



Yield stability of bread wheat genotypes using AMMI and GGE biplot analysis

Mahdi Ehyaei¹, Khodadad Mostafavi^{2*}, Farshad Bakhtiar³ and Abdollah Mohammadi⁴

1. Ph.D. Student, Department of Agronomy and Plant Breeding, Karaj Branch, Islamic Azad University, Karaj, Iran
2. Associate Professor, Department of Agronomy and Plant Breeding, Karaj Branch, Islamic Azad University, Karaj, Iran (*Corresponding author: mostafavi@kiaau.ac.ir)
3. Research Associate Professor, Seed and Plant Improvement Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran
4. Associate Professor, Department of Agronomy and Plant Breeding, Karaj Branch, Islamic Azad University, Karaj, Iran

Comprehensive abstract

Introduction

Production of high-yielding and stable cultivars is the most important objective of crop breeding programs, including wheat. The final yield of each plant is determined by the potential of genotype (G), the effect of environment (E) and the interaction effect of genotype \times environment (GE). Several methods have been presented to study the genotype \times environment interaction and determine stable genotypes, which can totally be divided into two main categories, univariate and multivariate. Univariate methods do not provide a complete view of the complex and multidimensional nature of GE interaction, therefore, the use of multivariate methods is suggested to solve this problem. Among the multivariate methods, AMMI and GGE-Biplot methods are more important. The objective of the current experiment was to investigate the interaction between genotype and environment for grain yield of 20 wheat genotypes and to identify stable and high-yielding genotypes.

Materials and methods

The plant materials of this experiment were 20 wheat genotypes including 18 irrigated wheat lines along with two control cultivars, Rakhshan and Baharan. The experiment was carried out in a randomized complete block design with three replications in five temperate regions (Karaj, Kermanshah, Zarghan, Boroujerd and Mashhad stations) during two cropping years 2019-2020. Two multivariate methods, AMMI and GGE-Biplot, were used to investigate the interaction effect of genotype \times environment and to evaluate the stability of genotypes. R software was used to analyze the experimental data using the AMMI method, and Genstat software was used to analyze the data using the GGE biplot graphic method.

Research findings

The results of combined analysis of variance showed that the interaction effect of genotype \times year and genotype \times year \times location were significant at the 1% probability level. Based on the results of AMMI analysis, the effect of environment, genotype and genotype \times environment interaction were significant. Based on AMMI1 and AMMI2 models, AMMI stability value (ASV) parameter and genotype stability index (GSI), genotype 12 with an average grain yield of 8.27 tons per hectare was determined as the best genotype. The study of GGE-biplot polygon led to the identification of three mega-environments, that Boroujerd had the highest power of representation and differentiation among different environments. Genotypes 12 and 9, in addition to having high yield, had higher yield stability. Genotypes 12 and 9 were placed in the center of the circle as the ideal genotype and



genotypes 5, 7 and 18 were ranked next. Based on the results of both methods, genotype 12 was identified as the most stable genotype.

Conclusion

The results of AMMI, AMMI stability index (ASV) and genotype stability index (GSI) compared to GGE biplot results showed that all these indices have a good potential to evaluate the performance stability of genotypes. Nevertheless, GGE biplot results are more effective and practical in examining the compatibility and stability of genotypes' performance in different environments due to the ease of interpreting graphical results.

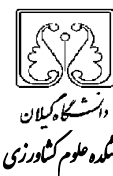
Keywords: AMMI stability value, Bread wheat, Genotype \times environment interaction, Ideal genotype, Mega environment

Received: May 7, 2022

Accepted: August 10, 2022

Cite this article:

Ehyaie, M., Mostafavi, Kh., Bakhtiar, F. and Mohammadi, A. 2022. Yield stability of bread wheat genotypes using AMMI and GGE biplot analysis. *Cereal Research* 12 (2): 147-165.



پایداری عملکرد ژنوتیپ‌های گندم نان با استفاده از تجزیه AMMI و GGE بای پلات

مهدی احيائي^۱، خداداد مصطفوی^{۲*}، فرشاد بختیار^۳ و عبدالله محمدی^۴

۱- دانشجوی دکتری، گروه زراعت و اصلاح نباتات، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران

۲- دانشیار، گروه زراعت و اصلاح نباتات، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران (* نویسنده مسئول: mostafavi@kiau.ac.ir)

۳- دانشیار پژوهش، موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران

۴- دانشیار، گروه زراعت و اصلاح نباتات، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران

چکیده جامع

مقدمه: تولید ارقام دارای عملکرد بالا و پایدار مهم‌ترین هدف برنامه‌های اصلاحی محصولات زراعی از جمله گندم می‌باشد. عملکرد نهایی هر محصول به وسیله پتانسیل ژنوتیپ (G)، اثر محیط (E) و اثر متقابل ژنوتیپ × محیط (GE) تعیین می‌شود. روش‌های متعددی برای مطالعه اثر متقابل ژنوتیپ × محیط و تعیین ژنوتیپ‌های پایدار ارائه شده است که به‌طور کلی می‌توان آنها را به دو دسته اصلی تک‌متغیره و چندمتغیره تقسیم کرد. روش‌های تک‌متغیره تصویر کاملی از ماهیت پیچیده و چندبعدی اثر متقابل GE ارائه نمی‌کنند، از این‌رو استفاده از روش‌های چندمتغیره برای رفع این مشکل پیشنهاد شده است. در بین روش‌های چندمتغیره، دو روش AMMI و GGE-Biplot از اهمیت بیش‌تری برخوردار هستند. هدف از این آزمایش، بررسی اثر متقابل ژنوتیپ × محیط برای عملکرد دانه ۲۰ ژنوتیپ گندم و شناسایی ژنوتیپ‌های پایدار و پر محصول بود.

مواد و روش‌ها: مواد گیاهی این آزمایش، ۲۰ ژنوتیپ گندم نان شامل ۱۸ لاین گندم آبی و دو رقم شاهد رخشان و بهاران بود که به‌منظور بررسی پایداری عملکرد دانه، در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در پنج ایستگاه منطقه معتدل کشور (کرج، کرمانشاه، زرکان، بروجرد و مشهد) طی دو سال زراعی ۱۳۹۸-۱۳۹۹ مورد ارزیابی قرار گرفتند. برای بررسی اثر متقابل ژنوتیپ × محیط و ارزیابی پایداری ژنوتیپ‌ها، از دو روش چندمتغیره AMMI و GGE-Biplot استفاده شد. از نرم‌افزار R برای تجزیه داده‌های آزمایش به روش AMMI و رسم نمودارهای مربوطه و از نرم‌افزار Genstat برای تجزیه داده‌ها به روش گرافیکی GGE بای پلات استفاده شد.

یافته‌های تحقیق: نتایج تجزیه واریانس مرکب داده‌ها نشان داد اثر متقابل ژنوتیپ × سال و ژنوتیپ × سال × مکان در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بودند. بر اساس نتایج تجزیه AMMI اثر محیط، ژنوتیپ و اثر متقابل ژنوتیپ × محیط معنی‌دار بودند. بر اساس دو مدل AMMI₁، AMMI₂، پارامتر ارزش پایداری AMMI (ASV) و شاخص انتخاب پایداری (GSI) ژنوتیپ ۱۲ با عملکرد ۸/۲۷ تن در هکتار به عنوان بهترین ژنوتیپ تعیین شد. بررسی چند ضلعی GGE بای پلات منجر به شناسایی سه ابرمحیط شد که در بین این محیط‌ها، محیط بروجرد بیشترین قدرت نمایندگی و تمایزکنندگی را در بین محیط‌های مختلف داشت. ژنوتیپ‌های شماره ۱۲ و ۹ علاوه بر داشتن عملکرد بالا از پایداری عملکرد بالاتری برخوردار بودند. ژنوتیپ‌های شماره ۱۲ و ۹ نزدیکترین ژنوتیپ‌ها به ژنوتیپ ایده‌آل (ژنوتیپ مطلوب و پایدار) بودند و ژنوتیپ‌های ۵، ۷ و ۱۸

بعد از آن در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. بر اساس نتایج حاصل از هر دو روش ژنوتیپ ۱۲ به عنوان پایدارترین ژنوتیپ شناسایی شد.

نتیجه‌گیری: نتایج AMMI، شاخص پایداری امی (ASV) و شاخص پایداری ژنوتیپ (GSI) در مقایسه با نتایج GGE بای‌پلات نشان داد تمامی این شاخص‌ها از پتانسیل خوبی برای ارزیابی پایداری عملکرد ژنوتیپ‌ها برخوردار هستند، با این وجود نتایج GGE بای‌پلات در بررسی سازگاری و پایداری عملکرد ژنوتیپ‌ها در محیط‌های مختلف به دلیل سهولت در تفسیر نتایج گرافیکی کارآتر و کاربردی‌تر می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: ابرمحیط، اثر متقابل ژنوتیپ × محیط، پارامتر ارزش پایداری، ژنوتیپ ایده‌آل، گندم نان

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۱۹

نحوه استناد به این مقاله:

احیائی، مهدی، مصطفوی، خداداد، بختیار، فرشاد و محمدی، عبدالله. ۱۴۰۱. پایداری عملکرد ژنوتیپ‌های گندم نان با استفاده از تجزیه AMMI و GGE بای‌پلات. تحقیقات غلات ۱۲ (۲): ۱۶۵-۱۴۷.

مقدمه

غلات و تولیدات آن بخش اصلی اکثر رژیم‌های غذایی انسان در کشورهای توسعه‌یافته و در حال توسعه هستند که بخش عمده‌ای از انرژی و مواد مغذی رژیم غذایی را تشکیل می‌دهند. (Laskowski *et al.*, 2019). در بین غلات، گندم (*Triticum aestivum* L.) یکی از مهم‌ترین محصولات غذایی در سرتاسر جهان است که از لحاظ سطح زیر کشت و میزان تولید رتبه دوم را در بین گیاهان مختلف زراعی دارا می‌باشد (FAOSTAT, 2022). گندم ۳۰ درصد از غلات تولیدی جهان را شامل می‌شود، در حالی که ۵۵ درصد کربوهیدرات و ۲۰ درصد کالری مصرفی جهان را تأمین می‌کند (Enghiad *et al.*, 2017). امروزه افزایش تولید گندم به‌خاطر مواجه شدن با تقاضای بیشتر در نتیجه رشد جمعیت در بسیاری از کشورها هنوز یک چالش است (Guo *et al.*, 2020). عملکرد جهانی غلات از سال ۱۹۶۱ تا سال ۲۰۰۷ از ۸۷۷ میلیون تن به ۲۳۵۱ میلیون تن افزایش یافت، اما برای برآورد تقاضای جمعیت در سال ۲۰۵۰ باید به ۴۰۰۰ میلیون تن افزایش یابد (Friedli *et al.*, 2019). این بدان معنی است که افزایش فعلی سالانه ۳۲ میلیون تن گندم، باید ۳۷ درصد دیگر افزایش یابد و به افزایش ۴۴ میلیون تن در سال برسد.

میانگین عملکرد گندم در دنیا نزدیک به ۳۰ تا ۶۰ درصد حداکثر عملکرد قابل حصول می‌باشد که این تفاوت به‌طور عمده ناشی از تنش‌های محیطی و به‌ویژه خشکی است (Daryanto *et al.*, 2016). تغییرات آب و هوایی یا به‌طور کلی تغییر در محیط را می‌توان یکی از مهم‌ترین دلایل چالش در امنیت غذایی دانست که می‌تواند عوامل دیگر را به‌شدت تحت تأثیر قرار دهد. معرفی ژنوتیپ‌های با عملکرد بالا و پایدار و متحمل به خشکی یکی از اهداف مهم امروزی برای هماهنگی با افزایش جمعیت جهان است (Singh *et al.*, 2019). عملکرد نهایی هر محصول به وسیله پتانسیل ژنوتیپ (G)، اثر محیط (E) و اثر متقابل ژنوتیپ × محیط (GE) تعیین می‌شود (Yan and Kang, 2002). بر همین اساس در سازگاری و پایداری عملکرد، اثر متقابل ژنوتیپ × محیط جنبه مهمی است که باید مد نظر قرار داده شود (Rahmati *et al.*, 2021).

چنانچه اثر متقابل ژنوتیپ × محیط وجود داشته باشد، اصلاح‌گران باید ژنوتیپ‌های پایدار را با عملکرد نسبتاً ثابت در طیف وسیعی از محیط‌ها شناسایی کنند

(Mohammadi *et al.*, 2015). روش‌های متعددی برای مطالعه اثر متقابل ژنوتیپ × محیط و تعیین ژنوتیپ‌های پایدار ارائه شده است (Neyman 1932; Yates and Cochran 1938; Mather and Jones 1958; Finlay and Wilkinson 1963; Eberhart and Russell 1986; Wricke and Weber 1966). این روش‌ها به دو دسته اصلی تک‌متغیره و چندمتغیره تقسیم می‌شوند. از آنجایی که روش‌های تک‌متغیره تصویر کاملی از ماهیت پیچیده و چندبعدی اثر متقابل ارائه نمی‌کنند، از این روش استفاده از روش‌های چندمتغیره برای رفع این مشکل پیشنهاد شده است (Ali Pour *et al.*, 2019).

در میان روش‌های چندمتغیره مدل اثرات اصلی جمع‌پذیر و اثر متقابل ضرب‌پذیر (AMMI=Additive Main Effect and Multiplicative Interaction) و مدل بای‌پلات GGE (GGE=Genotype + Genotype×Environment Interactions) از اهمیت بالایی برخوردار هستند. روش AMMI (Gauch and Zobel, 1997) 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 (Gauch, 1992) و بخش دوم آن که قسمت ضرب‌پذیر مدل AMMI است از روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی به‌منظور تجزیه اثر متقابل ژنوتیپ × محیط به یک تا n مؤلفه اصلی استفاده می‌کند (Gauch and Zobel, 1997). از جمله مزایای تجزیه AMMI تفکیک بالای اثرات اصلی و اثر متقابل ژنوتیپ × محیط است، زیرا بخش بزرگی از مجموع مربعات اثر متقابل ژنوتیپ × محیط را محاسبه می‌کند و اغلب تفسیر معنی‌دار آگرونومیکی از داده‌ها دارد (Gauch, 1992; Ebdon and Gauch, 2006; Farshadfar and Sutka, 2002). با استفاده از این روش می‌توان ژنوتیپ‌های با سازگاری و پایداری عمومی و خصوصی را تعیین کرد (Gauch and Zobel, 1988). در مطالعات زیادی سودمندی و اعتبار روش AMMI در محصولات مختلف گزارش شده است (Abay and Bjørnstad, 2009; Alwala *et al.*, 2010; Annicchiarico *et al.*, 2010; Ghaed-Rahimi *et al.*, 2015; Liersch *et al.*, 2020; Bocianowski *et al.*, 2021; Verma, 2021).

در روش گرافیکی GGE-biplot بر خلاف سایر روش‌های رایج، گزینش‌ها و تصمیمات بر مبنای تجزیه گرافیکی اطلاعات انجام می‌گیرد. این روش دارای

مواد و روش‌ها

آزمایش حاضر طی دو سال زراعی ۹۹-۱۳۹۸ و ۱۴۰۰-۱۳۹۹ در پنج ایستگاه منطقه معتدل کشور (کرج، کرمانشاه، زرقان، بروجرد و مشهد) انجام شد. تعداد ۲۰ ژنوتیپ گندم شامل ۱۸ لاین امیدبخش گندم آبی در کنار دو رقم شاهد رخشان و بهاران در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در هر منطقه تحت مطالعه قرار گرفتند. ابعاد هر کرت آزمایشی ۳/۶ متر مربع بود. عملیات خاک‌ورزی در شهریور ماه انجام و کاشت آزمایش‌ها در اواخر مهر ماه انجام شد. مراحل آماده‌سازی زمین شامل اجرای عملیات شخم، دیسک، لولر و کودپاشی بود. جهت کودپاشی از ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار کود اوره، مقدار ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار کود فسفات آمونیوم و ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار کود سولفات پتاس در هنگام کاشت و ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار کود اوره به عنوان کود سرک در ابتدای شروع مرحله طویل شدن ساقه استفاده شد. در طول فصل زمستان مراقبت‌های لازم صورت گرفته و در بهار عملیات مبارزه با علف‌های هرز و آفات مهم نظیر سن گندم انجام شد. مبارزه با علف‌های هرز پهن برگ با علفکش گران‌استار به میزان ۲۰ گرم در هکتار و مبارزه با علف‌های هرز باریک برگ با علفکش Puma super به میزان ۱/۲ لیتر در هکتار در مرحله پنجه‌زنی تا شروع ساقه رفتن انجام شد. پس از برداشت، عملکرد دانه اندازه‌گیری و بر حسب تن در هکتار محاسبه شد.

پس از انجام آزمون بارتلت به‌منظور بررسی همگنی واریانس‌ها و ارزیابی نرمال بودن خطاهای آزمایشی، تجزیه واریانس مرکب انجام شد. از روش‌های تجزیه پایداری چندمتغیره AMMI و GGE بای‌پلات نیز جهت مطالعه برهمکنش ژنوتیپ و محیط استفاده شد. داده‌ها به‌منظور انجام تجزیه پایداری به روش AMMI طبق مدل زیر استفاده شد:

$$Y_{ger} = \mu + \alpha_g + \beta_c + \sum_n \lambda_n \alpha_{gn} \gamma_{en} + \rho_{ge} + \varepsilon_{ge} \quad (1)$$

در این رابطه، Y_{ger} عملکرد ژنوتیپ g در محیط e در تکرار r ، μ میانگین کل آزمایش، α_g و β_e به‌ترتیب اثرات اصلی ژنوتیپ و محیط، λ_n مقدار ویژه برای محور مؤلفه اصلی n ام، α_{gn} بردار ویژه ژنوتیپ برای محور g ام از n مؤلفه اصلی برهمکنش، γ_{en} بردار ویژه محیط برای محور e ام از n مؤلفه اصلی برهمکنش، ρ_{ge} مقدار نویز و ε_{ge} باقیمانده‌ها یا خطا می‌باشد. با انجام تجزیه واریانس

قابلیت‌های فراوان، سهولت و دقت بیش‌تر در انجام تجزیه‌ها و سادگی در تفسیر خروجی‌ها است (Yan, 2016; Bhartiya et al., 2017). مدل گرافیکی بای‌پلات GGE بر اساس تجزیه به مؤلفه‌های اصلی پیشنهاد شده است (Yan et al., 2000). این مدل به‌طور هم‌زمان عملکرد و پایداری ژنوتیپ‌ها را ارزیابی، محیط‌ها را به یک یا چند ابرمحیط (Mega-environments) دسته‌بندی و محیط‌های مطلوب برای ژنوتیپ‌های خاص را تعیین می‌کند. روش GGE را می‌توان برای برآورد اثر GY و پایداری ژنوتیپ‌ها به صورت سال به سال و یا طی چند سال به کار برد (Dallo et al., 2019). این روش برای ارزیابی صفات در محیط‌های مختلف در چندین محصول زراعی از جمله گندم (Silva et al., 2015; Wardofa et al., 2019)، گندم دوروم (Karimizadeh et al., 2021)، یولاف (Chen et al., 2016; Li et al., 2017; Hosseini et al., 2017)، برنج (Sanchez-Martin et al., 2021) و سویا (Bhartiya et al., 2019; Santos et al., 2019; Rezene, 2019)، مورد استفاده قرار گرفته است.

صادق‌زاده و همکاران (Sadeghzadeh et al., 2017) با مطالعه پایداری و سازگاری لاین‌های گندم دوروم با استفاده از روش AMMI و GGE بای‌پلات، استفاده از این دو روش را در انتخاب ژنوتیپ‌های پایدار و پر محصول بین لاین‌های پیشرفته نسبت به ارقام شاهد کارآمد توصیف کرده و لاین‌های مطلوب برای مناطق سرد مورد بررسی را با استفاده از این روش‌ها تعیین کردند. انیو و همکاران (Enyew et al., 2021) از این دو روش برای تعیین ژنوتیپ‌های مطلوب از بین ۳۲۰ توده سورگوم در سه محیط در اتیوپی استفاده کردند و در نهایت پنج ژنوتیپ (G148, G123, G110, G203 و G73) را به‌عنوان ژنوتیپ‌های پر محصول و پایدار در محیط‌های آزمایش معرفی کردند.

در مطالعه حاضر نیز اثر متقابل ژنوتیپ \times محیط برای عملکرد دانه ۲۰ ژنوتیپ گندم نان که طی دو سال در پنج منطقه مورد ارزیابی قرار گرفتند، با استفاده از دو روش AMMI و بای‌پلات GGE بررسی شد. هدف از آزمایش نیز شناسایی و گزینش ژنوتیپ‌های پر محصول و پایدار گندم برای هر یک از محیط‌ها و نیز برای تمامی محیط‌های مورد مطالعه بود.

AMMI مقادیر مؤلفه‌های اصلی برای هر ژنوتیپ و محیط به‌دست آمد و با رسم بای‌پلات آن‌ها، سازگاری عمومی و خصوصی ژنوتیپ‌ها تعیین شد.

همچنین آماره ASV یا ارزش پایداری امی (AMMI Stability Value) با استفاده از رابطه (۲) محاسبه شد:

$$ASV = \sqrt{\left[\frac{SSIPCA_1}{SSIPCA_2} (IPCA_1) \right]^2 + (IPCA_2)^2} \quad (2)$$

در این رابطه، $SSIPCA_1$ و $SSIPCA_2$ به ترتیب مجموع مربعات مؤلفه‌های اصلی برهمکنش اول و دوم و $IPCA_1$ و $IPCA_2$ به ترتیب مقادیر مؤلفه اصلی اول و دوم برهمکنش برای هر یک از ژنوتیپ‌ها است. شاخص انتخاب پایداری (GSI) با استفاده از رابطه (۳) محاسبه شد:

$$GSI = RASV + Ry_i \quad (3)$$

که در آن، Ry رتبه میانگین عملکرد ژنوتیپ‌ها و $RASV$ رتبه ارزش پایداری امی می‌باشد.

تجزیه گرافیکی با استفاده از روش GGE-biplot بر اساس تجزیه به مقادیر منفرد طبق رابطه (۴) انجام شد:

$$Y_{ij} - \mu - \beta_j = \lambda_1 \xi_{i1} \eta_{j1} + \lambda_2 \xi_{i2} \eta_{j2} + \varepsilon_{ij} \quad (4)$$

در این رابطه Y_{ij} میانگین ژنوتیپ i ام در محیط j ام، μ میانگین کل ژنوتیپ‌ها، β_j اثر اصلی محیط j ام، λ_1 و λ_2 مقادیر ویژه برای اولین و دومین مؤلفه، ξ_{i1} و ξ_{i2} بردارهای ویژه ژنوتیپی، η_{j1} و η_{j2} بردارهای محیطی مؤلفه اول و دوم و ε_{ij} مقدار باقیمانده برای ژنوتیپ i ام در محیط j ام است.

جهت انجام تجزیه واریانس مرکب از نرم‌افزار SAS و برای تجزیه داده‌ها به روش AMMI و رسم نمودارهای مربوطه از نرم‌افزار R استفاده شد. تجزیه گرافیکی GGE بای‌پلات نیز با استفاده از نرم‌افزار Genstat بر اساس شش الگو شامل: ۱. بررسی روابط میان محیط‌ها، ۲. تعیین بهترین ژنوتیپ در هر مکان، ۳. رتبه‌بندی ژنوتیپ‌ها

اساس میانگین عملکرد و پایداری، ۴. رتبه‌بندی محیط‌ها بر اساس محیط ایده‌آل، ۵. رتبه‌بندی ژنوتیپ‌ها بر اساس ژنوتیپ ایده‌آل و ۶. تعیین ابرمحیط‌ها انجام شد.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها در هر محیط نشان داد که اثر ژنوتیپ بر عملکرد دانه در محیط‌های بروجرد سال ۹۸، کرج، کرمانشاه، زرقان و بروجرد سال ۹۹ در سطح احتمال یک درصد و در محیط زرقان سال ۹۸ در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار بود که نشان‌دهنده تنوع بین ژنوتیپ‌ها در این محیط‌ها بود (تجزیه واریانس مربوطه نشان داده نشده است). برای انجام تجزیه واریانس مرکب، ابتدا آزمون یکنواختی واریانس خطاهای آزمایشی با استفاده از آزمون بارتلت انجام گرفت. نتایج حاکی از یکنواخت بودن واریانس اشتباهات آزمایشی و قابل انجام بودن تجزیه واریانس مرکب بود. نتایج تجزیه واریانس مرکب برای عملکرد ژنوتیپ‌ها در سال‌ها و مکان‌های مختلف، تفاوت معنی‌دار بین مکان‌ها، ژنوتیپ‌ها و اثر متقابل ژنوتیپ × مکان را در سطح احتمال پنج درصد و اثر متقابل سال × مکان، ژنوتیپ × سال و ژنوتیپ × سال × مکان را در سطح احتمال یک درصد نشان داد (جدول ۲).

تجزیه واریانس یک مدل افزایشی است که اثرهای اصلی ژنوتیپ و محیط را به‌خوبی تفکیک و معنی‌داری اثر متقابل را نیز مشخص می‌کند، اما در مورد اجزای اثر متقابل، اطلاعاتی ارائه نمی‌دهد. در حالی که روش AMMI اطلاعات کاملی از اثر متقابل ارابه و آن را به اجزای جمع‌پذیر و ضرب‌پذیر تفکیک و سهم هر کدام از اجزا را مشخص می‌کند. از این‌رو تجزیه پایداری ژنوتیپ‌ها به روش AMMI انجام شد.

جدول ۲- تجزیه واریانس مرکب عملکرد دانه ژنوتیپ‌های گندم در پنج مکان و دو سال زراعی

Table 2. Combined analysis of variance for grain yield of wheat genotypes in five locations and two crop years		
Source of variations	df	Mean square
Year	1	4.36 ^{ns}
Location	4	266.57*
Year × Location	4	38.59**
Replication (Year × Location)	20	3.97
Genotype	19	4.47*
Genotype × Year	19	1.99**
Genotype × Location	76	1.72*
Genotype × Year × Location	76	0.96**
Error	380	0.73
CV(%)	-	11.19

^{ns}, * and **: Not-significant and significant at 5% and 1% probability levels, respectively.

توسط اثر متقابل ژنوتیپ × محیط (۱۵/۲۴ درصد) نسبت به تغییرات توجیه شده توسط ژنوتیپ‌ها (۵/۰۹ درصد)، نشان‌دهنده لزوم بررسی اثر متقابل ژنوتیپ × محیط است. به این ترتیب تنوع مشاهده شده در بین ژنوتیپ‌ها در محیط‌های مختلف بیش‌تر ناشی از اثر محیط و اثر متقابل ژنوتیپ × محیط بوده و ژنوتیپ نقش زیادی در این برهمکنش نداشت. به عبارت دیگر، وقتی اثر محیط زیاد و اثر متقابل کم است، به این مفهوم است که ژنوتیپ‌های مورد بررسی دارای پایداری خوبی هستند. کانونی و همکاران (Kanouni *et al.*, 2007) نیز در تحقیقات خود به این نتیجه رسیدند که محیط بیش‌ترین مقدار از مجموع مربعات کل را به خود اختصاص داد که نشان‌دهنده متنوع بودن محیط‌های آزمایش بود. قدرتی نیاری و عبدالشاهی (Ghodrati-Niari and Abdolshahi, 2014) و مؤیدی و همکاران (Moayyedi *et al.*, 2020) نیز با بررسی اثر متقابل ژنوتیپ × محیط گزارش کردند که بخش عمده تنوع کل مربوط به محیط و پس از آن اثر متقابل ژنوتیپ × محیط بود.

معنی‌دار شدن اثر متقابل ژنوتیپ × محیط با توجه به تجزیه واریانس عملکرد دانه بر مبنای روش پایداری AMMI (جدول ۳) حاکی از این بود که ژنوتیپ‌ها در محیط‌های مختلف، عملکرد متفاوتی را نشان داده‌اند و اختلاف بین ژنوتیپ‌ها از یک محیط به محیط دیگر متفاوت بود. بنابراین جهت یافتن ژنوتیپ پایدار و ژنوتیپ مناسب برای محیط‌های خاص، تجزیه و تحلیل اثر متقابل ژنوتیپ × محیط ضروری است. اثر محیط در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد. اختلاف معنی‌دار بین ژنوتیپ‌ها در سطح یک درصد نشان از وجود اختلاف بین ژنوتیپ‌ها در متوسط تمام محیط‌های آزمایش بود. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، ژنوتیپ ۵/۰۹ درصد و محیط ۷۳/۳۷ از مجموع مربعات کل را به خود اختصاص دادند، در حالی که اثر متقابل ژنوتیپ × محیط ۱۵/۲۴ درصد از مجموع مربعات کل را توصیف کرد که حاکی از تفاوت‌های اساسی در پاسخ ژنوتیپی در طول محیط‌ها می‌باشد. به دلیل کشت در سال‌های مختلف (دو سال) و مکان‌های مختلف در هر سال، وجود قسمت بیش‌تر تغییرات مربوط به محیط قابل توجیه است. از طرفی، توجیه سه برابری واریانس کل

جدول ۳- تجزیه واریانس مدل AMMI برای عملکرد دانه ژنوتیپ‌های گندم در پنج مکان طی دو سال زراعی

Table 3. Analysis of variance of AMMI model for grain yield of wheat genotypes in five locations during two years

Source of variation	df	Sum of squares	Percentage of sum of squares	Mean square
Total	599	1669.6	-	-
Treatment	199	1564.50	93.70	142.079**
Environment	9	1225.04	73.37	136.115**
Replication (Environment)	20	79.54	-	3.977
Genotype	19	85.05	5.09	4.476**
Environment × Genotype	171	254.41	15.24	1.488**
IPCA1	27	103.88	40.83	3.847**
IPCA2	25	77.59	30.50	3.103**
Residual	119	72.95	28.67	3.79 ^{ns}
Error	380	279.97		0.737

^{ns} and ^{**} Not-significant and significant at 1% probability level, respectively

خوب مدل را نشان می‌دهد. بنابراین مدل AMMI با دو مؤلفه اصلی در نظر گرفته شد. سهم نسبتاً بالای دو مؤلفه اصلی اول در اثر متقابل ژنوتیپ × محیط در مطالعات دیگر نیز گزارش شده است (Nayak *et al.*, 2008, Akter *et al.*, 2015; Sharifi *et al.*, 2017; Islam *et al.*, 2021; Pour-Aboughadareh *et al.*, 2022). در این تحقیق برای بررسی پایداری ارقام از آماره ارزش پایداری AMMI (ASV) استفاده شد که نتایج آن در جدول ۴ ارائه شده است. در این روش ژنوتیپی پایدار است که دارای

به‌منظور تجزیه اثر متقابل ژنوتیپ × محیط با استفاده از مدل AMMI تجزیه به مؤلفه‌های اصلی روی ماتریس باقی‌مانده‌ها انجام شد که دو مؤلفه اصلی اول اثر متقابل در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بودند. مؤلفه اصلی اول (IPCA1) ۴۰/۸۳ درصد و مؤلفه اصلی دوم (IPCA2) ۳۰/۵۰ درصد و دو مؤلفه در مجموع ۷۱/۳۳ درصد از مجموع مربعات اثر متقابل را توجیه کردند و ۲۸/۶۷ درصد از مجموع مربعات اثر متقابل نیز توسط مؤلفه‌های باقی‌مانده مدل توجیه شد. این مطلب برآزش

پایداری عملکرد ژنوتیپ‌های گندم وجود دارد (Farshadfar *et al.*, 2011; Chimdesa *et al.*, 2019; Poudel *et al.*, 2020). با توجه به اینکه استفاده از این پارامتر برای شناسایی ژنوتیپ‌های برتر با در نظر گرفتن دو جنبه عملکرد بالا و پایداری آن به صورت همزمان توجه می‌شود، شناس گزینش ژنوتیپ‌های با عملکرد پایین، اما پایدار ممکن است کاهش یابد (Farshadfar, 2008). بر اساس شاخص GSI هر چه مقدار این شاخص کم‌تر باشد، ژنوتیپ پایدارتر بوده و عملکرد بالاتری دارد. در این آزمایش ژنوتیپ‌های ۱۲ و ۹ کم‌ترین مقدار این شاخص را دارا بودند و به‌عنوان ژنوتیپ‌های پایدار با عملکرد بالا معرفی شدند. ژنوتیپ‌های ۲ و ۱۵ نیز بالاترین مقدار GSI را داشتند و به‌عنوان ژنوتیپ‌های ناپایدار با عملکرد نامطلوب تعیین شدند.

ASV کم‌تری باشد. نتایج این روش نشان داد که ژنوتیپ‌های ۲۰، ۱۲، ۱۱، ۱۳ و ۴ کم‌ترین مقدار ASV را داشتند، اما از بین آن‌ها ژنوتیپ ۱۲ دارای عملکرد بالاتری از میانگین کل بود و بنابراین به‌عنوان ژنوتیپ پایدار با عملکرد بالا شناخته شد. همچنین ژنوتیپ ۸ با داشتن بالاترین ASV، ناپایدارترین ژنوتیپ شناخته شد و ژنوتیپ‌های ۶، ۵ و ۲ به‌ترتیب بعد از آن قرار گرفتند. کریمی‌زاده و همکاران (Karimizadeh *et al.*, 2013) برای بررسی اثر متقابل ژنوتیپ × محیط با استفاده از روش AMMI برای ۱۰ ژنوتیپ ذرت از چهار پارامتر SIPC4، AMGE4، ASV و EV4 استفاده کردند. آن‌ها از بین پارامترهای مدل AMMI پارامتر ASV را به‌علت صحت نتایج مربوط به آن به‌عنوان بهترین پارامتر معرفی کردند. در سایر تحقیقات نیز گزارش‌هایی مبنی بر استفاده از پارامتر ASV به‌عنوان یک معیار مفید برای تعیین

جدول ۴- میانگین عملکرد، مقادیر مؤلفه‌های اصلی اول و دوم، ارزش پایداری AMMI (ASV) و شاخص پایداری ژنوتیپ با استفاده از روش AMMI در ژنوتیپ‌های گندم نان

Table 4. Average yield, first and second principal component values, AMMI stability value (ASV) and genotype stability index (GSI) using AMMI method in bread wheat genotypes

Genotype number	Average grain yield in Broujerd (t/ha)	Average grain yield in Karaj (t/ha)	Average grain yield in Kermanshah (t/ha)	Average grain yield in Mashhad (t/ha)	Average grain yield in Zarghan (t/ha)	Total mean of grain yield (t/ha)	IPCA ₁	IPCA ₂	ASV	GSI
1	9.364	7.383	7.309	6.993	7.235	7.657	-0.565	0.152	0.772	18
2	9.355	7.151	7.813	6.561	6.302	7.436	-0.873	0.131	1.176	30
3	9.909	6.738	7.371	6.926	6.812	7.551	-0.560	0.824	1.114	26
4	9.648	6.417	7.120	6.064	6.978	7.245	-0.328	-0.058	0.444	24
5	12.025	6.981	7.716	6.410	7.894	8.205	0.544	1.167	1.376	22
6	11.190	6.738	7.141	6.049	8.549	7.933	0.982	0.482	1.401	25
7	12.039	7.457	7.726	5.963	8.043	8.245	0.819	0.213	1.118	19
8	11.029	6.908	7.245	5.706	8.220	7.821	1.043	-0.234	1.416	27
9	10.944	7.824	7.723	6.903	8.545	8.387	0.182	0.456	0.518	8
10	10.375	6.739	7.018	7.361	6.659	7.630	-0.367	-0.218	0.508	15
11	9.547	6.714	7.372	5.997	7.245	7.375	-0.213	0.046	0.289	18
12	10.950	7.756	7.914	6.911	7.863	8.278	-0.077	-0.198	0.223	4
13	9.703	6.910	7.240	6.706	7.427	7.597	-0.243	0.115	0.346	14
14	9.513	6.663	7.764	6.279	6.661	7.376	0.226	-0.838	0.891	26
15	9.841	6.318	7.971	5.282	7.256	7.333	0.419	0.877	1.041	31
16	9.628	6.851	7.688	6.789	6.559	7.503	-0.707	0.262	0.982	25
17	9.375	6.886	7.772	5.558	7.075	7.333	0.085	-0.816	0.824	29
18	10.658	7.315	7.560	6.397	8.241	8.034	0.408	-0.320	0.634	14
19	9.916	6.789	7.672	6.011	6.338	7.345	-0.413	-0.193	0.585	24
20	9.107	6.064	7.413	5.801	7.148	7.106	-0.064	-0.188	0.206	21
Total mean						7.669				

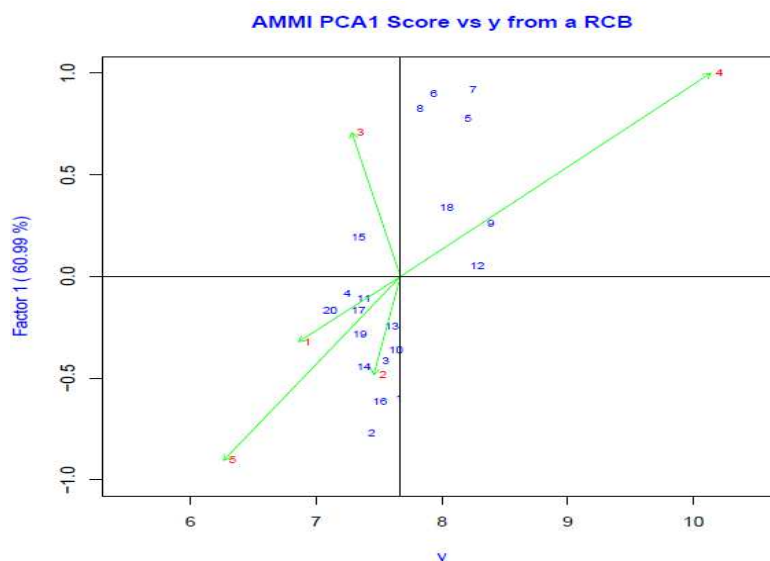
به منظور بررسی بیش تر روابط ژنوتیپها و محیطها از نمایش گرافیکی بای پلات استفاده شد. در این شکل خط عمود در میانه بای پلات نشان دهنده میانگین عملکردها می باشد. ژنوتیپها و مکانهای سمت راست این خط دارای عملکرد بالاتر از میانگین کل هستند. با توجه به این توضیح، ژنوتیپهای ۹، ۱۲، ۱۸، ۵، ۷، ۶، و ۸ با قرار گرفتن در سمت راست خط عمودی در میانه بای پلات، به ترتیب بیشترین تا کمترین میانگین عملکرد بالاتر از متوسط را به خود اختصاص دادند. ژنوتیپ ۲۰ با توجه به این بای پلات کمترین میزان عملکرد را داشت. همچنین در بین مکانها، بروجرد بالاترین عملکرد و مشهد کمترین عملکرد را داشتند. همچنین محور افقی در میانه نمودار نشان دهنده $IPCA1=0$ ($AMMI=0$) می باشد، به این معنی که هیچگونه اثر متقابل وجود ندارد. پس ژنوتیپهایی که در مرکز بای پلات قرار گرفته اند، با داشتن اثر متقابل نزدیک به صفر از پایداری عمومی بیشتری برخوردار هستند. بنابراین ژنوتیپهای ۴، ۱۱، ۱۲، ۱۷ و ۱۵ دارای اثر متقابل پایینی می باشند، ولی ژنوتیپ ۱۲ با داشتن میانگین عملکرد بالاتر از میانگین کل نسبت به بقیه به عنوان ژنوتیپ با پایداری مطلوب انتخاب می شود. همچنین با توجه به بای پلات اغلب ژنوتیپهای برتر به بروجرد سازگاری بهتری دارند (شکل ۱).

نتایج حاصل از بای پلات مولفه های اصلی اول و دوم اثر متقابل را برای ژنوتیپها نشان می دهد. این بای پلات در مجموع ۸۱/۰۴ درصد از تغییرات موجود در داده ها را توجیه کرد. به طوری که مولفه اصلی اول سهم بیشتری (۶۰/۹۹ درصد) از مولفه دوم (۲۰/۰۵ درصد) دارا می باشد. در این بای پلات ژنوتیپهای شماره ۱۷، ۲ و ۱۰ دارای اثر متقابل بزرگ و ناپایداری بودند. ژنوتیپهای شماره ۵، ۶، ۷، ۸ و ۱۵ نیز دارای اثر متقابل بزرگ، مثبت و ناپایدار بود و ژنوتیپهای ۴ و ۱۲ از کمترین اثر متقابل برخوردار بودند که از بین آنها ژنوتیپ ۱۲ به علت داشتن میانگین عملکرد بیش تر از میانگین کل، به عنوان ژنوتیپ با سازگاری عمومی خوب تعیین شد.

در بررسی سازگاری خصوصی و تعیین مناسبترین ژنوتیپها برای مکانهای مورد آزمایش با توجه به این

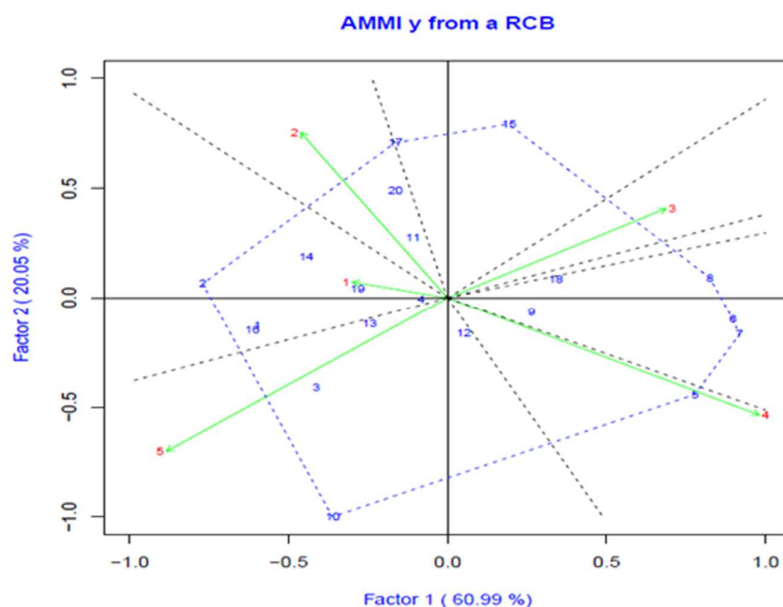
بای پلات (شکل ۲) ژنوتیپهای ۱۵، ۸، ۷، ۶، ۵، ۱۰، ۲ و ۱۷ با قرار گرفتن در رأسهای چندضلعی دارای بیشترین پاسخدهی در مکانهای مناسب خود هستند و در واقع بیشترین سازگاری اختصاصی با مکانهای مناسب خود را دارند. بخشهایی که توسط خطوط عمود بر این اضلاع به وجود آمده اند نشان دهنده ژنوتیپها و مکانهای مناسب می باشد. در واقع ژنوتیپهایی که در راس قرار گرفته اند ژنوتیپهای مناسب برای مکان یا مکانهایی می باشند که در آن بخش قرار دارند. در این بای پلات محیط زرقان داخل بخش اول قرار گرفته است که ژنوتیپ سازگار در این مکان ژنوتیپ شماره ۸ می باشد. ژنوتیپهای ۶، ۷ و ۵ در راس بخشهایی قرار دارند که به ترتیب ژنوتیپهای سازگار برای محیط بروجرد هستند. ژنوتیپ شماره ۱۰ در راس بخشی قرار دارد که برای محیط مشهد سازگار است و ژنوتیپ شماره ۲ سازگارترین ژنوتیپ برای محیط کرج و ژنوتیپ شماره ۱۷ سازگارترین ژنوتیپ برای محیط کرمانشاه شناسایی شد. در تجزیه الگوی واکنش ژنوتیپی بر مبنای دو مولفه اصلی اول توجه به زاویه بین بردارهای محیطی در تفسیر مشابهت های محیطی سودمند است. زاویه حاده بین دو بردار محیطی مشخص کننده همبستگی بالای دو محیط است.

از آنجایی که در مدل $AMMI_1$ ژنوتیپ ۱۲ به عنوان ژنوتیپ با پایداری مطلوب و عملکرد بالا شناخته شد و در مدل $AMMI_2$ نیز ژنوتیپ ۱۲ به عنوان ژنوتیپ با سازگاری عمومی خوب و با عملکرد بالا شناخته شد، همچنین بر اساس پارامتر ارزش پایداری $AMMI$ (ASV) و شاخص پایداری ژنوتیپ (GSI)، ژنوتیپ ۱۲ به عنوان ژنوتیپ پایدار با عملکرد بالا شناخته شد، به طور کلی می توان ژنوتیپ ۱۲ با عملکرد ۸/۲۷ تن در هکتار را به عنوان بهترین ژنوتیپ معرفی کرد. روش $AMMI$ با قابلیت تفسیر گرافیکی یک روش کارآمد محسوب می شود. محققین زیادی کارایی تجزیه $AMMI$ و بای پلات مربوطه را برای داشتن دیدگاه جامع از رفتار ژنوتیپها و محیطها و اثر متقابل ژنوتیپ \times محیط در محصولات مختلف تأیید کرده اند (Abay, 2009; Heidari et al., 2017; Najafi, 2021; Mirak et al., 2019; Arif et al., 2021).



شکل ۱- بای پلات میانگین ژنوتیپ‌ها و محیط‌ها و مقادیر اولین مؤلفه اصلی آن‌ها در مدل AMMI. ۱. کرج، ۲. کرمانشاه، ۳. زرقان، ۴. بروجرد، ۵. مشهد.

Figure 1. Biplot of average genotypes and environments and their first principal component values in the AMMI1 model. 1. Karaj, 2. Kermanshah, 3. Zarghan, 4. Broujerd, 5. Mashhad.



شکل ۲- بای پلات دو مؤلفه اصلی اول و دوم مدل AMMI2 برای اثر متقابل ژنوتیپ × محیط. ۱. کرج، ۲. کرمانشاه، ۳. زرقان، ۴. بروجرد، ۵= مشهد.

Figure 2. Biplot of the first and second principal components of the AMMI2 model for genotype × environment interaction. 1. Karaj, 2. Kermanshah, 3. Zarghan, 4. Broujerd, 5. Mashhad.

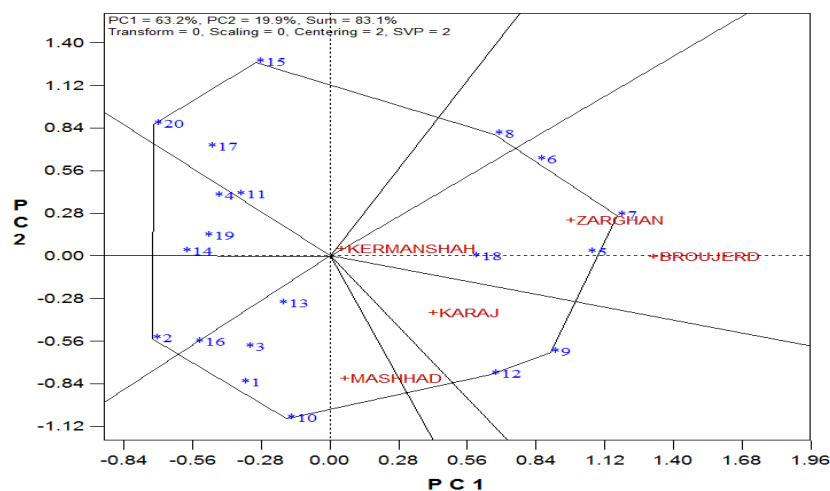
با توجه به معنی‌دار بودن اثر محیط، به‌منظور بررسی بیش‌تر ژنوتیپ‌ها و کسب اطلاعات بیش‌تر در مورد واکنش آن‌ها در سال‌ها و مکان‌های مختلف از روش گرافیکی GGE-biplot نیز استفاده شد. بر اساس نتایج حاصل از این روش، دو مؤلفه اصلی اول و دوم ($PC_1=۲۵/۶$ و $PC_2=۴۵/۸$)، در مجموع ۷۱/۴ درصد از تغییرات را توجیه کردند که به این معنی است که این دو مؤلفه توانسته‌اند ۷۱/۴ درصد از تغییرات مربوط به عملکرد دانه را تبیین کنند که بیانگر اعتبار نسبتاً بالای نمودار بای پلات حاصل از این مطالعه در تبیین تغییرات G+GE است. گاهی

با توجه به معنی‌دار بودن اثر محیط، به‌منظور بررسی بیش‌تر ژنوتیپ‌ها و کسب اطلاعات بیش‌تر در مورد واکنش آن‌ها در سال‌ها و مکان‌های مختلف از روش گرافیکی GGE-biplot نیز استفاده شد. بر اساس نتایج حاصل از این روش، دو مؤلفه اصلی اول و دوم ($PC_1=۲۵/۶$ و $PC_2=۴۵/۸$)، در مجموع ۷۱/۴ درصد از تغییرات را توجیه کردند که به این معنی است که این دو مؤلفه توانسته‌اند ۷۱/۴ درصد از تغییرات مربوط به عملکرد دانه را تبیین کنند که بیانگر اعتبار نسبتاً بالای نمودار بای پلات حاصل از این مطالعه در تبیین تغییرات G+GE است. گاهی

ژنوتیپ‌های ۸، ۶، ۷، ۵، ۹، ۱۲، ۱۰، ۲، ۲۰ و ۱۵ در رأس این چند ضلعی قرار گرفته‌اند. محیط‌های زرقان، بروجرد و کرمانشاه در بخشی قرار گرفته‌اند که ژنوتیپ‌های ۶، ۷ و ۵ در رأس آن قرار دارند. این بدان معنی است که ژنوتیپ‌های ۶، ۷ و ۵ بهترین ژنوتیپ‌ها در این محیط‌ها بوده‌اند. محیط کرج در بخشی قرار گرفته است که ژنوتیپ‌های ۹ و ۱۲ در رأس آن قرار دارند و بنابراین، این ژنوتیپ‌ها بهترین ژنوتیپ‌ها در محیط کرج بوده‌اند. مشهد در بخشی قرار گرفتند که ژنوتیپ ۱۰ در رأس آن قرار گرفته است و بنابراین ژنوتیپ ۱۰ بهترین ژنوتیپ برای این محیط بوده است. نکته قابل توجه این است که هیچ محیطی در داخل بخش‌هایی که ژنوتیپ‌های ۲، ۲۰، ۱۵ و ۸ در رأس آن قرار گرفته‌اند، وجود ندارد، به این معنی که ژنوتیپ‌های ۲، ۲۰، ۱۵ و ۸ در هیچ‌یک از محیط‌ها ژنوتیپ‌های خوبی نبودند.

پیچیده بودن ماهیت اثر متقابل ژنوتیپ × محیط باعث می‌شود که مجموع دو مؤلفه اول نتواند اکثر تغییرات موجود را تبیین کند، اما این امر به معنی عدم اعتبار بای‌پلات نیست. زمانی که که نمودار بای‌پلات حداقل ۶۰ درصد از واریانس داده‌ها را توجیه کند، می‌توان از آن برای تعیین ابرمحیط‌ها بهره برد (Yan et al., 2007).

در بای‌پلات شکل ۳ یک چند ضلعی مشاهده می‌شود که از متصل کردن دورترین ژنوتیپ‌ها (از مبدأ بای‌پلات) به یکدیگر ایجاد شده است. با استفاده از این بای‌پلات و چند ضلعی درون آن می‌توان ابرمحیط‌ها و ژنوتیپ‌های برتر از لحاظ عملکرد برای هر محیط را شناسایی کرد. در این بای‌پلات توسط خطوطی که بر این چند ضلعی عمود شده است، ۸ بخش قابل تشخیص است. ژنوتیپ‌های موجود در رأس چند ضلعی ژنوتیپ‌های برتر برای محیط‌هایی هستند که در این چند ضلعی واقع شده‌اند.



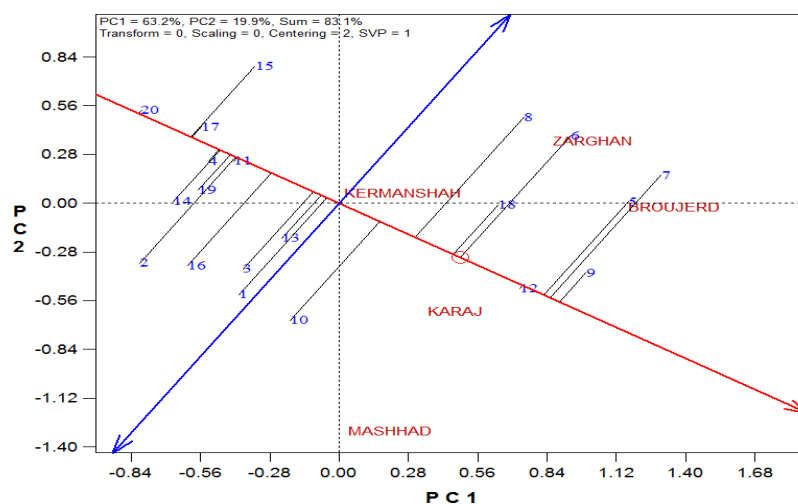
شکل ۳- نمودار چند ضلعی روش GGE-biplot برای تعیین ابرمحیط‌ها و بهترین ژنوتیپ‌ها برای هر محیط
Figure 3. Polygon diagram of GGE-biplot method to determine mega-environments and the best genotypes for each environment

میانگین عملکرد و پایداری ژنوتیپ‌ها با استفاده از بای‌پلات شکل ۴ مورد بررسی قرار گرفت. به‌طور کلی ژنوتیپ ۹ با قرار گرفتن در سمت مثبت محور افقی بالاترین میزان عملکرد و ژنوتیپ ۲۰ با قرار گرفتن در جهت منفی محور کم‌ترین میزان عملکرد را نشان دادند. همچنین ژنوتیپ‌های ۶، ۷، ۸، ۵، ۱ و ۲ به‌علت این که با بیش‌ترین طول خط بر محور افقی نسبت به بقیه ژنوتیپ‌ها عمود گشته‌اند، دارای بیش‌ترین ناپایداری و نوسان عملکرد می‌باشند. در مقابل، ژنوتیپ‌های ۱۲، ۱۱ و

بر اساس بای‌پلات شکل ۳ می‌توان سه ابر محیط مختلف نیز شناسایی کرد. محیط‌های زرقان، بروجرد و کرمانشاه به‌عنوان اولین ابر محیط، محیط کرج به‌عنوان دومین ابر محیط و محیط مشهد به‌عنوان سومین ابر محیط شناسایی شدند. بختیار و همکاران (Bakhtiar et al., 2021) نیز با استفاده از تجزیه GGE-biplot ژنوتیپ‌های پایدار گندم را برای مناطق معتدل ایران تعیین و سه ابر محیط که امکان سازگاری خصوصی ژنوتیپ‌های گندم برای آن‌ها وجود داشت را شناسایی کردند.

انجام شد، نتایج تجزیه پایداری به روش GGE بای‌پلات نشان داد که چهار ژنوتیپ از ۳۰ ژنوتیپ مورد بررسی دارای عملکرد بالا و پایدار بودند و به‌عنوان ژنوتیپ‌های سازگاری عمومی برای کشت در مناطق گرم و خشک جنوب ایران توصیه شدند (Omrani *et al.*, 2017).

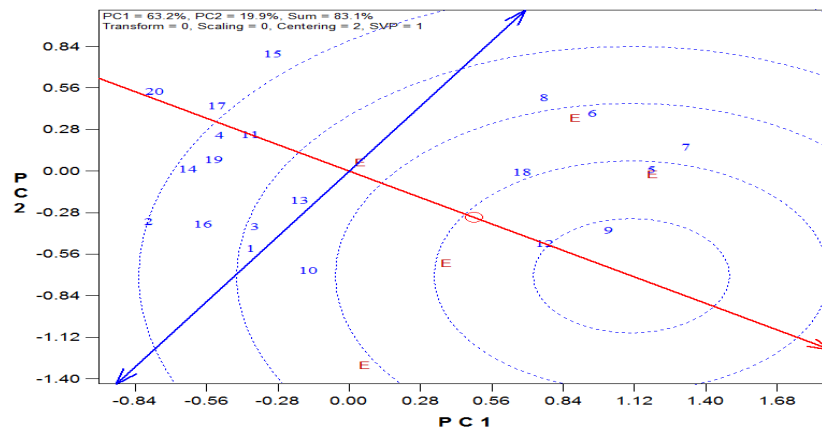
۲۰ با داشتن کم‌ترین طول خط، کم‌ترین واریانس را داشتند و به‌عنوان پایدارترین ژنوتیپ‌ها شناخته شدند. از بین آن‌ها، ژنوتیپ ۱۲ دارای عملکرد بالاتری از میانگین کل نیز بود و به‌عنوان ژنوتیپ دارای عملکرد بالا و پایدار شناخته شد. در مطالعه دیگری که جهت ارزیابی واکنش ژنوتیپ‌های گندم دوروم به شرایط دیم و آبیاری تکمیلی



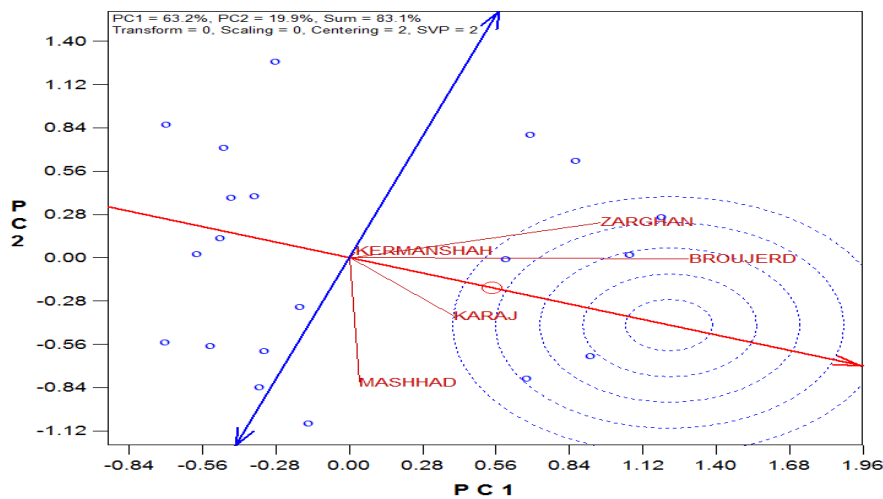
شکل ۴- ارزیابی همزمان میانگین و پایداری عملکرد ژنوتیپ‌های گندم در محیط‌های مختلف
Figure 4. Simultaneous evaluation of the average yield and stability of wheat genotypes in different environments

محیط‌ها برخوردار بود و می‌تواند کارایی نسبی ژنوتیپ‌ها را به‌درستی برآورد کند. محیط‌هایی که نسبت به خط ATC زاویه بسته‌تری دارند، به‌ویژه آن‌هایی که دارای بردارهای بلندتری نیز هستند، علاوه بر نمود عملکرد بالا (نمایندگی)، به‌خوبی می‌توانند ژنوتیپ‌های پایدار را از ژنوتیپ‌های ناپایدار متمایز کنند. محیط بروجرود علاوه بر زاویه بسته‌تر نسبت به خط ATC، طول بیش‌تری نیز داشت، به این معنی که این محیط علاوه بر اینکه از توانایی جداکنندگی یا تمایز بالاتری نسبت به سایر محیط‌ها برخوردار بود، نمایندگی بیش‌تری نیز دارد. کریمی‌زاده و همکاران (Karimizadeh *et al.*, 2020) نیز با ارزیابی پایداری ژنوتیپ‌های گندم دوروم به روش GGE بای‌پلات، از بین ۱۹ ژنوتیپ مورد ارزیابی در پنج منطقه طی سه سال زراعی، دو ژنوتیپ و دو محیط ایده‌آل را شناسایی کردند.

به‌منظور تعیین گرافیکی فاصله بین ژنوتیپ‌های مورد مطالعه با ژنوتیپ ایده‌آل فرضی، نمودار ژنوتیپ ایده‌آل رسم شد (شکل ۵). مرکز دوایر متحدالمرکز جایی است که ژنوتیپ ایده‌آل قرار می‌گیرد. بنابراین ژنوتیپ‌های ۱۲ و ۹ با قرار گرفتن در مرکز دوایر به‌عنوان ژنوتیپ‌های ایده‌آل این آزمایش بودند و پس از آنها ژنوتیپ‌های ۵، ۷، ۱۸ و ۶ در رتبه‌های بعدی قرار می‌گیرند. بای‌پلات GGE که محیط‌ها را از طریق خط‌هایی به مبدأ بای‌پلات وصل می‌کند، به درک روابط بین محیط‌ها کمک می‌کند (شکل ۶). بر اساس این بای‌پلات محیط ایده‌آل، ایده‌آل‌ترین الگوی پاسخ ژنوتیپی را نشان می‌دهد، یعنی بیش‌ترین تمایز بین ژنوتیپ‌ها را ایجاد می‌کند. بر طبق شکل ۶ هیچ‌کدام از محیط‌های مورد بررسی در محدوده دوایر متحدالمرکز قرار نگرفتند. اما محیط بروجرود از توانایی جداکنندگی یا تمایز بالاتری نسبت به سایر



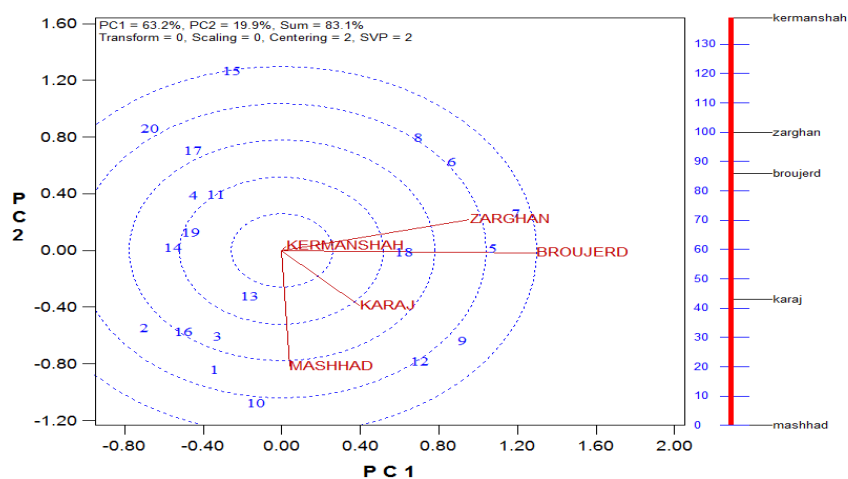
شکل ۵- تعیین ژنوتیپ ایده‌آل با استفاده از روش GGE-biplot
Figure 5. Determining the ideal genotype using the GGE-biplot method



شکل ۶- تعیین محیط ایده‌آل با استفاده از روش گرافیکی GGE-biplot
Figure 6. Determining the ideal environment using the GGE-biplot graphic method

محیط زرقان نشان دهنده همبستگی منفی بین این دو محیط است و به معنی پاسخ متفاوت ژنوتیپ‌ها در این محیط‌ها می‌باشد. گزارش‌ها نشان می‌دهند که وجود رابطه نزدیک بین محیط‌های آزمایشی نشان دهنده اطلاعات مشابه در باره محیط‌ها است (Mohamed and Ahmed, 2013). طول بردارهای محیطی، برآوردی از انحراف معیار درون هر محیط و در واقع معیاری از قدرت تمایز محیط‌های آزمایشی است. بر این اساس، در این تحقیق مکان بروجرود در سال‌های ۹۸ و ۹۹ و زرقان در سال ۹۹ که دارای طول‌ترین بردار بودند، بیش‌ترین قدرت تمایز را در بین دیگر محیط‌ها داشته‌اند. سایر محیط‌ها با داشتن طول بردار کم‌تر، قدرت تمایزکنندگی کم‌تری داشتند.

بای‌پلات شکل ۷، همبستگی بین محیط‌ها را با استفاده از زاویه بین آن‌ها نشان می‌دهد. به عبارت دیگر، اگر زاویه بین بردارها کوچک‌تر از ۹۰ درجه باشد، نشان دهنده همبستگی مثبت بین محیط‌ها است و در مقابل، وجود زاویه بزرگ‌تر از ۹۰ درجه به معنای همبستگی منفی بین محیط‌ها خواهد بود. زاویه ۹۰ درجه بین بردارها نیز نشان‌دهنده مستقل بودن محیط‌ها است. با توجه به شکل ۷ بین محیط‌های بروجرود با زرقان و کرمانشاه زاویه کوچک‌تر از ۹۰ درجه وجود دارد، به عبارت دیگر بین این محیط‌ها، همبستگی مثبت وجود دارد و به این معنی است که واکنش ژنوتیپ‌ها در این محیط‌ها مشابه بوده است. وجود زاویه بزرگ‌تر از ۹۰ درجه بین محیط مشهد با



شکل ۷- بای‌پلات روابط بین محیط‌های مختلف

Figure 7. Biplot of relationships between different environments

در هر دو محیط و لاین NL 1420 را در محیط آبیاری و تنش گرمایی آخر فصل، که دارای عملکرد پایدار و بالاتر از میانگین کل در این محیط‌ها بودند، به‌عنوان لاین‌های مناسب شناسایی کرد (Bishwas *et al.*, 2021). مقایسه نتایج روش AMMI، شاخص پایداری امی (ASV) و شاخص پایداری ژنوتیپ (GSI) با روش GGE بای‌پلات نشان داد که تمامی این شاخص‌ها از پتانسیل خوبی برای ارزیابی پایداری عملکرد ژنوتیپ‌ها برخوردار هستند، با این وجود نتایج GGE بای‌پلات در بررسی سازگاری و پایداری عملکرد ژنوتیپ‌ها در محیط‌های مختلف، کارآمدتر و کاربردی‌تر بود. این روش از طریق نمایش گرافیکی برهم‌کنش ژنوتیپ × محیط به‌نژادگر کمک می‌کند تا به سادگی پایداری ژنوتیپ‌ها و ترکیب پایداری با عملکرد ژنوتیپ‌ها در محیط‌های مختلف را ارزیابی کند. همچنین این روش امکان بررسی روابط بین محیط‌ها و شناسایی محیط‌های هدف در برنامه‌های به‌نژادی را به‌سادگی امکان‌پذیر می‌سازد.

نتیجه‌گیری کلی

در این مطالعه از دو روش AMMI و GGE بای‌پلات به‌منظور ارزیابی پایداری ژنوتیپ‌های گندم نان استفاده شد. نتایج حاصل از مؤلفه اصلی اول روش AMMI نشان داد که ژنوتیپ‌های ۴، ۱۱، ۱۲، ۱۷ و ۱۵ دارای اثر متقابل کم‌تری بودند، ولی ژنوتیپ ۱۲ با میانگین عملکرد بالاتر از میانگین کل نسبت به بقیه ژنوتیپ‌ها، به‌عنوان ژنوتیپ با پایداری مطلوب انتخاب شد. بر پایه شاخص ASV،

پژوهش‌گران متعددی از دو روش GGE-Biplot و AMMI جهت بررسی پایداری و سازگاری محصولات مختلف از جمله گندم (Najafi Mirak *et al.*, 2013; Singh *et al.*, 2019; Mortazavian *et al.*, 2014; Oral *et al.*, 2018)، جو (Enyew *et al.*, 2021)، نیشکر (Mahadevaiah *et al.*, 2021) و نخود (Arif *et al.*, 2021) استفاده کرده‌اند. صادق‌زاده و همکاران (Sadeghzadeh *et al.*, 2017) از روش GGE بای‌پلات و AMMI برای بررسی پایداری و سازگاری عملکرد لاین‌های گندم دوروم در مناطق مختلف استفاده کردند. این محققین عنوان کردند که نتایج GGE بای‌پلات در بررسی سازگاری و پایداری عملکرد ژنوتیپ‌ها در محیط‌های مختلف بسیار کاربردی‌تر بوده و می‌تواند به صورت گسترده‌ای در بررسی ژنوتیپ‌ها در مناطق و سال‌های متعدد در برنامه‌های اصلاح گندم دوروم و سایر غلات مورد استفاده قرار گیرد. با این‌حال، نتایج یک پژوهش که به‌منظور بررسی کارایی دو روش AMMI و GGE بای‌پلات روی ۵۰ ژنوتیپ گندم حاصل از آزمایشات بین‌المللی CIMMYT در ۳۶ محیط در ۱۴ کشور انجام شد، نشان‌دهنده کارایی یکسان دو مدل در ارزیابی داده‌ها و انتخاب ارقام برتر و پایدار در محیط‌های مختلف بود (Neisse *et al.*, 2018). نتایج حاصل از بررسی پایداری عملکرد در ۱۸ لاین پیشرفته گندم همراه با دو رقم شاهد تحت شرایط تنش گرمایی آخر فصل با استفاده از دو روش GGE بای‌پلات و AMMI، لاین Bhirkuti NL 1179 را

روش GGE بای پلات در بررسی سازگاری و پایداری عملکرد ژنوتیپ‌ها در محیط‌های مختلف، به دلیل سهولت در تفسیر نتایج گرافیکی، کارآتر و کاربردی‌تر است.

تضاد منافع

نویسنده (گان) تایید می‌کند که این تحقیق در غیاب هر گونه روابط تجاری یا مالی که می‌تواند به‌عنوان تضاد منافع بالقوه تعبیر شود، انجام شده است.

رعایت اخلاق در نشر

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

اجازه انتشار مقاله

نویسنده (گان) با چاپ این مقاله به صورت دسترسی باز موافقت کرده و کلیه حقوق استفاده از محتوا، جدول‌ها، شکل‌ها، تصویرها و غیره را به ناشر واگذار می‌کنند.

ژنوتیپ‌های ۲۰، ۱۲، ۱۱، ۱۳ و ۴ دارای کم‌ترین مقدار ASV بودند، با این حال ژنوتیپ ۱۲ با عملکرد بالاتر از میانگین کل به‌عنوان ژنوتیپ پایدار و پرمحصول شناخته شد. بر اساس شاخص GSI ژنوتیپ‌های ۱۲ و ۹ کم‌ترین مقدار را داشتند و به‌عنوان ژنوتیپ‌های پایدار با عملکرد بالا معرفی شدند. در بای پلات AMMI2، ژنوتیپ‌های ۴ و ۱۲ از کم‌ترین اثر متقابل برخوردار بودند که از بین آن‌ها ژنوتیپ ۱۲ به‌عنوان ژنوتیپ با سازگاری عمومی خوب تعیین شد. بررسی چند ضلعی GGE بای پلات منجر به شناسایی سه ابرمحیط شد که در بین این محیط‌ها، محیط بروجرد با طول بردار بلند از توانایی جداکنندگی بالایی برخوردار بود. بررسی همزمان پایداری و عملکرد ژنوتیپ‌ها نیز نشان داد که ژنوتیپ‌های ۱۲ و ۹ علاوه بر عملکرد بالا، پایداری عملکرد بالاتری نیز داشتند. ژنوتیپ‌های ۱۲ و ۹ نزدیک‌ترین ژنوتیپ‌ها به ژنوتیپ ایده‌آل نیز بودند و پس از آنها ژنوتیپ‌های ۵، ۷ و ۱۸ در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. در مجموع بر اساس نتایج هر دو روش، ژنوتیپ ۱۲ با میانگین عملکرد بالاتر از میانگین کل در بیش‌تر محیط‌ها، پایدارترین ژنوتیپ در بین ژنوتیپ‌های مورد بررسی بود. مقایسه نتایج AMMI، شاخص پایداری امی (ASV) و شاخص پایداری ژنوتیپ (GSI) با نتایج GGE بای پلات نشان داد که تمامی این روش‌ها پتانسیل خوبی برای ارزیابی پایداری عملکرد ژنوتیپ‌ها دارند، با این حال

References

- Abay, F. and Bjørnstad, A. 2009. Specific adaptation of barley varieties in different locations in Ethiopia. *Euphytica* 167: 181-195.
- Akter, A., Hasan, M.J., Kulsum, M.U., Rahman, M.H., Paul, A.K., Lipi, L.F. and Akter, S. 2015. Genotypexenvironment interaction and yield stability analysis in hybrid rice (*Oryza sativa* L.) by AMMI biplot. *Bangladesh Rice Journal* 19 (2): 79-86.
- Alipour, H., Abdi, H., Rahimi, Y. and Bihamta, M.R. 2019. Investigating grain yield and yield stability of wheat cultivars introduced in Iran over the last half century. *Cereal Research* 9 (2): 157-167. (In Persian with English Abstract).
- Alwala, S., Kwolek, T., McPherson, M., Pellow, J. and Meyer, D. 2010. A Comprehensive comparison between Eberhart and Russell joint regression and GGE biplot analyses to identify stable and high yielding maize hybrids. *Field Crops Research* 119: 225-230.
- Annicchiarico, P., Harzic, N. and Carroni, A.M. 2010. Adaptation, diversity, and exploitation of global white Lupin (*Lupinus albus* L.) landrace genetic resources. *Field Crops Research* 119: 114-124.
- Arif, A., Parveen, N., Waheed, M.Q., Atif, R.M., Waqar, I. and Shah, T.M. 2021. A comparative study for assessing the drought-tolerance of chickpea under varying natural growth environments. *Frontiers in Plant Science* 11: 2228.
- Bakhtiar, F., Najafian, G., Kafashi, A.K., Jafar-Nejad, A., Hassani, F., Zareh Faizabadi, A., Amin Azarm, D., Nabati, E. and Abdi, H. 2021. Genotypexenvironment interaction on grain yield of bread wheat (*Triticum aestivum* L.) promising lines temperate regions of Iran. *Iranian Journal of Crop Sciences* 23 (2): 142-157. (In Persian with English Abstract).
- Bhartiya, A., Aditya, J.P., Kumari, V., Kishore, N., Purwar, J.P., Agrawal, A. and Kant, L. 2017. GGE biplot & AMMI analysis of yield stability in multienvironment trial of soybean [*Glycine max*

- (L.) Merrill] genotypes under rainfed condition of north western Himalayan hills. **The Journal of Animal and Plant Sciences** 27 (1): 227-238.
- Bishwas, K.C., Poudel, M.R. and Regmi, D. 2021.** AMMI and GGE biplot analysis of yield of different elite wheat line under terminal heat stress and irrigated environments. **Heliyon** 7 (6): e07206.
- Bocianowski, J., Tratwal, A. and Nowosad, K. 2021.** Genotype by environment interaction for main winter triticale varieties characteristics at two levels of technology using additive main effects and multiplicative interaction model. **Euphytica** 217: 26.
- Chen, X., Wu, B. and Zhang, Z. 2016.** Evaluation of adaptability and stability for important agronomic traits of oat (*Avena* spp.) germplasm resources. **Journal of Plant Genetic Resources** 17 (4): 577-585.
- Chimdesa, O., Asefa, K., Alemu, S. and 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 and Forestry** 6 (5): 1-10.
- Dallo, S.C., Zdziarski, A.D., Woyann, L.G., Milioli, A.S., Zanella, R., Conte, J. and Benin, G. 2019.** Across year and year-by-year GGE biplot analysis to evaluate soybean performance and stability in multi-environment trials. **Euphytica** 215: 113-125.
- Daryanto, S., Wang, L. and Jacinthe, P.A. 2016.** Global synthesis of drought effects on maize and wheat production. **PLoS ONE** 11 (5): e0156362
- Ebdon, J.S. and Gauch, H.G. 2002.** Additive main effect and multiplicative interaction analysis of national turf grass performance trials: II. Cultivar recommendations. **Crop Science** 42: 497-506.
- Enghiad, A., Ufer, D., Countryman, A. and Thilmany, D. 2017.** An overview of global wheat market fundamentals in an era of climate concerns. **International Journal of Agronomy** 19: 1-15.
- Enyew, M., Feyissa, T., Geleta, M., Tesfaye, K., Hammenhag, C. and Carlsson, A.S. 2021.** Genotype by environment interaction, correlation, AMMI, GGE biplot and cluster analysis for grain yield and other agronomic traits in sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench). **PLoS ONE** 16: e0258211.
- FAOSTAT. 2022.** <https://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** 11 (14): 1791-1796.
- Farshadfar, E., Mahmodi, N. and Yaghotipoor, A. 2011.** AMMI stability value and simultaneous estimation of yield and yield stability in bread wheat (*Triticum aestivum* L.). **Australian Journal of Crop Science** 5 (13): 1837-1844.
- Friedli, C.N., Abiven, S., Fossati, D. and Hund, A. 2019.** Modern wheat semi-dwarfs root deep on demand: response of rooting depth to drought in a set of Swiss era wheats covering 100 years of breeding. **Euphytica** 215: 85.
- Gauch, H.G. 1992.** Statistical analysis of regional yield trials: AMMI analysis of factorial designs. Elsevier Science Publishers, Amsterdam, Netherlands. 278 p.
- Gauch, H.G. and Zobel, R.W. 1988.** Predictive and postdictive success of statistical analyses of yield trials. **Theoretical and Applied Genetics** 76 (1): 1-10.
- Gauch, H.G. and Zobel, R.W. 1997.** Identifying mega-environments and targeting genotypes. **Crop Science** 37: 311-326.
- Ghaed-Rahimi, L., Heidari, B. and Dadkhodaie, A. 2015.** Genotype \times environment interactions for wheat grain yield and antioxidant changes in association with drought stress. **Archives of Agronomy and Soil Science** 61 (2): 153-171.
- Ghodrati-Niari, F. and Abdolshahi, R. 2014.** Evaluation of yield stability of 40 bread wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes using additive main effects and multiplicative interaction (AMMI). **Iranian Journal of Crop Sciences** 16 (4): 322-333. (In Persian with English Abstract).
- Guo, X., Xin, Z., Yang, T., Ma, X., Zhang, Y., Wang, Z., Ren, Y. and Lin, T. 2020.** Metabolomics response for drought stress tolerance in Chinese wheat genotypes (*Triticum aestivum*). **Plants** 9: 520.
- Heidari, S., Azizinezhad, R. and Haghparast, R. 2017.** Determination of yield stability in durum wheat genotypes under rainfed and supplementary irrigation conditions. **Journal of Agricultural Science and Technology** 19: 1355-1368.
- Hosseini Chaleshtori, M., Rahim Soroush, H., Allahgholipour, M., Kavooosi, M., Yazdani, M., Majidi, F., Tajaddodi Talab, K. and Danyali, F. 2021.** Evaluation of adaptability and grain yield stability of rice (*Oryza sativa* L.) promising lines using GGE biplot. **Iranian Journal of Crop Sciences** 23 (2): 184-197. (In Persian with English Abstract).

- Islam, S.S., Hasan, A.K., Khaldun, A.B.M. and Nazir, N. 2021.** Additive main effect and multiplicative interaction (AMMI) model analysis for yield performance and G×E interaction in a multi-environmental trial of aromatic fine rice in Bangladesh. **Journal of Cereal Research** 13 (2): 171-179.
- Kanouni, H., Taleei, A.R. and Khalily, M. 2007.** Stability analysis of seed yield and one-hundred seeds weight in Desi type chickpea genotypes. **Seed and Plant Journal** 23 (3): 297-310. (In Persian with English abstract).
- Karimizadeh, R., Hosseinpour, T., Alt Jafarby, J., Shahbazi Homonlo, K., Armion, M. and Sharifi, P. 2020.** Stability analysis of durum wheat genotypes by GGE biplot method. **Journal of Crop Breeding** 12 (35) :1-17. (In Persian with English Abstract).
- Karimizadeh, R., Hosseinpour, T., Alt Jafarby, J., Shahbazi Homonlo, K. and Armion, M. 2021.** Evaluation of genotypexenvironment interaction and determining grain yield stability of durum wheat genotypes in uniform regional yield trials in semi-warm rain-fed areas. **Plant Genetic Researches** 7 (2): 25-40. (In Persian with English Abstract).
- Karimizadeh, R., Mohammadi, M., Sabaghnia, N., Mahmoodi, A.A., Roustami, B., Seyyedi, F. and Akbari, F. 2013.** GGE biplot analysis of yield stability in multi environment trials of lentil genotypes under rainfed condition. **Notulae Scientia Biologicae** 5 (2): 256-262.
- Laskowski, W., Gorska-Warsewicz, H., Rejman, K., Czeczotko, M. and Zwolinska, J. 2019.** How important are cereals and cereal products in the average polish diet? **Nutrients** 11: 679-700.
- Li, X.P., Li, M.Y., Ling, A.J., Hu, X.Z., Ma, Z., Liu, L. and Li, Y.X. 2017.** Effects of genotype and environment on avenanthramides and antioxidant activity of oats grown in northwestern China. **Journal of Cereal Science** 73: 130-137.
- Liersch, A., Bocianowski, J., Nowosad, K., Mikołajczyk, K., Spasibionek, S., Wielebski, F., Matuszczak, M., Szała, L., Cegielska-Taras, T., Sosnowska, K. and Bartkowiak-Broda, I. 2020.** Effect of genotypexenvironment interaction for seed traits in winter oilseed rape (*Brassica napus* L.). **Agriculture** 10: 607. doi:10.3390/agriculture10120607.
- Mahadevaiah, C., Hapase, P., Sreenivasa, V., Hapase, R., Swamy, H.K., Anilkumar, C., Mohanraj, K., Hemaprabha, G. and Ram, B. 2021.** Delineation of genotypexenvironment interaction for identification of stable genotypes for tillering phase drought stress tolerance in sugarcane. **Scientific Reports** 11: 18649.
- Moayyedi, A.A., Najafi Mirak, T., Ahmadi, G.H. and Ghandi, A. 2020.** Stability analysis of seed yield in durum wheat genotypes (*Triticum turgidum* L. var durum) using AMMI analysis. **Journal of Agroecology** 12 (3): 359-371. (In Persian with English Abstract).
- Mohamed, N. and Ahmed, A.A. 2013.** Additive main effects and multiplicative interaction (AMMI) and GGE-biplot analysis of genotypexenvironment interactions for grain yield in bread wheat (*Triticum aestivum* L.). **African Journal of Agricultural Research** 8: 5197-5203.
- Mohammadi, R., Farshadfar, E. and Amir, A. 2015.** Interpreting genotype environment interactions for grain yield of rain-fed durum wheat in Iran. **The Crop Journal** 3 (6): 526-535.
- Mortazavian, S., Nikkhah, H., Hassani, A., Sharif-al-Hosseini, M., Taheri, M. and Mahlooji, M. 2014.** GGE biplot and AMMI analysis of yield performance of barley genotypes across different environments in Iran. **Journal of Agricultural Science and Technology** 16: 609-622.
- Najafi Mirak, T., Dastfal, M., Andarzian, B., Farzadi, H., Bahari, M. and Zali, H., 2018.** Evaluation of durum wheat cultivars and promising lines for yield and yield stability in warm and dry areas using AMMI model and GGE biplot. **Journal of Crop Breeding** 10 (28): 1-12. (In Persian with English Abstract).
- Najafi Mirak, T., Moayyedi, A.A., Sasani, S. and Ghandi, A. 2019.** Evaluation of adaptation and grain yield stability of durum wheat (*Triticum turgidum* L.) genotypes in temperate agro-climate zone of Iran. **Iranian Journal of Crop Sciences** 21 (2): 127-138. (In Persian with English Abstract).
- Naroui Rad, M.R., Abdul Kadir, M., Raffii, M.Y., Jaafar, H., Naghavi, M.R. and Ahmadi, F. 2013.** Genotypexenvironment interaction by AMMI and GGE biplot analysis in three consecutive generations of wheat (*Triticum aestivum*) under normal and drought stress conditions. **Australian Journal of Crop Science** 7 (7): 956-961.
- Nayak, D., Bose, L.K., Singh, S. and Nayak, P. 2008.** Additive main effects and multiplicative interaction analysis of host-pathogen relationship in rice-bacterial blight pathosystems. **The Plant Pathology Journal** 24 (3): 337-351.

- Neisse, A.C., Kirch, J.L. and Hongyu, K. 2018.** AMMI and GGE biplot for genotypexenvironment interaction: A medoid-based hierarchical cluster analysis approach for high-dimensional data. **Biometrical Letters** 55 (2): 97-121.
- Omrani, S., Naji, A.M. and Esmaeilzadeh Moghaddam, M. 2017.** Yield stability analysis of promising bread wheat lines in southern warm and dry agro climatic zone of Iran using GGE biplot model. **Journal of Crop Breeding** 9 (23) :157-165. (In Persian with English Abstract).
- Oral, E., Kendal, E. and Dogan, Y. 2018.** Selection the best barley genotypes to multi and special environments by AMMI and GGE biplot models. **Fresenius Environmental Bulletin** 27: 5179-5187.
- Poudel, M.R., Ghimire, S., Pandey, M.P., Dhakal, K.H., Thapa, D.B. and Poudel, H.K. 2020.** Evaluation of wheat genotypes under irrigated, heat stress and drought condition. **Journal of Biology and Today's World** 9 (1): 212.
- Pour-Aboughadareh, A., Barati, A. and Koohkan, S.A. 2022.** Dissection of genotype-by-environment interaction and yield stability analysis in barley using AMMI model and stability statistics. **Bulletin of the National Research Centre** 46: 19.
- Rahmati, H., Nakhzari Moghaddam, A., Rahemi Karizaki, A. and evarsaji, Z. 2021.** Evaluation of grain yield stability in advanced genotypes of durum wheat (*Triticum turgidum* var. Durum) using parametric and non-parametric methods of stability analysis. **Journal of Crop Breeding** 13 (37) :63-74. (In Persian with English Abstract).
- Rezene, Y. 2019.** GGE-biplot analysis of multi-environment yield trials of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) in the southern Ethiopia. **Journal of Plant Studies** 8 (1): 35.
- Sadeghzadeh, B., Mohammadi, R., Ahmadi, H., Abedi-asl, G.R., Khalilzadeh, G.R., Mohammadfam, M., Bahrami, N., Ismaeilzad, H., Khaledian, M.S. and Hasanpour-hosni, M. 2017.** Efficiency of GGE biplot and AMMI analyses for adaptability and grain yield stability of durum wheat lines under different environments. **Journal of Crop Ecophysiology** 11 (2): 413-436. (In Persian with English Abstract).
- Sanchez-Martin, J., Rispail, N., Flores, F., Emeran, A.A., Sillero, J.C., Rubiales, D. and Prats, E. 2017.** Higher rust resistance and similar yield of oat landraces versus cultivars under high temperature and drought. **Agronomy for Sustainable Development** 37 (1): 3-15.
- Santos, P.R., Oliveira, T.R., Skeen, P., Nascimento, M.R., Silva Costa, K.D., Araújo, E.R., Pereira, H.S. and Costa, A.F. 2019.** GGE biplot and REML/BLUP based-analysis of yield stability and adaptability for common beans in multi-environment trials. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias** 14 (2): 1-8.
- Sharifi, P., Hashem, A., Rahman, E., Ali, M. and Abouzar, A. 2017.** Evaluation of genotypexenvironment interaction in rice based on AMMI model in Iran. **Rice Science** 24: 173-180.
- Singh, C., Gupta, A., Gupta, V., Kumar, P., Sendhil, R., Tyagi, B.S. Singh, G., Chatrath, R. and Singh, G.P. 2019.** Genotypexenvironment interaction analysis of multi-environment wheat trials in India using AMMI and GGE biplot models. **Crop Breeding and Applied Biotechnology** 19: 309 -318.
- Verma, A. 2021.** Wheat genotypes evaluated for Gx E interactions in central zone of the country by AMMI analysis. **Annals of Plant and Soil Research** 23 (3): 341-345.
- Wardofa, G.A., Asnake, D. and Mohammed, H. 2019.** GGE biplot analysis of genotype by environment interaction and grain yield stability of bread wheat genotypes in central Ethiopia. **Journal of Plant Breeding and Genetics** 7 (2): 75-85.
- Yan, W. 2016.** Analysis and handling of Gx E in a practical breeding program. **Crop Science** 56: 2106-2118. doi: 10.2135/cropsci2015.06.0336.
- Yan, W. and Kang, M.S. 2002.** GGE-biplot analysis: A graphical tool for breeders, geneticists, and agronomists. CRC Press, Boca Raton. 288 p.
- 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.
- Yan, W., Kang, M.S., Ma, B., Woods, S. and Cornelius, P.L. 2007.** GGE biplot vs. AMMI analysis of genotype-by-environment data. **Crop Science** 47: 643- 655.