



Research Paper

A Study on the Genotype × Environment Interaction in Promising Advanced Genotypes of Soybean using Graphical GGE-biplot Analysis

Bahram Masoudi¹, Amir Gholizadeh² , Parastoo Majidian³, Ebrahim Hezarjaribi⁴, Nasrin Razmi⁵ and Farnaz Shariati¹

- 1- Assistant Professor, Oil Crops Research Department, Seed and Plant Improvement Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran
- 2- Assistant Professor, Crop and Horticultural Science Research Department, Golestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Gorgan, Iran, (Corresponding author: a.gholizadeh@areeo.ac.ir)
- 3- Assistant Professor, Crop and Horticultural Science Research Department, Mazandaran Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Sari, Iran
- 4- Assistant Professor, Crop and Horticultural Science Research Department, Golestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Gorgan, Iran
- 5- Assistant Professor, Crop and Horticultural Science Research Department, Ardabil Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Moghan, Iran

Received: 27 May, 2024

Accepted: 14 August, 2024

Extended Abstract

Background: Oilseeds are among the most important sources of energy all over the world. Soybean (*Glycine max* L.) is an important crop and its oil has nutritional and high economic value. As an annual, self-pollinating, diploid plant belonging to the *Leguminosae* pea family, soybean falls into the most important oil plants in the world, containing 18-22% oil and 40-50% protein, depending on the genotype and environmental factors. Soybean has been the food of Asian people, especially China, for centuries, and Chinese people consume it along with rice as their main food. The United States of America is the largest producer of soybeans and produces almost two-thirds of the world's crop. Improving seed yield is always a major goal in soybean breeding programs. The economic performance of soybeans can be increased by using new and high-yield varieties. It is essential to evaluate promising advanced soybean genotypes under different environmental conditions for identifying and selecting superior genotypes with high and stable yield potential. Genotype × environment interaction effects are important limiting factors in the introduction of new cultivars. The genotype × environment interaction is a major challenge in the study of quantitative characters because it reduces yield stability in different environments and complicates the interpretation of genetic experiments, making predictions difficult. Therefore, it is crucial to know the type and nature of the interaction effect and reach the verities that have the least role in creating interaction effects. Various methods have been introduced to evaluate the interaction effect, each of which examines the nature of the interaction effect from a specific point of view. The GGE-biplot graphic method is a technique with suitable efficiency to investigate the genotype × environment interaction effect and provides good information about the studied genotypes and environments graphically. This study aimed to investigate the genotype × environment interaction effect using the GGE-biplot graphic method to evaluate genotypes, environments, and relationships between genotypes and environments. Finally, this research seeks to identify stable soybean genotypes with high grain yields under different environmental conditions.

Methods: In total, 27 new soybean lines along with Saba and Amir cultivars were evaluated under different environmental conditions in a randomized complete block design with three replications in four experimental field stations (Karaj, Gorgan, Sari, and Moghan) during the 2022 cropping season. The plots consisted of four rows of 5 m in length with 50 cm spacing between the rows. The GGE biplot statistical method (the genotype effect + genotype × environment interaction) was used to study the stability of genotypes in the studied environments. Plants were harvested at maturity, and then the seed yield was recorded for each genotype at each test environment.



Results: The results of the combined analysis of variance indicated that the effects of environments (E), genotypes (G), and genotype \times environment (G \times E) interaction were significant for seed yield, suggesting that the genotypes responded differently in the studied environmental conditions, making the stability analysis possible. The results of the genotype \times environment interaction analysis using the GGE-biplot method indicated that the two first and second principal components of the GGE-biplot explained 84.8% of the total seed yield variation, indicating the high validity of the biplot in explaining the variations of genotypes and the genotype \times environment interaction (G + GE). This study identified two mega-environments, the first of which included Gorgan and Mughan, and the second mega-environment included Sari and Karaj. Based on the polygon view of the biplot, the genotype G1 in Sari and Karaj environments, and the genotypes G21 and G22 in Gorgan and Moghan environments were superior genotypes with high specific adaptation. The results of the average environment coordinate biplot showed that the G1, G22, G5, and G9 genotypes produced the highest seed yield, respectively. On the other hand, the G28, G25, G16, and G19 genotypes produced the lowest seed yield, respectively. Based on the hypothetical ideal genotype biplot, the G22, G5, G16, G12, G14, and G9 genotypes were better than the other genotypes for seed yield and stability and showed high general adaptation to all environments. Moreover, the Karaj and Moghan environments were the nearest environments to the ideal environment with the highest discriminating ability and representativeness. Therefore, the Karaj and Moghan environments can be used as a suitable test location for selecting superior soybean genotypes.

Conclusion: Based on the results of this study, the G22, G5, G16, G12, G14, and G9 genotypes are superior for seed yield and stability in this study. Therefore, these hybrids can be used for further testing, including adaptation tests. Besides, the results show that the Karaj and Moghan environments can be used as suitable test locations for selecting superior soybean genotypes. Generally, our results demonstrate the efficiency of the GGE-biplot graphical method to investigate the G \times E interaction effect and provide good information about the studied genotypes and environments.

Keywords: Ideal genotype, Seed yield, Soybean, Stability

How to Cite This Article: Bahram Masoudi, B., Gholizadeh, A., Majidian, P., Hezarjaribi, E., Razmi, N., & Shariati, F. (2024). A Study on the Genotype \times Environment Interaction in Promising Advanced Genotypes of Soybean using Graphical GGE-biplot Analysis. *J Crop Breed*, 16(4), 77-88. DOI: [10.61186/jcb.16.4.77](https://doi.org/10.61186/jcb.16.4.77)



مقاله پژوهشی

بررسی اثر متقابل ژنوتیپ × محیط در لاین‌های پیشرفته امیدبخش سویا با استفاده از تجزیه گرافیکی GGE-biplot

بهرام مسعودی^۱، امیر قلی‌زاده^۲ ID، پرستو مجیدیان^۳، ابراهیم هزار جریبی^۴، نسرين رزمی^۵ و فرناز شریعتی^۱

- ۱- استادیار، بخش تحقیقات دانه‌های روغنی، مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران
 ۲- استادیار، بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان گلستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، گرگان، ایران، (نویسنده مسوول: a.gholizadeh@areeo.ac.ir)
 ۳- استادیار، بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان مازندران، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ساری، ایران
 ۴- استادیار، بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان گلستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، گرگان، ایران
 ۵- استادیار، بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اردبیل، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مغان، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۲۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۰۷

صفحه: ۷۷ تا ۸۸

چکیده مسوط

مقدمه و هدف: دانه‌های روغنی از جمله مهم‌ترین منابع تأمین انرژی در سراسر جهان می‌باشند. سویا یک محصول مهم زراعی می‌باشد که روغن آن ارزش غذایی و اقتصادی بالایی دارد. سویا (*Glycine max* L.) گیاهی یک‌ساله و خودکشن، دیپلوئید، متعلق به تیره نخود *Leguminosae* می‌باشد و از مهم‌ترین گیاهان روغنی در جهان محسوب می‌شود که بسته به نوع ژنوتیپ و عوامل محیطی دارای ۱۸-۲۲ درصد روغن و ۴۰-۵۰ درصد پروتئین است. سویا قرن‌هاست که غذای مردم آسیا مخصوصاً چین بوده است و مردم چین آن را همراه با برنج به‌عنوان غذای اصلی خود مصرف می‌کنند. ایالات متحده آمریکا بزرگ‌ترین تولیدکننده سویا می‌باشد و تقریباً دوسوم محصول کل دنیا را تولید می‌کند. بهبود عملکرد دانه همیشه هدف اصلی در برنامه‌های اصلاحی سویا است. با بهره‌گیری از ارقام جدید و پربازده، می‌توان عملکرد اقتصادی سویا را افزایش داد. ارزیابی ژنوتیپ‌های پیشرفته امیدبخش سویا در شرایط محیطی مختلف، در شناسایی و انتخاب لاین‌های برتر با پتانسیل عملکرد بالا و پایدار ضروری می‌باشد. ارزیابی اثر متقابل ژنوتیپ × محیط مطالعات ارزشمندی در رابطه با عملکرد ارقام گیاهی در محیط‌های مختلف فراهم کرده و نقش مهمی در بررسی پایداری عملکرد ارقام اصلاح شده دارد. اثرات متقابل ژنوتیپ × محیط از عوامل مهم محدود کننده در معرفی ارقام جدید محسوب می‌شود. اثر متقابل ژنوتیپ × محیط مسئله‌ای مهم در مطالعه صفات کمی می‌باشد زیرا پایداری عملکرد در محیط‌های مختلف را کاهش می‌دهد و همچنین تفسیر آزمایش‌های ژنتیکی را دشوار و پیش‌بینی‌ها را با مشکل مواجه می‌سازد. لذا شناخت نوع و ماهیت اثر متقابل و دستیابی به ارقامی که کمترین واکنش را نسبت به اثرات متقابل نشان دهند از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. روش‌های مختلفی برای ارزیابی اثرات متقابل معرفی شده است که هر یک ماهیت اثر متقابل را از دیدگاه مشخصی بررسی می‌کنند. در این میان روش گرافیکی GGE-biplot روشی با کارایی مناسب برای بررسی اثر متقابل ژنوتیپ × محیط بوده و اطلاعات خوبی در مورد ژنوتیپ‌ها و محیط‌های مورد مطالعه به‌صورت گرافیکی در اختیار قرار می‌دهد. هدف از اجرای این مطالعه، بررسی اثر متقابل ژنوتیپ × محیط با استفاده از روش گرافیکی GGE-biplot به‌منظور ارزیابی ژنوتیپ‌ها، محیط‌ها، روابط ژنوتیپ‌ها و محیط‌ها و در نهایت شناسایی ژنوتیپ‌های پایدار با عملکرد دانه بالا تحت شرایط محیطی مختلف در سویا بود.

مواد و روش‌ها: تعداد ۲۷ لاین جدید سویا به‌همراه ارقام صبا و امیر تحت شرایط محیطی مختلف در چهار ایستگاه تحقیقاتی (کرج، گرگان، ساری و مغان) در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در سال زراعی ۱۴۰۱ مورد ارزیابی قرار گرفتند. هر کرت آزمایشی شامل چهار ردیف پنج متری با فاصله بین ردیف‌های ۵۰ سانتی‌متر بود. برای ارزیابی پایداری و سازگاری ژنوتیپ‌ها در محیط‌های مورد بررسی از روش آماری GGE بای‌پلات با مدل اثر ژنوتیپ + برهمکنش ژنوتیپ × محیط استفاده شد. در زمان رسیدگی محصول عملکرد دانه برای هر ژنوتیپ در هر محیط اندازه‌گیری گردید.

یافته‌ها: نتایج تجزیه مرکب عملکرد دانه نشان داد که اثر محیط، اثر ژنوتیپ و اثر متقابل ژنوتیپ × محیط معنی‌دار بود. معنی‌دار بودن اثر متقابل ژنوتیپ × محیط، بیانگر واکنش متفاوت ژنوتیپ‌ها در محیط‌های مختلف بود و از این‌رو، امکان تجزیه پایداری ژنوتیپ‌ها وجود داشت. نتایج تجزیه اثر متقابل ژنوتیپ × محیط با روش GGE-biplot نشان داد که دو مؤلفه اول و دوم GGE-biplot، ۸۴/۸ درصد از تغییرات کل عملکرد دانه را توجیه کردند که نشان دهنده اعتبار بالای بای‌پلات در توجیه تغییرات ژنوتیپ و برهمکنش ژنوتیپ × محیط (G+GE) بود. در این مطالعه دو محیط کلان شناسایی گردید که محیط کلان اول شامل محیط‌های گرگان و مغان بود. محیط کلان دوم نیز شامل محیط‌های ساری و کرج بود. براساس نمایش چندضلعی بای‌پلات، لاین G1 در محیط‌های ساری و کرج و ژنوتیپ‌های G21 و G22 در محیط‌های گرگان و مغان، ژنوتیپ‌های برتر و با سازگاری خصوصی بالا بودند. نتایج نمودار مختصات محیط متوسط نشان داد که ژنوتیپ‌های G1، G22، G5 و G9 به‌ترتیب بیشترین عملکرد دانه را دارا بودند. از طرف دیگر ژنوتیپ‌های G28، G25، G16، G19 و به‌ترتیب کمترین مقدار عملکرد دانه را دارا بودند. بر اساس بای‌پلات ژنوتیپ فرضی ایده‌آل، ژنوتیپ‌های G22، G5، G16، G12، G14 و G9 از نظر هر دو عامل پایداری و میانگین عملکرد دانه، بهتر از سایر ژنوتیپ‌ها بودند و سازگاری عمومی بالایی در همه محیط‌های مورد بررسی داشتند. همچنین نتایج نشان داد که محیط‌های کرج و مغان نزدیک‌ترین محیط‌ها به محیط ایده‌آل بودند و بیشترین تمایز و بیانگری را نشان دادند. بنابراین می‌توان از محیط‌های کرج و مغان به‌عنوان محل ارزیابی مناسب برای انتخاب ژنوتیپ‌های برتر سویا استفاده کرد.

نتیجه‌گیری: براساس نتایج این پژوهش، ژنوتیپ‌های G22، G5، G16، G12، G14 و G9 از نظر هر دو عامل پایداری و میانگین عملکرد دانه، ژنوتیپ‌های برتر این آزمایش بودند و می‌توان از آن‌ها برای انجام آزمایشات بیشتر از جمله آزمایشات سازگاری استفاده نمود. همچنین نتایج نشان داد که محیط‌های کرج و مغان به‌عنوان محل ارزیابی مناسب برای انتخاب ژنوتیپ‌های برتر سویا شناسایی شدند. به‌طور کلی نتایج نشان داد که روش گرافیکی GGE-biplot روشی با کارایی مناسب برای بررسی اثر متقابل ژنوتیپ × محیط بوده و اطلاعات خوبی در مورد ژنوتیپ‌ها و محیط‌های مورد مطالعه در اختیار قرار می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: پایداری، ژنوتیپ ایده‌آل، سویا، عملکرد دانه

مقدمه

است. سویا یکی از مهم‌ترین گیاهان دانه روغنی می‌باشد که بسته به نوع ژنوتیپ و عوامل محیطی دارای ۱۸-۲۲ درصد روغن و ۴۰-۵۰ درصد پروتئین است (Smith & Huyser,)

سویا (*Glycine max* L.) گیاهی دو لپه، یک‌ساله از خانواده لگومینوز و یک گیاه زراعی بسیار مهم در سطح جهان

این روش می‌توان روابط بین محیط را نیز مورد ارزیابی قرار داد. غفاری و همکاران (Ghaffari *et al.*, 2021) نیز با استفاده از روش گرافیکی GGE-biplot برای ارزیابی سازگاری و پایداری در آفتابگردان گزارش کردند که استفاده از روش GGE-biplot ابزاری قوی و کارا جهت معرفی و آزادسازی ارقام در مراحل نهایی آزمایشات ارزیابی عملکرد است و همچنین با استفاده از این روش می‌توان محیط‌های ایده‌آل و محیط‌های کلان را در آزمایشات آفتابگردان معرفی نمود.

از روش گرافیکی GGE-biplot برای ارزیابی ژنوتیپ‌ها و محیط در آزمایشات چندمحیطی در گیاهان دیگر از قبیل فستوکا بلند (Dehghani *et al.*, 2016)، ذرت (Sserumaga *et al.*, 2018)، سورگوم (Hamidou *et al.*, 2019)، گندم زمستانه (Gerrish *et al.*, 2019)، برنج (Jia *et al.*, 2020)، لوبیا (Da Cruz *et al.*, 2020)، جو (Ghazvini *et al.*, 2022)، گشنیز (Gholizadeh & Taleghani, 2023) و چغندر (Saremirad, 2022) استفاده شده است. هدف از اجرای این مطالعه، بررسی اثر متقابل ژنوتیپ × محیط با استفاده از روش گرافیکی GGE-biplot به منظور ارزیابی ژنوتیپ‌ها، محیط‌ها، روابط ژنوتیپ‌ها و محیط‌ها و در نهایت شناسایی ژنوتیپ‌های پایدار با عملکرد دانه بالا تحت شرایط محیطی مختلف در سویا بود.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش تعداد ۲۷ لاین پیشرفته امیدبخش سویا به همراه ارقام صبا و امیر در ایستگاه‌های تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی مغان، گرگان، ساری و کرج در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در سال زراعی ۱۴۰۱ مورد ارزیابی قرار گرفتند. کد، نام و شجره ژنوتیپ‌ها در جدول ۱ و برخی مشخصات اقلیمی مناطق اجرای آزمایش در جدول ۲ ذکر شده است. عملیات تهیه زمین شامل شخم، دیسک (جهت خردکردن کلوخه‌ها) و مال (جهت تسطیح) بود. براساس نتایج آزمون خاک کودهای ازت، فسفر و پتاس به زمین اضافه گردید. کشت به صورت جوی و پشته انجام شد. هر کرت آزمایشی شامل چهار ردیف پنج متری با فاصله بین ردیف‌های ۵۰ سانتی‌متر بود. پس از مرحله سبز شدن، به منظور کنترل علف‌های هرز پهن‌برگ و نازک‌برگ به ترتیب از علف‌کش‌های بازآگران و سلکت سوپر استفاده شد. جهت کنترل آفات از حشره‌کش‌هایی نظیر کونفیدور، دیمتوات، آد میرال و ... در مراحل مختلف رشد استفاده گردید. همچنین، آبیاری بر اساس نیاز آبی به صورت نشتی انجام گردید.

سویا به دلیل ویژگی‌های خاصی از قبیل افزایش نیتروژن خاک از طریق تثبیت بیولوژیکی نیتروژن، ارتقای سلامت بیولوژیکی خاک، بهبود خصوصیات خاک از طریق سیستم ریشه‌ای راست و عمیق آن، ترکیب بقایای گیاهی نظیر برگ‌های ریزش یافته با خاک، ارزش تناوبی بالا، عملکرد روغن و پروتئین بالا و تأمین کنجاله به‌عنوان مهمترین دانه روغنی در جهان به‌شمار می‌آید (Smith & Nelson, 1987). با توجه به این ویژگی‌های خاص، تولید سویا در کشور باید افزایش داشته باشد. به دلیل وجود محصولات رقیب و محدودیت کشت در تمام نقاط کشور و کمبود آب به دلیل تابستانه بودن، یکی از راه‌حل‌های مؤثر در افزایش تولید سویا، افزایش عملکرد در واحد سطح با کشت ژنوتیپ‌های پرمحصول است (Gholizadeh *et al.*, 2023). بنابراین به‌نژادگران سویا باید به دنبال اصلاح و تولید ژنوتیپ‌هایی با عملکرد دانه بالا و پایدار باشند. عملکرد دانه سویا تحت تأثیر شرایط محیطی، پتانسیل ژنتیکی و برهم‌کنش آن‌ها قرار می‌گیرد. شناسایی ژنوتیپ‌هایی که در شرایط محیطی مختلف دارای عملکرد مطلوب و پایداری باشند، به دلیل برهم‌کنش شدید ژنوتیپ × محیط، امر پیچیده‌ای به نظر می‌رسد. در برنامه‌های به‌نژادی به‌طور معمول، ژنوتیپ‌هایی به‌عنوان سازگار شناخته می‌شوند که واریانس اثر متقابل آن‌ها با محیط اندک باشد (Alizadeh *et al.*, 2021). روش‌های گوناگونی برای بررسی اثر متقابل ژنوتیپ × محیط توسط پژوهشگران در گیاهان مختلف به کار برده شده است. روش‌های بررسی اثر متقابل ژنوتیپ × محیط شامل روش‌های عددی و گرافیکی هستند که در این میان روش گرافیکی GGE-biplot روشی با کارایی مناسب برای بررسی اثر متقابل ژنوتیپ × محیط بوده و اطلاعات خوبی در مورد ژنوتیپ‌ها و محیط‌های مورد مطالعه به‌صورت گرافیکی در اختیار قرار می‌دهد (Yan & Kang, 2003). از روش گرافیکی GGE-biplot در مطالعات مختلف بر روی گیاهان زراعی استفاده شده است. دالو و همکاران (Dallo' *et al.*, 2019) و مجیدیان و همکاران (Majidian *et al.*, 2024) به‌منظور شناسایی ارقام پایدار و با عملکرد بالا سویا از روش GGE-biplot استفاده و گزارش کردند که روش گرافیکی GGE-biplot، روشی فوق‌العاده مناسب جهت ارزیابی و شناسایی ژنوتیپ‌های پایدار و با عملکرد بالا سویا بود. در پژوهش دیگری امیری اوغان و همکاران (Amiri Oghan *et al.*, 2020) در بررسی اثر متقابل ژنوتیپ × محیط در در کلزای بهاره از روش GGE-biplot استفاده و گزارش کردند که روش مذکور با رسم نمودارهای دوبعدی (تصاویر گرافیکی) ابزاری مناسب برای تجزیه و تحلیل اثر متقابل ژنوتیپ × محیط بوده و تفسیر نتایج را راحت‌تر می‌کند و با استفاده از

جدول ۱- شماره، کد و شجره ژنوتیپ‌های سویا مورد بررسی

Table 1. Code, name and pedigree of the tested soybean genotypes

شماره No.	کد Code	نام/شجره Name/Pedigree	عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار) Seed yield (kg.h ⁻¹)
1	G1	Clean×Dornburger	3049
2	G2	Clean×Dornburger	2671
3	G3	Linford×Dornburger	2472
4	G4	Linford×Dornburger	1835
5	G5	Linford×Dornburger	2624
6	G6	Manacon×Interprise	2119
7	G7	Manacon×Interprise	2476
8	G8	Manacon×Interprise	2060
9	G9	Manacon×Interprise	2550
10	G10	Manacon×Interprise	1912
11	G11	Union×Interprise	2534
12	G12	Roanak×Interprise	2603
13	G13	Roanak×Interprise	2263
14	G14	Roanak×Interprise	2598
15	G15	Roanak×Interprise	2319
16	G16	Roanak×Interprise	2606
17	G17	Roanak×Interprise	2366
18	G18	Roanak×Interprise	1971
19	G19	Roanak×Interprise	1833
20	G20	Roanak×Interprise	2196
21	G21	Roanak×Interprise	2496
22	G22	Roanak×Interprise	2764
23	G23	Roanak×Interprise	2284
24	G24	Roanak×Interprise	2023
25	G25	Roanak×Interprise	1800
26	G26	Roanak×OAC aub	2319
27	G27	Roanak×OAC aub	1973
28	G28	Saba	1616
29	G29	Amir	2313

جدول ۲- خصوصیات اقلیمی محیط‌های مورد مطالعه در این تحقیق

Table 2. Agro-climatic characteristics of the environments studied in this research.

متوسط بارندگی سالانه (میلی‌متر) Average annual rainfall (mm)	ارتفاع از سطح دریا (متر) Altitude (m)	عرض جغرافیایی (درجه دقیقه) Latitude (N)	طول جغرافیایی (درجه دقیقه) Longitude (E)	مکان Location
250	60	36° 41'	53° 10'	مغان Moghan
460	5	36° 54'	54° 25'	گرگان Gorgan
650	29	36° 41'	53° 10'	ساری Sari
300	1312	35° 56'	50° 54'	کرج Karaj

در رابطه فوق Y_{ij} ، ارزش میانگین ژنوتیپ \bar{A}_m برای محیط j ام، μ ، میانگین کل ژنوتیپ‌ها، β_j ، اثر اصلی محیط j ام، g_{i1} و e_{1j} به ترتیب مقادیر اولیه برای ژنوتیپ \bar{A}_m و محیط j ام، g_{i2} و e_{2j} به ترتیب مقادیر ثانویه برای برای ژنوتیپ \bar{A}_m و محیط j ام، و e_{ij} باقی‌مانده‌ای است که به وسیله آثار اولیه و ثانویه توضیح داده نمی‌شود. در واقع یک بای‌پلات GGE از طریق رسم g_{i1} در مقابل g_{i2} و e_{1j} در مقابل e_{2j} یک نمودار پراکنش ایجاد می‌کند (Yan & Kang, 2003).

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس مرکب صفت عملکرد دانه نشان داد که اثر محیط در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). با توجه به این که محیط‌های آزمایش طیف وسیعی از فاکتورهای محیطی (ارتفاع از سطح دریا، درجه حرارت، میزان بارندگی و نوع خاک) را دارا بوده، بنابراین معنی‌دار شدن اثر محیط دور از انتظار نیست. مجیدیان و همکاران (Majidian *et al.*, 2024) نیز معنی‌دار شدن اثر محیط را در سویا گزارش کردند. اثر معنی‌دار ژنوتیپ نیز بیانگر تنوع ژنتیکی بین مواد آزمایشی است. همچنین نتایج تجزیه واریانس مرکب نشان داد که اثر متقابل ژنوتیپ × محیط در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). معنی‌دار شدن اثر متقابل ژنوتیپ ×

پس از رسیدگی محصول، جهت اندازه‌گیری عملکرد دانه، ابتدا ۵/۰ متر از ابتدا و انتهای هر خط جهت از بین بردن اثر حاشیه حذف گردید. در ادامه تمام بوته‌های کرت برداشت شد و دانه‌های به‌دست آمده با ترازوی دقیق توزین گردید و پس از تبدیل، به‌عنوان عملکرد دانه در واحد سطح (کیلوگرم در هکتار) محاسبه شد.

تجزیه و تحلیل آماری

ابتدا وضعیت نرمال بودن داده‌ها از طریق آزمون کولموگوروف-اسیمروف (Kolmogorov-Smirnov) با استفاده از نرم‌افزار SPSS ver 20 (2010) مورد بررسی قرار گرفت. سپس آزمون بارتلت به‌منظور بررسی یکنواختی واریانس محیط‌ها انجام و در ادامه تجزیه واریانس مرکب با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS ver 9.1 (SAS Institute Inc, 2011) انجام شد. با توجه به معنی‌دار شدن اثر متقابل ژنوتیپ × محیط، تجزیه گرافیکی با استفاده از روش بای‌پلات (Yan & Kang, 2003) انجام گردید. به‌منظور رسم نمودارهای بای‌پلات، میانگین عملکرد دانه ژنوتیپ‌ها در محیط‌های مختلف به‌صورت یک ماتریس دوطرفه تنظیم و به نرم‌افزار GGE بای‌پلات معرفی گردید. رسم نمودارهای بای‌پلات براساس دو مؤلفه اصلی اول و دوم صورت گرفت. مدل آماری این روش براساس رابطه (۱) است.

$$Y_{ij} - \mu - \beta_j = g_{i1}e_{1j} + g_{i2}e_{2j} + e_{ij} \quad (1)$$

روش‌ها، به‌طور همزمان اثر اصلی ژنوتیپ و اثر متقابل ژنوتیپ × محیط را مورد استفاده قرار می‌دهد (Yan & Kang, 2003). از آنجایی که محیط یک عامل غیرقابل کنترل است، بنابراین در روش GGE-biplot از منابع تغییر اثر ژنوتیپ و اثر متقابل ژنوتیپ × محیط که قابل توصیه و تفسیر هستند استفاده می‌شود تا نتایج قبل اعتمادتری حاصل شود (Yan et al., 2000).

محیط در این مطالعه نشان‌دهنده این مطلب است که ژنوتیپ‌ها در محیط‌های مختلف پاسخ‌های متفاوتی نشان داده و به‌عبارت دیگر عملکرد ژنوتیپ‌ها از محیطی به محیط دیگر یکسان نیست و پایداری عملکرد دانه و تجزیه اثر متقابل ژنوتیپ × محیط باید مورد بررسی قرار گیرد. بنابراین در این پژوهش از روش گرافیکی GGE-biplot به‌منظور تجزیه اثر متقابل ژنوتیپ × محیط استفاده شد. این روش برخلاف سایر

جدول ۳- تجزیه واریانس مرکب عملکرد دانه ژنوتیپ‌های سویا در محیط‌های مختلف

Table 3. Combined analysis of variance for seed yield and oil yield of soybean genotypes in different environments.

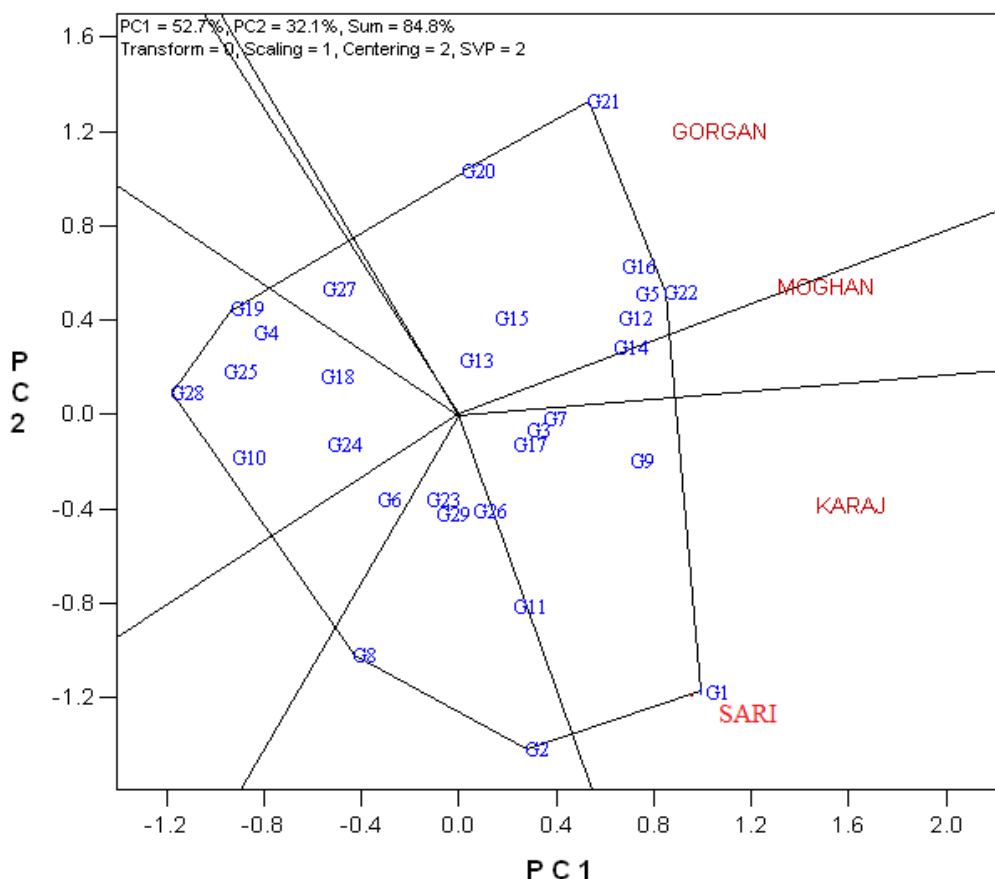
عملکرد دانه Seed yield	مجموع مربعات Sum of squares	درجه آزادی df	منابع تغییرات Source of variations
میانگین مربعات Mean square			
8591285**	25773855	3	محیط Environment (E)
167397	1339179	8	تکرار درون محیط Replication/E
1376564**	38543786	28	ژنوتیپ Genotype (G)
654362**	54966428	84	ژنوتیپ × محیط G × E
129416	28989240	224	خطا Error
		15.65	ضریب تغییرات CV

** معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۱

** Significant at the 0.01 probability level

G19، G21 و G22 که در رأس‌های چندضلعی قرار گرفته و که بیشترین فاصله را از مبدأ بای‌پلات داشته‌اند، به‌عنوان ژنوتیپ‌های برتر شناسایی شدند (شکل ۱). همچنین در این مطالعه دو محیط کلان مشخص گردید که محیط کلان اول شامل محیط‌های گرگان و مغان بود که ژنوتیپ‌های G21 و G22 ژنوتیپ‌های برتر این محیط‌ها بودند. در محیط کلان دوم نیز محیط‌های ساری و کرج قرار گرفتند که لاین G1، G2، G8، G28، G19 و نیز که در رأس نمودار چندضلعی قرار گرفته بودند، در هیچ‌کدام از محیط‌های کلان قرار نگرفتند که بیانگر عدم تولید عملکرد دانه بالای این ژنوتیپ‌ها در کلیه محیط‌ها بود (شکل ۱). در محیط کلان اول ژنوتیپ‌های G16، G20، G5، G12 و G14 علاوه بر ژنوتیپ‌های قرار گرفته در رأس چندضلعی (ژنوتیپ‌های G21 و G22) وجود داشتند. این ژنوتیپ‌ها نیز شباهت بالایی با ژنوتیپ‌های قرار گرفته در رأس چندضلعی و سازگاری خصوصی بالایی با محیط‌های قرار گرفته در آن قسمت داشتند. از نمودار چندضلعی برای مشخص نمودن محیط‌های کلان و نیز برای شناسایی ژنوتیپ‌های برتر در محیط‌های مختلف توسط سایر پژوهشگران استفاده شده است (Temesgen et al., 2015; Gholizadeh et al., 2022; Mahdavi et al., 2022).

نتایج حاصل از روش گرافیکی GGE-biplot نشان داد که دو مؤلفه اصلی اول و دوم در مجموع ۸۴/۸ درصد از تغییرات داده‌ها را توجیه کردند که بیانگر اعتبار بالای بای‌پلات به‌دست آمده در توجیه تغییرات مربوط به ژنوتیپ و اثر متقابل ژنوتیپ × محیط بود (شکل ۱). یکی از پرکاربردترین و مهمترین کاربردهای روش گرافیکی GGE-biplot، رسم نمودارهای چندضلعی (Polygon) می‌باشد. این نمودار متشکل از یک چندضلعی می‌باشد. خط‌هایی که از مبدأ نمودار بای‌پلات و عمود بر هر طرف چندضلعی رسم می‌شوند، نمودار بای‌پلات را به چند قسمت تقسیم می‌کنند. در درون هر قسمت (محیط کلان)، ژنوتیپی که در رأس چندضلعی قرار می‌گیرد، از نظر محیط یا محیط‌هایی که در آن قسمت قرار گرفته‌اند دارای برتری و سازگاری خصوصی می‌باشد. علاوه بر ژنوتیپ قرار گرفته در رأس چندضلعی، ژنوتیپ‌هایی که در آن قسمت قرار می‌گیرند، شباهت زیادی با ژنوتیپ قرار گرفته در رأس چندضلعی دارند و از نظر محیط‌های قرار گرفته در آن قسمت برتر می‌باشند. بنابراین واریانس کم درون هر قسمت (محیط کلان) و واریانس زیاد بین قسمت‌های (محیط‌های کلان) مختلف از ویژگی‌های نمودار چندضلعی (Polygon) می‌باشد. در این مطالعه نتایج نمودار نمودار چندضلعی بای‌پلات نشان داد که هفت لاین G1، G2، G8، G28.



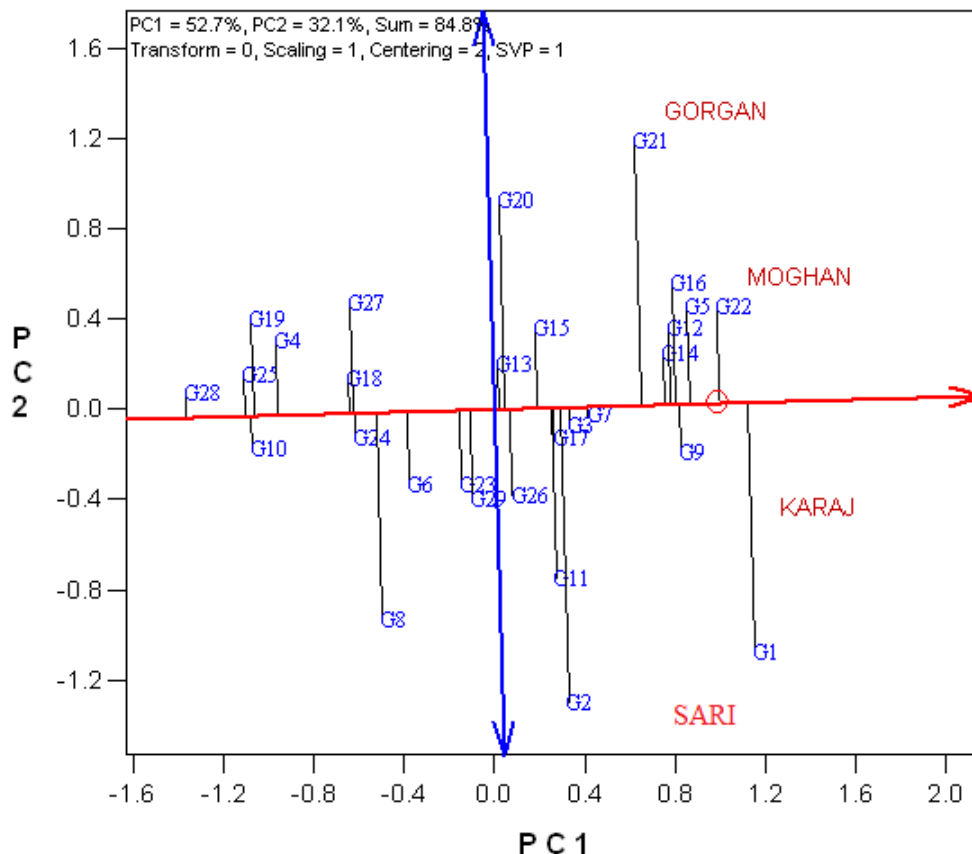
شکل ۱- نمایش چندضلعی بای‌پلات برای گروه‌بندی ژنوتیپ‌ها و محیط‌ها در سویا؛ PC1: مؤلفه اصلی اول، PC2: مؤلفه اصلی دوم
Figure 1. Biplot polygon view for grouping the genotypes and environments in soybean; PC1: the first principal component, PC2: the second principal component

است. ژنوتیپ‌ها در طول محور افقی AEC (محوری که با دایره و فلش مشخص شده است) براساس عملکرد رتبه‌بندی می‌شوند و جهت پیکان نشان‌دهنده میانگین عملکرد بالاتر است. همچنین محور افقی AEC بیانگر پایداری می‌باشد و هر لایینی که به این محور نزدیک باشد، پایدارتر است (Yan *et al.*, 2000). محور عمودی AEC که دارای دو فلش است که از مبدأ بای‌پلات می‌گذرد و بر محور افقی AEC عمود است، بیانگر متوسط عملکرد ژنوتیپ‌ها است. به‌طوری‌که ژنوتیپ‌هایی که در سمت راست محور عمودی AEC قرار گرفته‌اند، دارای عملکرد بالاتر از میانگین عملکرد کل و ژنوتیپ‌هایی که در سمت چپ این محور قرار گرفته‌اند، عملکردی کمتر از میانگین عملکرد کل را دارا می‌باشند. نتایج بای‌پلات مختصات محیط نشان داد که ژنوتیپ‌های G1، G5 و G9 به ترتیب بیشترین عملکرد دانه را دارا بودند و ژنوتیپ‌های G25، G28، G16 و G19 به ترتیب با قرار گرفتن در انتهای محور افقی AEC کمترین مقدار عملکرد دانه را دارا بودند (شکل ۲). ژنوتیپ‌های G22، G5، G9، G16، G12 و G14 که با فاصله کمتری از محور افقی AEC قرار گرفته‌اند، دارای پایداری بالایی بودند که میانگین عملکرد آن‌ها نیز از میانگین عملکرد کل بالاتر بود. ژنوتیپ‌های G1 و G21 با وجود اینکه دارای عملکرد دانه بالایی بودند ولی

محیط‌هایی که در یک محیط کلان قرار می‌گیرند، دارای حداقل اثر متقابل ژنوتیپ × محیط نسبت به هم بوده و به‌عبارت دیگر دارای اثر متقابل از نوع غیرمتقاطع (Non-crossover) نسبت به هم هستند. در مقابل محیط‌هایی که در محیط‌های کلان متفاوت قرار می‌گیرند دارای برهم‌کنش متقاطع یا کراس‌اوری نسبت به هم هستند (Yan & Kang, 2003). با توجه به نتایج گروه‌بندی محیط‌ها، می‌توان نتیجه گرفت که هردو نوع اثر متقابل (متقاطع و غیرمتقاطع) در آزمایش‌های چندمحیطی سویا وجود دارد. در یک برنامه اصلاحی هنگامی که اثر متقابل ژنوتیپ × محیط از نوع غیرمتقاطع (Non-crossover) باشد، می‌توان از آن چشم‌پوشی کرد و تنها برپایه عملکرد تصمیم گرفت. اما اگر اثر متقابل از نوع متقاطع (Crossover interaction) باشد، باید اثر ژنوتیپ و اثر متقابل ژنوتیپ × محیط را به‌طور همزمان در نظر گرفت و نباید فقط اثر ژنوتیپ را در نظر گرفت. در پژوهش بابایی و همکاران (Babaei *et al.*, 2021) نیز هر دو نوع اثر متقابل در سویا گزارش گردیده است. در این پژوهش به‌منظور بررسی همزمان عملکرد و پایداری ژنوتیپ‌ها از نمودار مختصات محیط متوسط (Average Environment Coordinate; AEC) استفاده گردید (شکل ۲). این نمودار دارای دو محور افقی و عمودی

پرمحصول در آفتابگردان (Hemmati *et al.*, 2018)، گندم نان (Jafari & Farshadfar, 2018) و کلزا (Roodi *et al.*, 2022) استفاده شده است.

به دلیل داشتن فاصله بیشتر از محور افقی AEC از پایداری کمتری برخوردار بودند (شکل ۲). از نمودار مختصات محیط متوسط AEC به منظور شناسایی ژنوتیپ‌های پایدار و

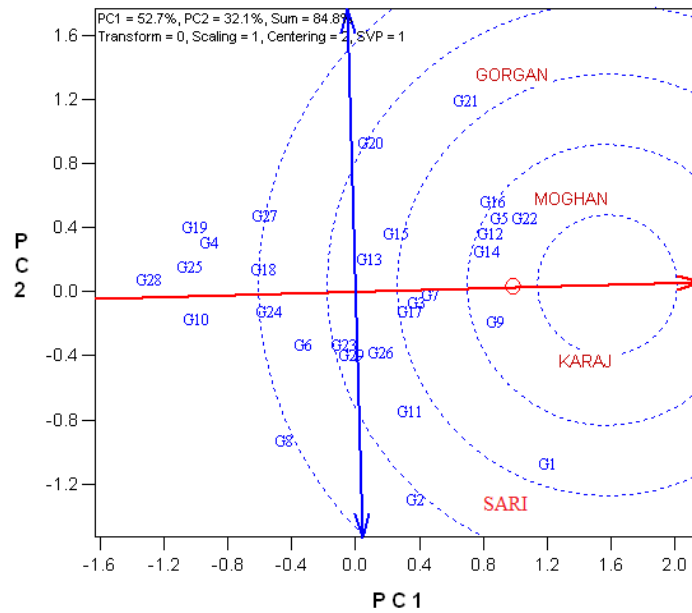


شکل ۲- نمایش بای‌پلات برای گزینش همزمان عملکرد و پایداری در ژنوتیپ‌های سویا؛ PC1: مؤلفه اصلی اول، PC2: مؤلفه اصلی دوم

Figure 2. Biplot view for simultaneous selection of yield and stability in the soybean; PC1: the first principal component, PC2: the second principal component genotypes

کاربرد دیگر روش گرافیکی GGE-biplot. مقایسه ژنوتیپ‌های مورد مطالعه با یک ژنوتیپ ایده‌آل است (شکل ۳). ژنوتیپ ایده‌آل فرضی ژنوتیپی است که از نظر مکانی به صورت یک دایره کوچک روی محور میانگین عملکرد ژنوتیپ‌ها قرار می‌گیرد و دارای بیشترین عملکرد و پایداری می‌باشد (Yan & Kang, 2003). چنین ژنوتیپی دارای بیشترین طول روی بردار میانگین ژنوتیپ‌های با عملکرد بالا بوده و حداقل نقش را در اثر متقابل ژنوتیپ × محیط دارا می‌باشد. بنابراین، مبنای رتبه‌بندی بر مبنای میانگین عملکرد و پایداری است. بر اساس این نمودار لاینی با عملکرد بالا و

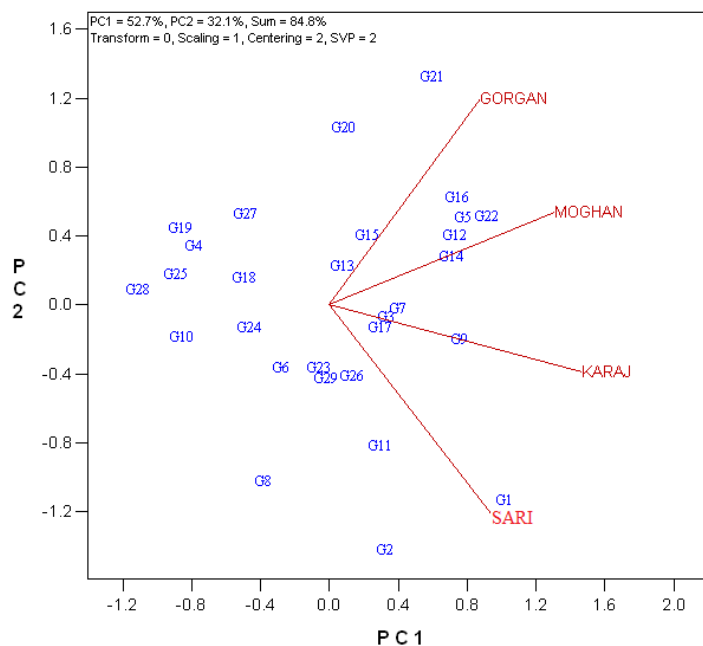
پایدار شناخته می‌شود که فاصله کمتری را با ژنوتیپ ایده‌آل فرضی دارد. در شکل ۳، ژنوتیپ‌های G16، G9، G5، G22 و G14 و G12 کمترین فاصله را از ژنوتیپ ایده‌آل فرضی دارند و بنابراین به عنوان مناسب‌ترین ژنوتیپ‌ها در این پژوهش شناخته شدند. دادرس و همکاران (Dadras *et al.*, 2017) و بابایی و همکاران (Babaei *et al.*, 2020) از نمودار ژنوتیپ ایده‌آل فرضی برای مقایسه ژنوتیپ‌های سویا با ژنوتیپ ایده‌آل استفاده نموده و گزارش کردند که این روش، ابزاری قوی و کارا برای شناسایی ژنوتیپ‌هایی است که دارای بیشترین عملکرد و پایداری می‌باشند.



شکل ۳- نمایش بای‌پلات برای مقایسه ژنوتیپ‌های مورد مطالعه با ژنوتیپ ایده‌آل در سویا؛ PC1: مؤلفه اصلی اول، PC2: مؤلفه اصلی دوم
Figure 3. Biplot view to compare the studied genotypes with the ideal genotype in soybean; PC1: the first principal component, PC2: the second principal component

همبستگی منفی و اگر زاویه بین دو بردار محیط ۹۰ درجه باشد، همبستگی وجود ندارد. بررسی همبستگی بین محیط‌ها نشان داد (شکل ۴) که زاویه بین بردارهای محیطی گرگان و مغان، کرج و مغان، ساری و کرج کمتر از ۹۰ درجه بود که بیانگر همبستگی مثبت بین این محیط‌ها بود. همچنین زاویه بین بردارهای محیط‌های گرگان و ساری بالاتر از ۹۰ درجه بود که بیانگر همبستگی منفی بین این دو محیط بود.

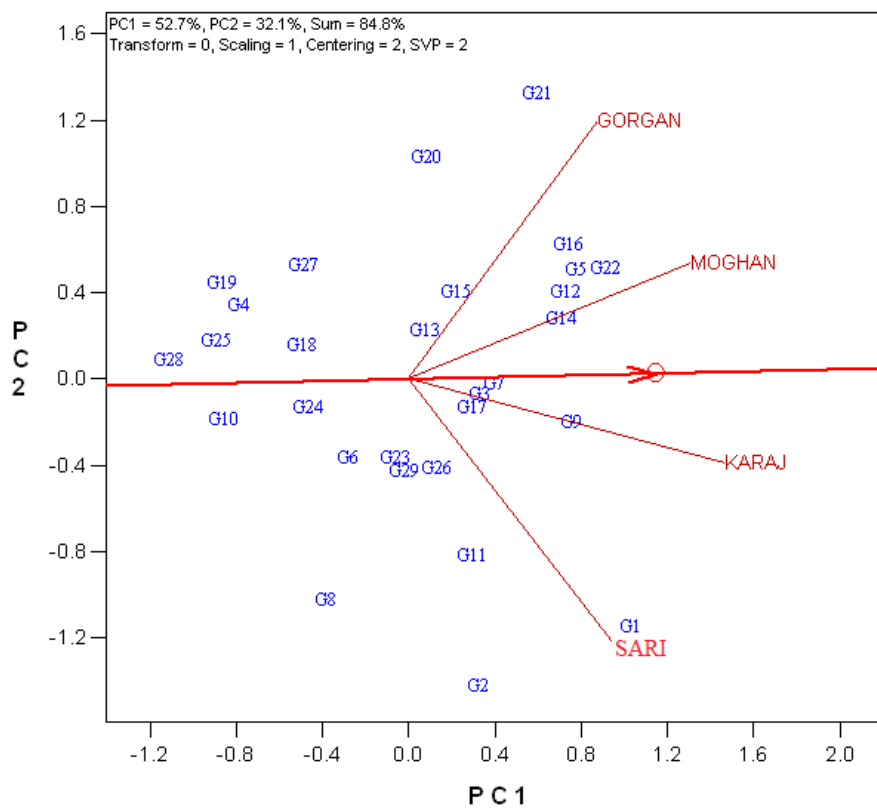
به منظور شناسایی رابطه بین محیط‌های مورد بررسی از روش گرافیکی GGE-biplot می‌توان استفاده کرد. در نمایش برداری (Vector view) محیط‌ها از طریق خط‌هایی به اسم بردار به مبدأ بای‌پلات وصل می‌شوند و برای برآورد همبستگی بین محیط‌ها از کسینوس زاویه بین بردارهای محیط‌ها استفاده می‌شود. اگر زاویه بین دو بردار محیط کمتر از ۹۰ درجه باشد، بین دو محیط همبستگی مثبت وجود دارد. زمانی که زاویه بین دو بردار محیط بیشتر از ۹۰ درجه باشد،



شکل ۴- نمایش بای‌پلات برای بررسی روابط بین محیط‌های مورد مطالعه در سویا؛ PC1: مؤلفه اصلی اول، PC2: مؤلفه اصلی دوم
Figure 4. Biplot view for displaying the relationships among the studied environments in soybean; PC1: the first principal component, PC2: the second principal component

درباره ژنوتیپ‌های مورد آزمایش ارائه دهند. بنابراین، یک محیط ایده‌آل محیطی است که می‌تواند به‌عنوان نماینده بقیه محیط‌های آزمایش باشد و نیز دارای بیشترین توانایی تمایز ژنوتیپ‌ها می‌باشد (Jafari & Farshadfar, 2018). در این پژوهش محیط‌های کرج و مغان نزدیک‌ترین محیط‌ها به محیط ایده‌آل فرضی بودند (شکل ۵) و به‌عنوان محیط‌های مطلوب جهت گزینش ژنوتیپ‌های برتر سویا معرفی می‌شوند. از نمودار بای‌پلات محیط‌ها به‌منظور ارزیابی قدرت تمایز و بیانگری محیط‌ها در کلزا (Pourdad & Jamshidi, 2013) (Moghadam, 2013)، جو (Ghazvini et al., 2022) و چغندر قند (Taleghani and Saremirad, 2022) استفاده شده است.

یکی دیگر از ویژگی‌های مهم نمودار بای‌پلات محیط‌ها، میزان بیانگری یا نمایندگی محیط آزمایشی از محیط کلان است. محیط‌ها را بر مبنای فاصله آن‌ها از محیط ایده‌آل فرضی رتبه‌بندی می‌کنند. محیط ایده‌آل فرضی محیطی است که از نظر مکانی در مرکز دوایر هم مرکز بای‌پلات قرار دارد و دارای بیشترین قابلیت بیانگری و تمایز باشد (Yan and Kang, 2003). زاویه بین بردار هر محیط و محور مختصات محیط متوسط (محور افقی) شاخصی برای تشخیص میزان بیانگری یک محیط است. هرچه قدر این زاویه کوچکتر باشد میزان بیانگری بیشتر بوده و محیط مورد نظر نماینده بهتری از محیط کلان هدف خواهد بود. اگر محیط‌های آزمایش نماینده محیط کلان نباشند، ممکن است اطلاعات گمراه‌کننده‌ای



شکل ۵- نمایش بای‌پلات برای مقایسه محیط‌های مورد مطالعه با محیط ایده‌آل در سویا؛ PC1: مؤلفه اصلی اول، PC2: مؤلفه اصلی دوم
Figure 5. Biplot view to compare the studied environments with the ideal environment in soybean; PC1: the first principal component, PC2: the second principal component

ژنوتیپ‌های G22, G5, G9, G16, G12, G14 و از نظر هر دو عامل پایداری و میانگین عملکرد دانه، بهتر از سایر ژنوتیپ‌ها بودند و سازگاری عمومی بالایی در همه محیط‌های مورد بررسی داشتند و می‌توان از آن‌ها برای انجام آزمایشات بیشتر از جمله آزمایشات سازگاری استفاده نمود. همچنین نتایج نشان داد که محیط‌های کرج و مغان نزدیک‌ترین محیط‌ها به محیط ایده‌آل بودند و بیشترین تمایز و بیانگری را نشان دادند. بنابراین می‌توان از محیط‌های کرج و مغان به‌عنوان محل ارزیابی مناسب برای انتخاب ژنوتیپ‌های برتر سویا استفاده کرد.

نتیجه‌گیری کلی

به‌طور کلی نتایج نشان داد که روش گرافیکی GGE-biplot روشی با کارایی مناسب برای بررسی اثر متقابل ژنوتیپ × محیط بوده و اطلاعات خوبی در مورد ژنوتیپ‌ها و محیط‌های مورد مطالعه به‌صورت گرافیکی در اختیار قرار می‌دهد. براساس نمایش چندضلعی بای‌پلات، لاین G1 در محیط‌های ساری و کرج و ژنوتیپ‌های G21 و G22 در محیط‌های گرگان و مغان، ژنوتیپ‌های برتر و با سازگاری خصوصی بالا بودند. براساس بای‌پلات ژنوتیپ فرضی ایده‌آل،

تشکر و قدردانی

اصلاح و تهیه نهال و بذر به پاس تأمین هزینه‌های اجرای پروژه و نیز از مراکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی گلستان، ساری و اردبیل به‌جهت فراهم نمودن امکانات اجرای پروژه تقدیر و تشکر به‌عمل می‌آید.

این پژوهش براساس نتایج حاصل از اجرای پروژه مصوب به‌شماره ۰۰۳-۰۳-۰۰۸-۰۱۰۷۳ مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر است. بدین‌وسیله از مؤسسه تحقیقات

References

- Alizadeh, B., Rezaizad, A., Yazdandoost Hamedani, M., Shiresmaeili, G., Nasserghadimi, F., Khademhamzeh, H. R., & Gholizadeh, A. (2021). Analysis of genotype \times environment interaction for seed yield in winter rapeseed cultivars and lines using multivariate method of additive main effects and multiplicative interaction. *Journal of Crop Production and Processing*, 11(1), 95-108 [In Persian]
- Amiri Oghan, H., Rameeh, V., Faraji, A., Fanaei, H. R., Kazerani, N. K., & Rahmanpour, S. (2020). Evaluation of seed yield stability of spring rapeseed genotypes using GGE biplot analysis. *Seed and Plant Journal*, 36, 207-222 [In Persian]
- Babaei, H. R., Razmi, N., Raeisi, S., & Sabzi, H. (2020). Evaluation of adaptability and seed yield stability of soybean (*Glycine max* L. Merrill) promising lines using GGE biplot analysis. *Iranian Journal of Crop Sciences*, 22(2), 183-197 [In Persian]
- Babaei, H. R., Razmi, N., & Sabzi, H. (2021). Study on grain yield stability of soybean genotypes [*Glycine max* (L.) Merrill] through GGE biplot analysis. *Applied Field Crops Research*, 34(1), 39-54.
- Da Cruz, D. P., de Amaral Gravina, G., Vivas, M., Entringer, G. C., Rocha, R. S., da Costa Jaeggi, M. E. P., Gravina, L. M., Pereira, I. M., do Amaral Junior, A. T., & de Moraes, R. (2020). Analysis of the phenotypic adaptability and stability of strains of cowpea through the GGE Biplot approach. *Euphytica*, 216, 1-11.
- Dadras A. R., Samizadeh, H., & Sabouri, H. (2017). Evaluation of soybean varieties and advanced lines yield under drought stress conditions using GGE biplot analysis. *Journal of Crop Breeding*, 9(23), 18-26 [In Persian].
- Dallo, S. C., Zdziarski, A. D., Woyann, L. G., Milioli, A. S., Zanella, R., Conte, J., & Benin, G. (2019). Across year and year-by-year GGE biplot analysis to evaluate soybean performance and stability in multi-environment trials. *Euphytica*, 215, 1-12.
- Dehghani, M. R., Majidi, M. M., Mirlohi, A., & Saeidi, G. (2016). Integrating parametric and non-parametric measures to investigate genotype \times environment interactions in tall fescue. *Euphytica*, 208, 583-596.
- Gerrish, B. J., Ibrahim, A. M., Rudd, J. C., Neely, C., & Subramanian, N. K., (2019). Identifying mega-environments for hard red winter wheat (*Triticum aestivum* L.) production in Texas. *Euphytica*, 215, 1-9.
- Ghaffari, M., Gholizadeh, A., Andarkhor, S. A., Zareei Siahbidi, A., Kalantar Ahmadi, S. A., Shariati, F., & Rezaeizad, A. (2021). Stability and genotype \times environment analysis of oil yield of sunflower single cross hybrids in diverse environments of Iran. *Euphytica*, 217(10), 187.
- Ghazvini, H., Bagherikia, S., Pour-Aboughadareh, A., Sharifalhossaini, M., Razavi, S. A., Mohammadi, S., GhasemiKalkhoran, M., Fathihafshejani, A., & Khakizade, G. (2022). GGE biplot analysis of promising barley lines in the cold regions of Iran. *Journal of Crop Improvement*, 36(4), 461-472.
- Gholizadeh, A., Masoudi, B., Hezarjaribi, E., & Payghamzadeh, K. (2022). Simultaneous selection for seed yield and other agronomic traits in promising advanced lines of soybean. *Journal of Crop Breeding*, 14(44), 190-198 [In Persian]
- Gholizadeh, A., & Khodadadi, M. (2023). Graphic analysis of genotype, environment and genotype \times environment interaction for oil yield in coriander. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 16(2), 277-289 [In Persian]
- Gholizadeh, A., Khodadadi, M., & Sharifi-Zagheh, A. (2022). Evaluation of genotype \times environment interaction for essential oil yield of coriander genotypes under different irrigation conditions using GGE biplot method. *Environmental Stresses in Crop Sciences*. 15(1), 43-52 [In Persian]
- Hamidou, M., Souleymane, O., Ba, M. N., Danquah, E. Y., Kapran, I., Gracen, V., & Ofori, K. (2019). Identification of stable genotypes and genotype by environment interaction for grain yield in sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench). *Plant Genetic Resources*, 17, 81-86.
- Hemmati, I., Pourdard, S. S., & Choukan, R. (2018). Studying the genotype \times environment interaction under different conditions of moisture stress using graphical GGE biplot analysis in synthetic varieties of sunflower (*Helianthus annuus* L.). *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 11, 471-480 [In Persian]
- Jafari, T., & Farshadfar, E. (2018). Stability analysis of bread wheat genotypes (*Triticum aestivum* L.) by GGE biplot. *Cereal Research*, 8, 199-208 [In Persian]
- Jia, C., Wang, F., Yuan, J., Zhang, Y., Zhao, Z., Abulizi, B., Wen, X., Kang, M., & Tang, F. (2020). Screening and comprehensive evaluation of rice (*Oryza sativa* L. subsp. japonica Kato) germplasm resources for nitrogen efficiency in Xinjiang, China. *Plant Genetic Resources*, 18, 179-189.

- Mahdavi, A. M., Babaeian Jelodar, N., Farshadfar, E., & Bagheri, N. (2022). Study of grain yield stability of bread wheat genotypes using non-parametric method and GGE biplot. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 15(2), 287-298 [In Persian]
- Majidian, P., Masoudi, B., Hezarjeribi, E., Razmi, N., Peyghamzadeh, K., & Gholizadeh, A. (2024). Deciphering genotype-by-environment interaction in new soybean lines based on multiple traits using different adaptability and stability methods. *Food Science & Nutrition*, 1-14.
- Pourdad, S. S., & Jamshidi Mohjadam, M. (2013). Study on genotype × environment interaction through GGE biplot for seed yield in spring rapeseed (*Brassica Napus* L.) in rain-fed condition. *Journal of Crop Breeding*, 5, 1-13 [In Persian]
- Roodi, D., Ghodrati, G., Kazerani, N., & Masoudi, B. (2022). Investigation the yield stability of brassica genotypes (*Brassica* spp.) under drought dtress by using statistical parameters and GGE biplot graphical methods. *Journal of Crop Breeding*, 14(42), 138-147 [In Persian]
- SAS Institute Inc. (2011). SAS/STAT user's guide, second edition. SAS institute Inc., Cary, Nc.
- Smith, J. R., & Nelson, R. L. (1987). Predicting yield from early generation estimates of reproductive growth periods in soybean. *Crop Science*, 27, 471-474.
- Smith, K. J. & Huyser, W. (1987). World distribution and significance of soybean. In: J. R. Wilcox (Ed). Soybeans: Improvement, Production, and Uses. Second Edition. American Society of Agronomy, Madison, WI. pp. 1-22.
- SPSS Inc. (2010). SPSS 20. Users Guided. Chicago, USA.
- Sserumaga, J. P., Oikeh, S. O., Mugo, S., Asea, G., Otim, M., Beyene, Y., Abalo, G., & Kikafunda, J. (2016). Genotype by environment interactions and agronomic performance of doubled haploids testcross maize (*Zea mays* L.) hybrids. *Euphytica*, 207, 353-365.
- Taleghani, D., & Saremirad, A. (2022). Investigation of genotype-environment interaction effect on sugar yield and determination of stability of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) hybrids. *Journal of Crop Breeding*, 14(44), 103-118 [In Persian]
- Temesgen, M., Alamerew, S., & Eticha, F. (2015). GGE biplot analysis of genotype by environment interaction and grain yield stability of bread wheat genotypes in south east Ethiopia. *World Journal of Agricultural Sciences*, 11, 183-190.
- Yan, W., Hunt, L., Sheng, Q., & Szlavnic, Z. (2000). Cultivar evaluation and mega-environment investigation based on the GGE biplot. *Crop Science*, 40, 597-605.
- Yan, W., & Kang, M. S. (2003). GGE biplot analysis: A graphical tool for breeders, geneticists and agronomists. CRC Press, Boca Raton, FL, USA.