محیط برای نشان دادن حداکثر تنوع بین ژنوتیپ‌ها برمی‌گردد، ولی توانایی نمایندگی یک محیط نشان‌دهنده این است که محیط موردنظر تا چه میزان نماینده شرایط سایر محیط‌های آزمایشی است. بنابراین محیط ایده‌آل باید هر دو ویژگی تفکیک و نمایندگی را داشته باشد تا بتواند ژنوتیپ‌های سازگار را تشخیص دهد. این ویژگی در GGE-Biplot با عنوان قدرت تفکیک محیط‌ها در برابر میزان نمایندگی (Discriminateness vs. Representativeness) آن‌ها شناخته می‌شود (Yan & Tinker, 2006). بردارهای

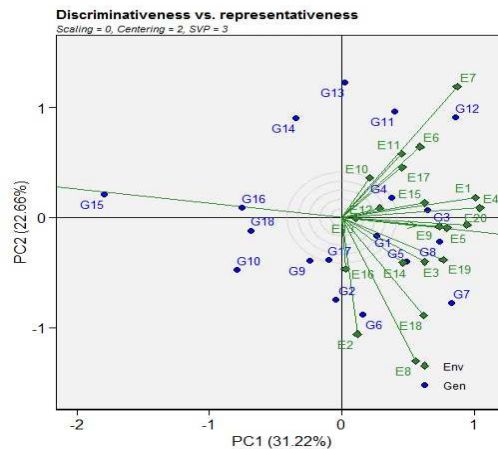
با استفاده از نمودار چندضلعی GGE-Biplot می‌توان تفسیرهای گوناگونی انجام داد و به ماهیت اثر ژنوتیپ و محیط روی صفت مورد مطالعه پی برد. این روش توسط محققین متعددی جهت بررسی سازگاری خصوصی ژنوتیپ‌ها به‌کار برده شده است (Yan & Kang, 2002; Javidfar *et al.*, 2010; Azizinia & Mortazavian, 2015). در این نوع بای‌پلات، کلیه ژنوتیپ‌هایی که درون هر بخش قرار می‌گیرند، سازگاری خصوصی بالایی با محیط‌های واقع در آن بخش و شباهت بالایی با ژنوتیپ واقع در رأس چندضلعی دارند. یکی از ویژگی‌های نمودار چندضلعی وجود واریانس زیاد بین محیط‌های بزرگ و واریانس کم درون محیط‌های بزرگ است (Gauch & Zobel, 1997). در این مطالعه، چندضلعی به پنج بخش تقسیم شد (شکل ۴). بخش اول با ژنوتیپ رأس G12، شامل محیط‌های E1، E7، E4، E6، E11، E17، E10، E15 و E12 و ژنوتیپ‌های G3، G4 و G11، بخش دوم با ژنوتیپ رأس G7، شامل محیط‌های E5، E9، E13، E20، E3، E14، E18، E8 و ژنوتیپ‌های G5، G8 و G1، بخش سوم با ژنوتیپ رأس G6، شامل محیط‌های E16 و E2 و ژنوتیپ‌های G7، G9 و G2، بخش چهارم با ژنوتیپ رأس G13 شامل ژنوتیپ G14 و بخش پنجم با ژنوتیپ رأس G15 شامل ژنوتیپ‌های G10، G18 و G16 است. ژنوتیپ‌های رأس به‌واسطه فاصله‌ای که از مرکز بای‌پلات دارند، می‌توانند از نظر عملکرد دانه به‌عنوان

محیط‌های با توانایی تمایز و نمایندگی بوده و محیط‌های مناسبی برای انتخاب ژنوتیپ‌های سازگار با عملکرد بالا بودند. محیط‌های E7، E11، E6 و E17 از یک طرف و E2، E8 و E18 با همبستگی بالا از طرف دیگر نیز محیط‌های با توانایی تمایز ولی غیر نماینده (برای گزینش ژنوتیپ‌های خاص با توجه به محیط‌های کلان) قابل استفاده هستند (شکل ۵). زاویه کمتر از ۹۰ درجه در بین محیط‌ها حاکی از عملکرد مشابه آن‌ها در شناسایی و تفکیک ژنوتیپ‌ها است. این دیدگاه از بای‌پلات محیط‌های اضافه را نیز مشخص می‌کند. برخی از محیط‌ها با یکدیگر همبستگی مثبت دارند و بنابراین اطلاعات حاصل از ژنوتیپ‌های مربوط به این محیط‌ها مشابه خواهد بود. اگر این شباهت در طول سال‌ها قابل تکرار باشد، این محیط‌ها اضافه هستند و یک محیط واحد کفایت می‌کند.

موجود در این نمودار بای‌پلات می‌تواند اطلاعات مربوط به واریانس درون محیط‌ها را نیز ارائه دهند، به طوری که طول بردارهای محیط (در یک بای‌پلات محیط‌محور) تقریباً متناسب با انحراف استاندارد ژنوتیپ‌ها در هر محیط است (Kroonenberg, 1995)، درحالی‌که یک بای‌پلات متمرکز بر ژنوتیپ، تقریباً تنوع را در میان محیط‌ها نشان می‌دهد (Yan & Kang, 2002). طول بردارهای محیط متناسب با انحراف استاندارد در محیط‌های مربوطه و معیار توانایی تمایز محیط‌ها است (Yan & Tinker, 2006). محیط‌های با زاویه بسته نسبت به خط ATC، به‌ویژه آن‌هایی که بردارهای بلندتری نیز دارند، علاوه بر نمایندگی (نمود عملکرد بالا)، قادر به تمایز (تفکیک ژنوتیپ‌های پایدار از ناپایدار) نیز هستند. بر این اساس، E5، E9، E20، E4 و E1 (کوچک‌ترین زاویه با طول بردار بلند)،



شکل ۴- نمایش گرافیکی بای‌پلات بر اساس الگوی کدام- برتر- کجا برای شناسایی محیط‌های کلان و ژنوتیپ‌های برتر گندم نان
Figure 4. Graphical view of GGE-Biplot based on which-won-where pattern to identify macro-environments and superior bread wheat genotype

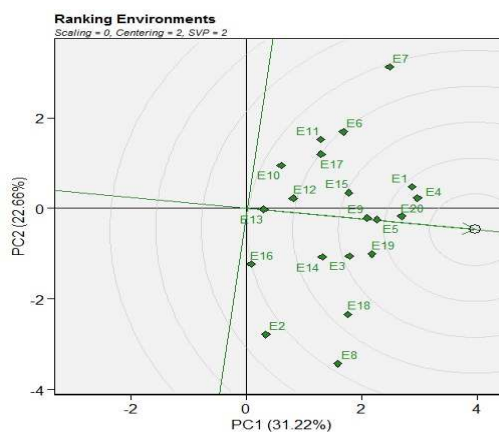


شکل ۵- رابطه میان محیط‌های مورد بررسی و مقایسه هم‌زمان این محیط‌ها از نظر قابلیت تفکیک ژنوتیپ‌ها در مقابل نماینده بودن آن‌ها
Figure 5. Relationship between the investigated environments and the simultaneous comparison of these environments in terms of the ability to separate genotypes against their representativeness

رتبه‌بندی محیط‌ها

کمیت دیگری که دارای اهمیت مشابه با توانایی تمایز محیط آزمایش می‌باشد، نمایندگی محیط ایده‌آل موجود در آزمایش است. می‌توان محیط‌ها را بر مبنای فاصله آن‌ها از محیط ایده‌آل رتبه‌بندی کرد (Farshadfar, 2015). می‌توان زاویه بین بردار محیطی محیط‌های موجود در آزمایش و محور مختصات محیط متوسط (AEC) را به‌عنوان مقیاسی برای تعیین میزان نمایندگی یک محیط ایده‌آل در نظر گرفت. هر چه این زاویه کوچک‌تر باشد، میزان نمایندگی بیشتر و محیط مورد نظر نماینده بهتری از محیط ایده‌آل خواهد بود. یک محیط آزمایشی کامل یا ایده‌آل، محیطی است که دارای رتبه IPC1 بالا (به این معنی که دارای بیش‌ترین ژنوتیپ‌های تأثیرگذار بر اثر

اصلی ژنوتیپی است) و رتبه IPC2 کوچک یا صفر (که بیانگر اثر محیطی کلاست) باشد. بنابراین، محیط ایده‌آل محیطی فرضی است که دارای حداکثر قابلیت تمایز و نمایندگی باشد و از نظر مکانی در مرکز دوایر متحدالمرکز بای‌پلات قرار دارد (Yan *et al.*, 2011). میزان مطلوبیت محیط‌ها به‌وسیله فاصله آن‌ها از محیط ایده‌آل سنجیده می‌شود. در این مطالعه، محیط ایده‌آل یا محیط کامل مشاهده نشد، با این‌حال محیط‌های E4، E1، E20، E5، E19 و E9 با کم‌ترین فاصله از محیط ایده‌آل، دارای بیش‌ترین میزان نمایندگی بودند (شکل ۶). در مقابل محیط‌های E8، E7، E2 و E18 با بیش‌ترین فاصله از محیط ایده‌آل (بیش‌ترین زاویه با محور مختصات محیط متوسط) کم‌ترین مقدار نمایندگی را نشان دادند.



شکل ۶- بای‌پلات مقایسه محیط‌های مورد مطالعه با محیط ایده‌آل فرضی بر اساس توانایی تمایز و نماینده بودن محیط هدف
Figure 6. Biplot for comparison of the studied environments with the hypothetical ideal environment based on discriminating and representativeness ability of the target environment

رتبه‌بندی ژنوتیپ‌ها

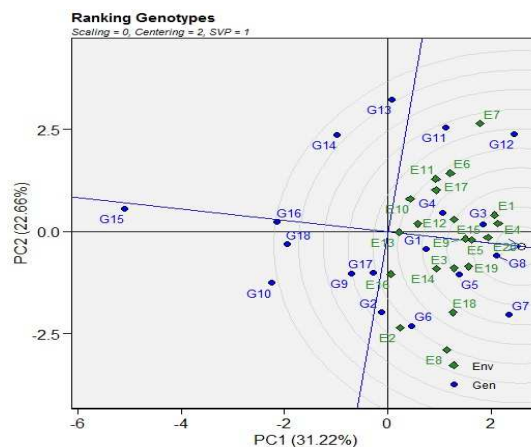
به نظر یان و همکاران (Yan *et al.*, 2000) و یان و کانگ (Yan & Kang, 2002)، ژنوتیپی ایده‌آل است که دارای رتبه IPC1 بالا (قابلیت تولید عملکرد بالا در تمام محیط‌ها) و رتبه IPC2 کوچک یا صفر (پایداری عملکرد بالا در تمام محیط‌ها) باشد. ژنوتیپ ایده‌آل فرضی بر اساس پرمحصول‌ترین و پایدارترین ژنوتیپ تعریف می‌شود. به‌عبارت دیگر ژنوتیپ ایده‌آل، ژنوتیپی فرضی است که دارای بالاترین عملکرد و حداکثر پایداری باشد. هر ژنوتیپی که نزدیک‌ترین فاصله را به این ژنوتیپ فرضی داشته باشد، به‌عنوان یک ژنوتیپ برتر در نظر گرفته می‌شود (Yan & Kang, 2002). نمودار بای‌پلات ژنوتیپ ایده‌آل فرضی در شکل ۷ ارائه شده است. دایره کوچک

روی محور افقی AEC که با یک پیکان نشان داده شده است و در مرکز دوایر متحدالمرکز قرار دارد، بیانگر موقعیت مکانی ژنوتیپ ایده‌آل فرضی است. ژنوتیپ‌هایی که با فاصله نزدیکی از ژنوتیپ ایده‌آل فرضی روی نمودار قرار گیرند، با توجه به معیارهایی که برای ژنوتیپ ایده‌آل تعریف شد (بالاترین عملکرد و پایداری)، می‌توانند به‌عنوان ژنوتیپ‌های مطلوب در نظر گرفته شوند. با توجه به این بای‌پلات (شکل ۷)، ژنوتیپ ایده‌آلی در بین ژنوتیپ‌های مورد مطالعه وجود نداشت، اما ژنوتیپ‌های G5، G3، G8 و G7 که کم‌ترین فاصله را از ژنوتیپ ایده‌آل فرضی دارند، به‌عنوان برترین ژنوتیپ‌ها شناخته شدند. علاوه، ژنوتیپ G15 با داشتن بیش‌ترین فاصله از ژنوتیپ ایده‌آل فرضی به‌عنوان ژنوتیپ نامطلوب شناخته شد.

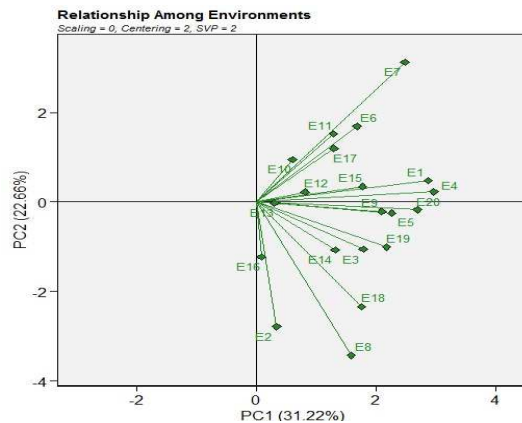
ارتباط بین محیط‌ها

از روش GGE-Biplot می‌توان برای نشان دادن رابطه بین محیط‌های مورد مطالعه استفاده کرد. در این بای‌پلات، محیط‌ها از طریق بردارهایی به مبدأ متصل می‌شوند. کسینوس زاویه بین بردارهای دو محیط، ضریب همبستگی بین آن‌ها را نشان می‌دهد (Farshadfar, 2015). وجود زاویه کوچک‌تر بین بردار دو محیط، به معنای همبستگی مثبت و ارتباط بالای بین آن‌ها است، به این معنی که اطلاعات حاصل از ژنوتیپ‌ها در آن محیط‌ها مشابه است و در صورت تکرار این نتایج در آزمایش‌های بعد، می‌توان از یکی از این محیط‌ها استفاده و محیط‌های مشابه را حذف کرد که این کار سبب صرفه‌جویی در هزینه و افزایش کارایی می‌شود (Yan & Kang, 2002). زاویه ۹۰ درجه بین دو بردار بیانگر عدم وجود همبستگی بین دو محیط و وجود تفاوت زیاد بین آن‌ها است. بای‌پلات

ارتباط بین محیط‌ها (شکل ۸) نشان داد که محیط‌های E10, E11, E7, E6 و E17 و نیز محیط‌های E12, E15, E1, E4, E20, E3, E9 و E5 دارای همبستگی بالایی بودند و می‌توان آن‌ها را به‌عنوان محیط‌های مشابه معرفی کرد. این شاید به دلیل قرارگیری این محیط‌ها در اقلیم سرد کشور باشد. طول بردار هر محیط، تقریبی از انحراف معیار درونی و نشان دهنده قدرت تمایز محیط است. در مجموع بررسی بای‌پلات ارتباط بین محیط‌ها، قدرت تمایز بالای بیشتر محیط‌های مورد بررسی (به‌جز محیط‌های E10, E12, E13 و E16) را نشان داد. از میان محیط‌های مورد بررسی، محیط‌های E8, E18, E2 و E7 به ترتیب قدرت تمایز بیشتری نسبت به سایر محیط‌ها داشتند. اگر محیطی فاقد قدرت تمایز باشد، اطلاعاتی در باره ژنوتیپ‌ها ارائه نمی‌دهد و در نتیجه محیط آزمایشی انتخابی بی‌فایده خواهد بود.



شکل ۷- بای‌پلات برای مقایسه ژنوتیپ‌های گندم نان مورد مطالعه با ژنوتیپ ایده‌آل فرضی بر مبنای عملکرد و پایداری
Figure 7. Biplot for comparison of the studied bread wheat genotypes with the hypothetical ideal genotype based on yield and stability



شکل ۸- بای‌پلات روابط بین محیط‌های مختلف و مقایسه آن‌ها
Figure 8. Biplot of the relationships between different environments and their comparison

ایستگاه تبریز (محیط‌های E10 و E20) بودند (جدول ۱۱، شکل ۹). این شرایط در مورد ژنوتیپ‌های G11، G12 و G7 در ایستگاه کرج (محیط‌های E1 و E10)، ژنوتیپ G7 در ایستگاه قزوین (محیط‌های E2 و E12)، ژنوتیپ‌های G7، G8 و G3 در ایستگاه اقلید (محیط‌های E3 و E13)، ژنوتیپ‌های G7 و G8 در ایستگاه همدان (محیط‌های E4 و E14)، ژنوتیپ‌های G7، G8 و G3 در ایستگاه اردبیل (محیط‌های E5 و E15)، ژنوتیپ‌های G3، G11، G12، G13 و G14 در ایستگاه میاندوآب (محیط‌های E7 و E17)، ژنوتیپ‌های G2، G5، G6، G7 و G8 در ایستگاه مشهد (محیط‌های E8 و E18) و ژنوتیپ‌های G3، G5، G7 و G8 در ایستگاه جلگه رخ (محیط‌های E9 و E19) نیز صادق بود.

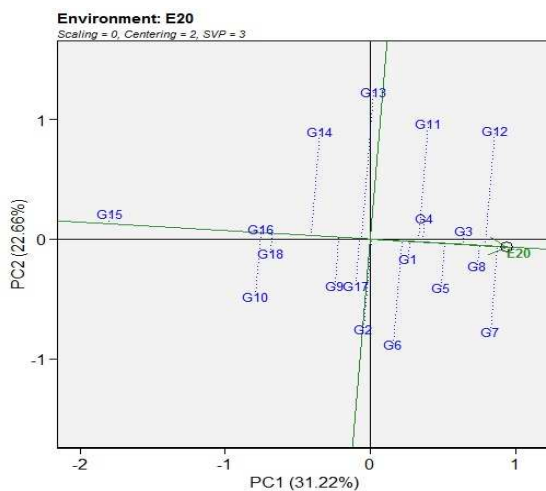
رتبه‌بندی ژنوتیپ‌ها در محیط‌های مورد بررسی

یکی دیگر از موارد کاربرد نمودارهای GGE-Biplot رتبه‌بندی ژنوتیپ‌ها در هر کدام از محیط‌های مورد بررسی است. بر اساس این نمودارها، یک ژنوتیپ ایده‌آل فرضی در هر یک از محیط‌های مورد مطالعه تعریف می‌شود. این ژنوتیپ ایده‌آل، یک ژنوتیپ فرضی است که دارای بالاترین عملکرد و کم‌ترین نوسانات عملکرد بوده و بنابراین دارای بیش‌ترین پایداری است. این ژنوتیپ ایده‌آل ملاک انتخاب ژنوتیپ‌ها بر مبنای دوری و نزدیکی آن‌ها به ژنوتیپ ایده‌آل در هر محیط است. ژنوتیپ‌های منتخب در هر یک از محیط‌های مورد مطالعه در جدول ۱۱ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ژنوتیپ‌های G12 و G13 نزدیک‌ترین ژنوتیپ‌ها به ژنوتیپ ایده‌آل در هر دو سال در

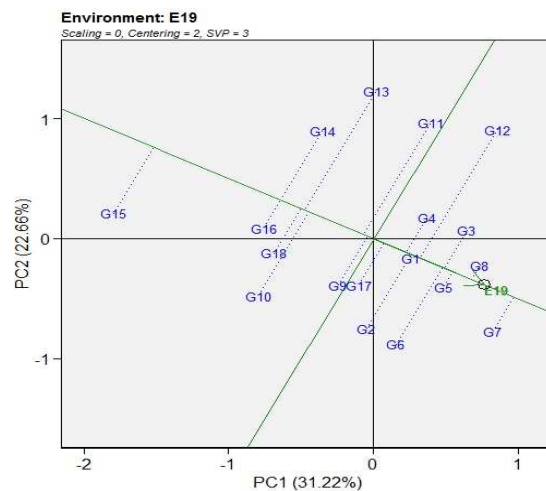
جدول ۱۱- رتبه‌بندی ژنوتیپ‌های امیدبخش گندم نان در محیط‌های مورد بررسی

Table 11. Ranking of promising bread wheat genotypes in the studied environments

Environment	Selected genotypes in each environment	Environment	Selected genotypes in each environment
E1	G11, G7 , G8, G3, G12	E11	G3 , G14, G13, G11 , G12
E2	G10, G5, G2, G7 , G6	E12	G7, G8, G3 , G11 , G12
E3	G3 , G6, G5, G7 , G8	E13	G5 , G3, G8 , G12, G7
E4	G11, G3 , G8 , G7 , G12	E14	G2, G5 , G8 , G6, G7
E5	G5, G3 , G12 , G8, G7	E15	G11, G7, G8, G3, G12
E6	G14, G3 , G13, G11, G12	E16	G10, G5, G2, G7, G6
E7	G3, G14, G13, G11, G12	E17	G14, G3, G13, G11, G12
E8	G8, G5, G2, G6, G7	E18	G2, G8, G5, G6, G7
E9	G5, G3 , G12 , G8, G7	E19	G6, G3 , G5 , G8 , G7
E10	G3 , G14, G11, G13, G12	E20	G5 , G3 , G8 , G12, G7



B) Tabriz (second year)



A) Tabriz (first year)

شکل ۹- رتبه‌بندی ژنوتیپ‌ها در ایستگاه تحقیقات تبریز در دو سال مورد بررسی

Figure 9. The ranking of genotypes in the Tabriz research station in two years

مقایسه روش‌های AMMI و GGE Biplot

کارایی بیشتری برخوردار است. در راستای برتری روش GGE-Biplot، یان (Yan, 2011) اظهار می‌کند که روش GGE-Biplot نسبت به روش AMMI در تعیین محیط‌های کلان و ارزیابی ژنوتیپ‌ها، روش مناسب‌تری است، زیرا بیش‌تر اثر ژنوتیپ و برهمکنش ژنوتیپ×محیط را تبیین می‌کند. همچنین از دیدگاه قدرت تمایز و نمایندگی، روش GGE-Biplot در ارزیابی محیط‌های آزمایشی مؤثرتر است، زیرا این امکان در تجزیه AMMI وجود ندارد. در مقابل گاج و همکاران (Gauch et al., 2008) اظهار می‌دارند که جهت نمایش محیط‌های کلان، بای‌پلات AMMI2 بیش‌تر اثر اصلی ژنوتیپ را شامل می‌شود و همچنین مقدار بیش‌تری از برهمکنش ژنوتیپ×محیط (GE) را نسبت به بای‌پلات GGE2 به نمایش می‌گذارد. در نتیجه الگوی "کدام- برتر- کجا" را با دقت بیش‌تری برای مجموعه داده‌های پیچیده نمایش می‌دهد. هنگامی که برهمکنش ژنوتیپ×محیط توسط یک مؤلفه اصلی به‌خوبی توجیه می‌شود، بای‌پلات AMMI1، ژنوتیپ‌های برتر و پاسخ‌های سازگار را به‌سادگی و واضح‌تر از بای‌پلات GGE2 توصیف می‌کند. در پاسخ به توجیه‌های گاج و همکاران (Gauch et al., 2008)، یان (Yan, 2011) معتقد است که روش GGE-Biplot در ارزیابی محیط‌ها کارایی بیش‌تری دارد و اطلاعات بیش‌تری نسبت به نمودارهای روش AMMI ارائه می‌دهد. همچنین، ترسیم بای‌پلات‌ها در GGE-Biplot ساده‌تر از بای‌پلات‌های AMMI است. علاوه بر این، بای‌پلات‌های مختلف GGE-Biplot را می‌توان برای پرداختن به هر سه جنبه از تجزیه داده‌های چند محیطی (یعنی ترسیم محیط کلان، ارزیابی ژنوتیپ‌ها و ارزیابی محیط‌های آزمایش) استفاده کرد، در حالی که در تجزیه AMMI فقط از یک نمودار برای پرداختن به هر سه جنبه استفاده می‌شود. همچنین، بای‌پلات AMMI1 نمایش گرافیکی مؤثری از اثر ژنوتیپ و برهمکنش ژنوتیپ×محیط نیست، زیرا اثر ژنوتیپ اغلب با اثر محیط بسیار بزرگ‌تر از آن پوشانده می‌شود و به‌دلیل این‌که محورهای ژنوتیپ و برهمکنش ژنوتیپ×محیط در این نمودار دارای واحدهای متفاوتی هستند، از این‌رو این نمودارها ویژگی‌های یک نمودار بای‌پلات واقعی را ندارند، در حالی که نمای ATC در GGE-Biplot یک ابزار مناسب برای تجزیه داده‌های ژنوتیپ×محیط بوده و برای انتخاب چشمی از نظر متوسط عملکرد در برابر ناپایداری است (Yan et al., 2021).

هر دو روش AMMI و GGE-Biplot به‌دنبال یافتن ژنوتیپ‌های پایدار یا دارای سازگاری خصوصی هستند و بهتر است هر دو روش برای داده‌های حاصل از آزمایش‌های پایداری و سازگاری استفاده شوند. این کار به محققین اجازه می‌دهد تا اطلاعات مفیدتری از نتایج آزمایش‌های خود استخراج کنند و بنابراین کارایی گزینش ژنوتیپ‌های برتر را افزایش دهند (Gauch, 2006). در ارتباط با برتری هر کدام از این دو روش، بحث‌های زیادی بین محققین وجود دارد. نمودارهای تجزیه GGE-Biplot با استفاده از داده‌های تصحیح شده بر اساس تستر (محیط) رسم می‌شود که اطلاعاتی از اثر ژنوتیپ و برهمکنش ژنوتیپ×محیط را در بر دارد. در مقابل بای‌پلات AMMI با استفاده از داده‌های تصحیح شده دو طرفه (تصحیح شده به‌وسیله میانگین ژنوتیپ و محیط) که فقط شامل اطلاعاتی از برهمکنش ژنوتیپ×محیط است، رسم می‌شود (Yan et al., 2000). طبق نظر یان (Yan, 2021) وقتی آزمایش به‌اندازه کافی بزرگ نباشد، انتخاب ژنوتیپ‌ها بهتر است بیش‌تر بر پایه میانگین عملکرد ژنوتیپ‌ها استوار باشد، نه بر مبنای پایداری آن‌ها (شاید به این دلیل که تعداد محیط کم‌تر است و عملاً صحبت از پایداری در تعداد محیط کم معنایی ندارد). یان و کانگ (Yan & Kang, 2002) اظهار کردند که با وجود آن‌که این دو روش ممکن است اطلاعات یکسانی را ارائه دهند، ولی بیش‌تر ویژگی‌های نمودارهای GGE-Biplot در بای‌پلات‌های روش AMMI وجود ندارد. همچنین، اگر هدف بررسی این است که کدام رقم در کدام محیط برتر است، باید احتیاط کرد، زیرا بای‌پلات روش AMMI می‌تواند در این حالت گمراه‌کننده باشد. باید توجه داشت که اگرچه GGE-Biplot اثر ژنوتیپ را از برهمکنش ژنوتیپ×محیط تفکیک نمی‌کند، اما انتخاب رقم‌های برتر فقط برپایه برهمکنش ژنوتیپ×محیط (که در روش تجزیه AMMI انجام می‌شود)، مطلوب محققین نیست، به‌ویژه وقتی که مؤلفه‌های اصلی اول و دوم سهم اندکی از برهمکنش ژنوتیپ×محیط را توجیه می‌کنند. در مقابل، گاج (Gauch, 2006) به برتری روش AMMI نسبت به بای‌پلات‌های روش GGE-Biplot به‌دلایل کشاورزی اشاره می‌کند و اظهار می‌دارد که چون روش AMMI، تنوع کل را به اثرات اصلی ژنوتیپ، اثرات اصلی محیط و برهمکنش ژنوتیپ×محیط تفکیک می‌کند، بنابراین از

کمترین مجموع رتبه بودند و به‌عنوان ژنوتیپ‌های پایدار و با عملکرد بالا انتخاب شدند. همان‌طور که مشاهده می‌شود سه رقم میهن (G1)، زرینه (G3) و زارع (G4) که به‌عنوان رقم‌های مناسب اقلیم سرد کشور معرفی شده‌اند، در هر دو روش AMMI و GGE-Biplot به‌عنوان رقم‌های برتر در این آزمایش انتخاب شدند. این سه رقم به‌همراه رقم حیدری (G2) از رقم‌های بسیار خوب اقلیم سرد کشور هستند و انتخاب این رقم‌ها در این آزمایش می‌تواند تا حدودی صحت و دقت انتخاب ژنوتیپ‌های برتر را مورد تأیید قرار دهد.

تضاد منافع

نویسندگان تأیید می‌کنند که این تحقیق در غیاب هرگونه روابط تجاری یا مالی می‌تواند به‌عنوان تضاد منافع بالقوه تعبیر شود، انجام شده است.

رعایت اخلاق در نشر

نویسندگان اعلام می‌کنند که در نگارش این مقاله به‌طور کامل از اخلاق نشر از جمله سرقت ادبی، سوء رفتار، جعل داده‌ها و انتشار دوگانه، پیروی کرده‌اند. همچنین این مقاله حاصل یک کار تحقیقاتی اصیل بوده و تاکنون به‌طور کامل به هیچ زبانی و در هیچ نشریه یا همایشی چاپ و منتشر نشده است و هیچ اقدامی نیز برای انتشار آن در هیچ نشریه یا همایشی صورت نگرفته و نخواهد گرفت.

اجازه انتشار مقاله

نویسندگان با چاپ این مقاله به‌صورت دسترسی باز موافقت کرده و کلیه حقوق استفاده از محتوا، جدول‌ها، شکل‌ها، تصویرها و غیره را به ناشر واگذار می‌کنند.

نتایج این آزمایش نشان داد که هر دو روش مورد بررسی، ژنوتیپ خاصی را با سازگاری عمومی بالا معرفی نکردند، اما با توجه به ژنوتیپ‌های انتخابی در هر دو روش (ژنوتیپ‌های G1، G4، G3 و G8)، می‌توان تا حدودی هر دو روش را یکسان ارزیابی کرد، اگرچه با توجه به درصد پایین تبیین واریانس کل توسط مؤلفه‌های اول و دوم در تجزیه AMMI، بهتر است به نتایج تجزیه GGE-Biplot اهمیت بیشتری داد. آلبرت (Albert, 2004) گزارش کرد که نتایج ارزش پایداری AMMI و Biplot با هم هم‌خوانی دارند. در مقابل، عبادی و همکاران (Ebadi *et al.*, 2022) تفاوت نتایج دو روش را گزارش کردند. به‌نظر می‌رسد در صورت وجود اختلاف بین نتایج دو روش، پارامترهای پایداری که در محاسبه آن‌ها از تمام مؤلفه‌های معنی‌دار استفاده می‌شود، نتایج بهتری ارائه خواهند داد.

نتیجه‌گیری کلی

نتایج حاصل از تجزیه پایداری ژنوتیپ‌های گندم نان در این آزمایش نشان داد که از نظر ژنوتیپ‌های انتخابی، تفاوت اندکی بین دو روش AMMI و GGE-Biplot وجود داشت و هر دو روش تا حدودی ژنوتیپ‌های یکسانی را به‌عنوان ژنوتیپ‌های برتر معرفی کردند، اگرچه با توجه به درصد پایین تبیین واریانس کل توسط مؤلفه‌های اول و دوم در روش تجزیه AMMI بهتر است به نتایج روش GGE-Biplot اهمیت بیشتری داده شود. از طرف دیگر، با توجه به توجه کم‌تر از ۵۰ درصد واریانس کل توسط دو مؤلفه اول در روش AMMI توصیه می‌شود از پارامترهای پایداری و شاخص انتخاب هم‌زمان مبتنی بر این پارامترها به‌دلیل به‌کارگیری تمامی مؤلفه‌های معنی‌دار در محاسبه آن‌ها استفاده شود. نتایج حاصل از این شاخص‌ها نیز نشان داد که ژنوتیپ‌های G1، G12، G8 و G4، G3 دارای

References

- Ajay, B. C., Aravind, J., & Abdul Fiyaz, R. (2018). CRAN: Package ammistability. Additive main effects and multiplicative interaction model stability parameters. Retrieved from: <https://cran.r-project.org/src/contrib/Archive/ammistability/>.
- Akmal, C. M. G. & Samaullah, M. Y. (2014). Adaptation and stability of aromatic rice lines in North Sumatera (in Indonesian). *Food Crop Research Journal*, 33(1), 9-16. doi: [10.21082/jpptp.v33n1.2014.p9-16](https://doi.org/10.21082/jpptp.v33n1.2014.p9-16).
- Albert, M. J. A. (2004). A comparison of statistical methods to describe genotype \times environment interaction and yield stability in multi-location maize trials. M. Sc. Dissertation. University of the Free State. Retrieved from: <https://scholar.ufs.ac.za/items/bbaefd45-6841-42b7-8bf6-d850de7aba3e>.
- Amini, A., Asadi, A. A., Chaichi, M., Ezt-Ahmadi, M., Ghasemi Kalkhoran, M., Eivazi, A. R., Hosseinibay, S. K., Salehi, P., Babaei, T., Gods, M., & Mirfakhraee, N. (2023). Investigating the

- stability of promising bread wheat genotypes in cold climate using AMMI and GGE Biplot analysis. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 54(3), 119-134. [In Persian]. doi: [10.22059/ijfcs.2023.348569.654940](https://doi.org/10.22059/ijfcs.2023.348569.654940).
- Annicchiarico, P. (1997). Joint regression vs AMMI analysis of genotype-environment interactions for cereals in Italy. *Euphytica*, 94, 53-62. doi: [10.1023/A:1002954824178](https://doi.org/10.1023/A:1002954824178).
- Azizinia, S., & Mortazavian, M. M. (2015). A yield stability survey in winter type canola using univariate methods and genotypic distribution pattern. *Journal of Crop Production & Processing*, 5(15), 57-68. [In Persian]. doi: [10.18869/acadpub.jcpp.5.15.57](https://doi.org/10.18869/acadpub.jcpp.5.15.57).
- Carvalho, L. P., Salgado, C. C. Farias, F. J. C., & Carneiro, V. Q. (2015). Stability and adaptability of genotypes of colorful fibers in relation to the fiber characters. *Ciência Rural*, 45, 598-605. [In Portuguese]. doi: [10.1590/0103-8478cr2013023](https://doi.org/10.1590/0103-8478cr2013023).
- Chimdesa, O., Asefa, K., Alemu, S., & Teshom, G. (2019). Evaluating agronomic performance and yield stability of improved bread wheat varieties across low moisture stress areas of Guji zone, Southern Oromia. *International Journal of Research in Agriculture & Forestry* 6(5), 1-10. doi: [10.19080/artoaj.2019.21.556183](https://doi.org/10.19080/artoaj.2019.21.556183).
- Danyali, S. F., Razavi, F., Ebadi Segherloo, A., Dehghani, H., & Sabaghpour, S. H. (2012). Yield stability in chickpea (*Cicer arietinum* L.) and study relationship among the univariate and multivariate stability parameters. *Research in Plant Biology*, 2(3), 46-61.
- Ebadi, A. A., Sharifi, P., & Taher Hallajian, M. (2022). Stability analysis of grain yield of rice mutants by multivariate methods and superiority index. *Journal of Agricultural of Science & Sustainable Production*, 32(2), 313-332. doi: [10.22034/saps.2021.45415.2668](https://doi.org/10.22034/saps.2021.45415.2668).
- Ebdon, J. S., & Gauch, H. G. (2002). Additive main effect and multiplicative interaction analysis of national turfgrass performance trials: I. Interpretation of genotype environment interaction. *Crop Science*, 42(2), 489-496. doi: [10.2135/cropsci2002.4890](https://doi.org/10.2135/cropsci2002.4890).
- Ehyaie, M., Mostafavi, K., Bakhtiar, F., & Mohammadi, A. (2022). Yield stability of bread wheat genotypes using AMMI and GGE biplot analysis. *Cereal Research*, 12(2), 147-165. [In Persian]. doi: [10.22124/cr.2023.23333.1746](https://doi.org/10.22124/cr.2023.23333.1746).
- FAO. (2022). World food and agriculture-statistical yearbook. Food and Agriculture Organization, Rome, Italy. Retrieved from: <http://www.fao.org/3/cc2211en/cc2211en.pdf>.
- Farshadfar, E. (2008). Incorporation of AMMI stability value and grain yield in a single non-parametric index (GSI) in bread wheat. *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 1791-17966. doi: [10.3923/pjbs.2008.1791.1796](https://doi.org/10.3923/pjbs.2008.1791.1796).
- Farshadfar, E. (2015). The interaction effect of genotype and environment in plant breeding. 1st Vol. Islamic Azad University Press, Kermanshah, Iran. [In Persian].
- Farshadfar, E., Mohammadi, M., Aghaee, M., & Vaisi, Z. (2012). GGE Biplot analysis of genotype× environment interaction in wheat-barley disomic addition lines. *Australian Journal of Crop Science*, 6(6), 1074-1079.
- Gauch, H. G. (2006). Statistical analysis of yield trials by AMMI and GGE. *Crop Science*, 46, 1488-1500. doi: [10.2135/cropsci2005.07-0193](https://doi.org/10.2135/cropsci2005.07-0193).
- Gauch, H. G., Piepho, H. P., & Annicchiarico, P. (2008). Statistical analysis of yield trials by AMMI and GGE: further considerations. *Crop Science*, 48, 866-889. doi: [10.2135/cropsci2007.09.0513](https://doi.org/10.2135/cropsci2007.09.0513).
- Gauch, H. G., & Zobel, R. W. (1997). Identifying mega-environments and targeting genotypes. *Crop Science*, 37(2), 311-326. doi: [10.2135/cropsci1997.0011183x003700020002x](https://doi.org/10.2135/cropsci1997.0011183x003700020002x).
- Golkari, S., Haghparast, R., Roohi, E., Mobasser, S., Ahmadi, M. M., Soleimani, K., Khalilzadeh, G., Abedi-Asl, G., & Babaei, T. (2016). Multi-environment evaluation of winter bread wheat genotypes under rainfed conditions of Iran-using AMMI model. *Crop Breeding Journal*, 6(2), 17-31. doi: [10.22092/cbj.2016.107104](https://doi.org/10.22092/cbj.2016.107104).
- Grausgruber, H., Oberforster, M., Werteker, M., Ruckenbauer, P., & Vollmann, J. (2000). Stability of quality traits in Australian grown winter wheat. *Field Crops Research*, 66(3), 257-267. doi: [10.1016/s0378-4290\(00\)00079-4](https://doi.org/10.1016/s0378-4290(00)00079-4).
- Hongyu K., Peña M. G., Araújo L. B., & Dias C. T. S. (2014). Statistical analysis of yield trials by AMMI analysis of genotype × environment interaction. *Biometrical Letters*, 51(2), 89-102. doi: [10.2478/bile-2014-0007](https://doi.org/10.2478/bile-2014-0007).
- Jafari, T., & Farshadfar, E. (2018). Stability analysis of bread wheat genotypes (*Triticum aestivum* L.) by GGE biplot. *Cereal Research*, 8(2), 199-208. [In Persian]. doi: [10.22124/c.2018.6232.1243](https://doi.org/10.22124/c.2018.6232.1243).

- Jalal Kamali, M. R., Najafi Mirak, T., & Asadi, H. (2012). Wheat: Research and Development Strategies in Iran. Nashr-e-Amoozesh Keshavarzi. 227 p. [In Persian].
- Jambhulkar, N. N., Bose L. K., & Singh O. N. (2014). AMMI stability index for stability analysis. In: Mohapatra, T. (Eds.). CRRRI Newsletter, volume 35(1), 15. Central Rice Research Institute, Cuttack, Orissa.
- Javidfar, F., Alizadeh, B., Amiri Oghan, H., & Sabaghnia, N. (2010). A study of genotype by environment interaction in oilseed rape genotypes using GGE Biplot method. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 41(4), 771-779. [In Persian]. doi: [20.1001.1.20084811.1389.41.4.13.8](https://doi.org/10.1001.1.20084811.1389.41.4.13.8).
- Karadavut, U., Palta, Ç., Kavurmaci, Z., & Bölek, U. (2010). Some grain yield parameters of multienvironmental trials in faba bean (*Vicia faba*) genotypes. *International Journal of Agriculture & Biology*, 12(2), 217-220.
- Karimizadeh, R., Ghogh, H., Hosseinpour, T., Armion, M., Shahbazi K., & Sharifi, P. (2021). Evaluating of the efficiency of AMMI and BLUP models and their integration for identifying high-yielding durum wheat (*Triticum turgidum* L. var. durum) genotypes adapted to warm rainfed regions of Iran. *Iranian Journal of Crop Sciences*, 23(1), 30-48. [In Persian]. doi: [20.1001.1.15625540.1400.23.1.3.7](https://doi.org/10.1001.1.15625540.1400.23.1.3.7).
- Karimizadeh, R., Hosseinpour, T., Alt Jafarby, J., Shahbazi Homonlo, K., Armion, M., & Sharifi, P. (2020). Stability analysis of durum wheat genotypes by GGE Biplot method. *Journal of Crop Breeding*, 12(35), 1-17. [In Persian]. doi: [10.52547/jcb.12.35.1](https://doi.org/10.52547/jcb.12.35.1).
- Karimizadeh, R., Pezeshkpour, P., Mirzaee, A., Barzali, M., Sharifi, P., Khoshkhoy Nilash, E. A., Roshanravan, S., & Safari Motlagh, M. R. (2023). Identification of stable chickpeas under dryland conditions by mixed models. *Legume Science*, 5(4), e206. doi: [10.1002/leg3.206](https://doi.org/10.1002/leg3.206).
- Kempton, R. A. (1984). The use of biplot in interpreting variety by environment interaction. *Journal of Agricultural Science (Cambridge)*, 122(4), 335-342. doi: [10.1017/s0021859600043392](https://doi.org/10.1017/s0021859600043392).
- Khomari, A., Mostafavi, K., & Mohammadi, A. (2018). Evaluation of yield stability of winter barley varieties (*Hordeum vulgare* L.) using additive main effects and multiplicative interaction method. *Journal of Crop Production*, 11(2), 185-195. [In Persian]. doi: [10.22069/ejcp.2018.13567.2043](https://doi.org/10.22069/ejcp.2018.13567.2043).
- Kroonenberg, P. M. (1995). Introduction to biplots for GE tables. Research Report No. 51. University of Queensland, Australia. 22 p. Retrieved from: <https://hdl.handle.net/1887/11604>.
- Koutis, K., G. Mavromatis, A., Baxevanos, D., & Koutsika-Sotiriou, M. (2012). Multienvironmental evaluation of wheat landraces by GGE Biplot Analysis for organic breeding. *Agricultural Sciences*, 3(1), 66-74. doi: [10.4236/as.2012.31009](https://doi.org/10.4236/as.2012.31009).
- Mahdavi, A. M., Babaian Jolodar, N. A., Farshadfar, E., & Bagheri, N. A. (2022). Investigation of grain yield stability of bread wheat genotypes using non-parametric univariate methods and GGE biplot model. *Environmental Stresses in Agricultural Sciences*, 15(2), 287-298. doi: [10.22077/escs.2020.3527.1871](https://doi.org/10.22077/escs.2020.3527.1871).
- Makumbi, D., Diallo, A., Kanampiu, K., Mugo, S., & Karaya, H. (2015). Agronomic performance and genotype × environment interaction of herbicide resistant maize varieties in Eastern Africa. *Crop Science*, 55(4), 540-555. doi: [10.2135/cropsci2014.08.0593](https://doi.org/10.2135/cropsci2014.08.0593).
- Maleia, M. P., Raimundo, A., Moiana, L. D., Teca, J. O., Chale, F., Jamal, E., Dentor, J. N., & Adamugy, B. A. (2017). Stability and adaptability of cotton (*Gossypium hirsutum* L.) genotypes based on AMMI analysis. *Australian Journal of Crop Science*, 11(04), 367-372. doi: [10.21475/ajcs.17.11.04.pne60](https://doi.org/10.21475/ajcs.17.11.04.pne60).
- Mohammadi, R., & Amri, A. (2013). Genotype × environment interaction and genetic improvement for yield and yield stability of rainfed durum wheat in Iran. *Euphytica*, 192, 227-249. <https://doi.org/10.1007/s10681-012-0839-1>.
- Mohammadi, R., Armion, M., Sadeghzadeh, B., Golkari, S., Khalilzadeh, G., Ahmadi, H., Abedi-Asl, G., & Eskandari, M. (2016). Assessment of grain yield stability and adaptability of rainfed durum wheat breeding lines. *Applied Field Crops Research*, 29(4), 25-42. [In Persian]. doi: [10.22092/aj.2017.102141.1037](https://doi.org/10.22092/aj.2017.102141.1037).
- Mostafavi, K., Hosseini Imeni S., & Firoozi, M. (2014). Stability analysis of grain yield in lines and cultivars of rice (*Oriza sativa* L.) using AMMI (Additive main effects and multiplicative interaction) Method. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 45(3), 445 -452. [In Persian]. doi: [10.22059/IJFCS.2014.53540](https://doi.org/10.22059/IJFCS.2014.53540).

- Najafi Mirak, T., Agae Sarbarzeh, M., Moayedi, A., Kaffashi, A., & Sayahfar, M. (2021). Yield stability analysis of durum wheat genotypes using AMMI method. *Journal of Agricultural Science & Sustainable Production*, 31(2), 17-28. [In Persian]. doi: [10.22034/saps.2021.13087](https://doi.org/10.22034/saps.2021.13087).
- Olivoto, T. (2019). Metan: Multi environment trials analysis. R package version 1.1.0. Retrieved 24 June 2019, from: <https://github.com/TiagoOlivoto/metan>. doi: [10.1101/2020.01.14.906750](https://doi.org/10.1101/2020.01.14.906750).
- Omrani, A., Omrani, S., Khodarahmi, M., Shojaei, S. H., Illés, Á., Bojtor, C., Mousavi, S. M. N., & Nagy, J. (2022). Evaluation of grain yield stability in some selected wheat genotypes using AMMI and GGE Biplot methods. *Agronomy*, 12, 1130, 1-14. doi: [10.3390/agronomy12051130](https://doi.org/10.3390/agronomy12051130).
- Omrani, S., Mohammad Naji, A., & Esmaeilzadeh Moghaddam, M. (2017). Yield stability analysis of promising bread wheat lines in southern warm and dry agroclimatic zone of Iran using GGE biplot model. *Journal of Crop Breeding*, 23(9), 157-165. [In Persian]. doi: [10.29252/jcb.9.23.157](https://doi.org/10.29252/jcb.9.23.157).
- Pouresmael, M., Kanouni, H., Hajihassani, M., Astraki, H., Mirakhorli, A., Nasrollahi, M., & Mozaffari, J. (2018). Stability of chickpea (*Cicer arietinum* L.) landraces in national plant gene bank of Iran for drylands. *Journal of Agricultural Science & Technology*, 20(2), 387-400. doi: [20.1001.1.16807073.2018.20.2.13.7](https://doi.org/20.1001.1.16807073.2018.20.2.13.7).
- Purchase, J. L., Hatting, H., & Van Deventer, C. S. (2000). Genotype × environment interaction of winter wheat in South Africa: II. Stability analysis of yield performance. *South African Journal of Plant & Soil*, 17(3), 101-107. doi: [10.1080/02571862.2000.10634878](https://doi.org/10.1080/02571862.2000.10634878).
- Raju, B. M. K. (2002). A study on AMMI model and its biplots. *Journal of the Indian Society of Agricultural Statistics*, 55(3), 297-322.
- Rao, A. R., & Prabhakaran, V. T. (2005). Use of AMMI in simultaneous selection of genotypes for yield and stability. *Journal of the Indian Society of Agricultural Statistics*, 59(1), 76-82.
- Rodriguez, M., Rau, D., & Papa, R. (2007). Genotype by environment interactions in barley (*Hordeum vulgare* L.): different responses of landraces, recombinant inbred lines and varieties to Mediterranean environment. *Euphytica*, 163, 231-247. doi: [10.1007/s10681-007-9635-8](https://doi.org/10.1007/s10681-007-9635-8).
- Roy, D. (2000). *Plant Breeding: Analysis and Exploitation of Variation*. Alpha Science International, UK. 701 p.
- Sadeghzadeh Ahari, D., Hosseini, S. K., Hosseinpour, T., Jafarbay, J., Khalilzade, G., & Alizade Disaj, K. (2005). Study on adaptability and stability of grain yield in durum wheat lines in warm and semi-warm dryland areas. *Seed & Plant Journal*, 21(4), 561-576. [In Persian]. doi: [10.22092/spj.2017.110660](https://doi.org/10.22092/spj.2017.110660).
- Saeidnia, F., Taherian, M., & Nazeri, S. M. (2023). Graphical analysis of multi-environmental trials for wheat grain yield based on GGE-biplot analysis under diverse sowing dates. *BMC Plant Biology*, 23, 198. doi: [10.1186/s12870-023-04197-9](https://doi.org/10.1186/s12870-023-04197-9).
- Scapim, C. A., Oliveira, V. R., Braccini, A. L., Cruz, C. D., Andrade, C. A. B., & Vidigal, C. G. M. (2000). Yield stability in maize (*Zea mays* L.) and correlations among the parameters of the Eberhart and Russell, Lin and Binns and Huehn models. *Genetics & Molecular Biology*, 23(2), 387-393. doi: [10.1590/s1415-47572000000200025](https://doi.org/10.1590/s1415-47572000000200025).
- Sneller, C. H., Kilgore-norquest, L., & Dombek, D. (1997). Repeatability of yield stability statistics in soybean. *Crop Science*, (2), 383-390. doi: [10.2135/cropsci1997.0011183x003700020013x](https://doi.org/10.2135/cropsci1997.0011183x003700020013x).
- Suresh, N., & Bishnoi, O. P. (2020). GGE Biplot based stability analysis of durum wheat genotypes using statistical package GGE Biplot GUI. *International Journal of Agriculture, Environment & Biotechnology*, 13(2), 149-153. doi: [10.30954/0974-1712.02.2020.5](https://doi.org/10.30954/0974-1712.02.2020.5).
- Taherian, M., Bihanta, M. R., Peyghambari, S. A., Alizadeh, H., & Rasoulnia, A. (2019). Stability analysis and selection of salinity tolerant barley genotypes. *Journal of Crop Breeding*, 11(29), 93-103. [In Persian]. doi: [20.1001.1.22286128.1398.11.29.7.3](https://doi.org/20.1001.1.22286128.1398.11.29.7.3).
- Tarakanovas, P., & Ruzgas, V. (2006). Additive main effect and multiplicative interaction analysis of grain yield of wheat varieties in Lithuania. *Agronomy Research*, 4(1), 91-98. doi: [10.4236/ajps.2023.144035](https://doi.org/10.4236/ajps.2023.144035).
- Valizadeh, M., & Moghaddam, M. (2010). *Experimental Designs in Agriculture*. 4th Edition. Privar Publishers, Tabriz, Iran.
- Yan, W. (2011). GGE biplot vs. AMMI graphs for genotype-by-environment data analysis. *Journal of the Indian Society of Agricultural Statistics*, 65, 181-193.
- Yan, W. (2021). A systematic narration of some key concepts and procedures in plant breeding. *Frontiers in Plant Science*, 12, 724517. doi: [10.3389/fpls.2021.724517](https://doi.org/10.3389/fpls.2021.724517).

- Yan, W., Cornelius, P. L., Crossa, J., & Hunt, L. A. (2001). Two type of GGE bipots for analyzing multi-environmental trial data. *Crop Science*, 41(3), 656-663. doi: [10.2135/cropsci2001.413656x](https://doi.org/10.2135/cropsci2001.413656x).
- Yan, W., & Hunt, L. A. (2001). Interpretation of genotype \times environment interaction for winter wheat yield in Ontario. *Crop Science*, 41(1), 19-25. doi: [10.2135/cropsci2001.41119x](https://doi.org/10.2135/cropsci2001.41119x).
- Yan, W., Hunt, L. A., Sheng, Q., & Szlavnic, Z. (2000). Cultivar evaluation and mega- environment investigation based on the GGE Biplot. *Crop Science*, 40(3), 597-605. doi: [10.2135/cropsci2000.403597x](https://doi.org/10.2135/cropsci2000.403597x).
- Yan, W., & Kang, M. (2002). GGE Biplot Analysis: A Graphical Tool for Breeders, Geneticists, and Agronomists. CRC Press, Boca Raton, FL, USA. doi: [10.1201/9781420040371](https://doi.org/10.1201/9781420040371).
- Yan, W., Kang, M. S., Ma, B., Woods, S., & Cornelius, P.L. (2007). GGE biplot vs. AMMI analysis of genotype by environment data. *Crop Science*, 47(2), 643-655. doi: [10.2135/cropsci2006.06.0374](https://doi.org/10.2135/cropsci2006.06.0374).
- Yan, W., Pageau, D., Frégeau-Reid, J. A., & Durand, J. (2011). Assessing the representativeness and repeatability of test locations for genotype evaluation. *Crop Science*, 51(4), 1603-1610. doi: [10.2135/cropsci2011.01.0016](https://doi.org/10.2135/cropsci2011.01.0016).
- Yan, W., & Tinker, N. A. (2006). Biplot analysis of multi-environment trial data: Principles and applications. *Canadian Journal of Plant Science*, 86(3), 623-645. doi: [10.4141/P05-169](https://doi.org/10.4141/P05-169).
- Zali, H., Farshadfar, E., Sabaghpour, S. H., & Karimizadeh, R. (2012). Evaluation of genotypexenvironment interaction in chickpea using measures of stability from AMMI model. *Annals of Biological Research*, 3(7), 3126-3136.
- Zhang, Z., Lu C., & Xiang, Z. (1998). Analysis of variety stability based on AMMI model. *Acta Agronomica Sinica*, 24(3), 304-309. [In Chinese].
- Zobel, R. W., Wright, A. J., & Gauch, H. G. (1988). Statistical analysis of a yield trial. *Agronomy Journal*, 80(3), 388-393. doi: [10.2134/agronj1988.00021962008000030002x](https://doi.org/10.2134/agronj1988.00021962008000030002x).