

Evaluation of grain yield stability of soybean genotypes (*Glycine max* L.) to drought stress through stability analysis using two methods: AMMI and GGE-Biplot

Saeed Amiri ^{*a}

^a Department of Agriculture, Faculty of Engineering, Payam Noor University, Tehran, Iran

*Corresponding Author: Dasyar_p86@pnu.ac.ir

Received: 1 October 2025

Accepted: 15 February 2026

DOI: 10.22034/CSRAR.2026.550448.1518

How to cite this article:

Amiri, S. 2026. Evaluation of grain yield stability of soybean genotypes (*Glycine max* L.) to drought stress through stability analysis using two methods: AMMI and GGE-Biplot. *Crop Science Research in Arid Regions*, 8(1), 13-26. <https://doi.org/10.22034/csrar.2026.550448.1518>

Abstract

Introduction: Soybean (*Glycine max* L.) is the most important oil crop in the world. Soybean yield and its geographical distribution in the country can be severely limited by abiotic stress such as drought. There is a constant need to improve soybean cultivars with stable yields in different environments. The main goal of the mostly soybean breeding programs is the selection of desirable genotypes with high yield and stability. Genotype $\times$ environment interactions for quantitative traits such as grain yield cause genotypes to have different relative yields in different environments. In many statistical methods that have been used to determine yield stability and adaptability of cultivars, some basic assumptions of stability analysis, such as the nonlinear response of genotype and environment and dependence of environmental index on the mean of genotypes, are not true.

The soybean genotype's stability and high performance are essential factors for long-term development and food security. That the occurrence of various stresses, including drought stress, can cause high losses in the production and supply of this product. This factor has caused the wide attention of researchers to evaluate the stable and tolerant genotypes to drought stress in different environments to introduce the best variety. For grain yield stability analysis, genotype by environment interactions are crucial in properly identifying and discriminating between varieties.

Materials and Methods: To investigate the effect of drought stress on the stability of soybean yield, an experiment with 19 soybean genotypes was conducted in two environments without stress (weekly irrigation) and drought stress (biweekly irrigation) in a randomized complete block design with three replications in two consecutive years in Khorramabad.

Results and Discussion: The results of the combined analysis of variance of grain yield in two experiments in two years showed that grain yield was significantly affected by the simple and interaction effects of year and genotype ($p < 0.01$). The percentage contribution of the variance of environment, genotype, and genotype-environment interaction was 58.3, 20.7, and 16.04%, respectively, and for this reason, the stability of the grain yield of the genotypes was evaluated through two graphical methods, AMMI and GGE-biplot. The results of the comparison of the means showed that the highest grain yield was obtained in non-stress conditions in genotypes G2, G3, G4, and G13, and in drought stress conditions in genotypes G5, G9, G11, and G13. According to the biplot diagram



of the two principal components, IPC1 and IPC2 in the AMMI analysis method, the genotypes G2, G3, G4, and G16 were distributed in the center of the biplot, in addition to high yield, and had general stability in all environments. In this method, the genotypes with specific stability to non-stressed and stressed environments were also identified. In the GGE-Biplot method using a polygonal diagram display, genotypes 9G, 11G, and 13G had specific stability to the stress environment, and genotypes G2, G3, and G4 were compatible with the natural environment. Also, to simultaneously select the branch yield and stability of the genotypes, the display of the average environmental coordinate (AEC) line that passes through the coordinate axis was used, and genotypes G2, G3, G4, and G13, which were located near the ATC line, in addition to having high yield, had stable performance in all environments.

Conclusion: The soybean genotypes' stability and high performance are essential factors for long-term development and food security. Therefore, based on both methods, genotypes 2G, 3G, 4G, and 13G were identified as high-yielding and stable genotypes in both stress-free and drought stress conditions. Among them, genotype G13 in drought stress conditions and genotype G7 with special stability in normal irrigation are recommended for subtropical climates such as Khorramabad and can be used in future breeding programs.

Keywords: Drought Stress, Grain Yield, AMMI, GGE-Biplot

ارزیابی پایداری عملکرد دانه ژنوتیپ‌های سویا (*Glycine max* L.) به تنش خشکی از طریق تجزیه پایداری به دو روش AMMI و GGE-بای پلات

سعید امیری*

۱- گروه کشاورزی، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

* مسئول مکاتبه: Dasyar_p86@pnu.ac.ir

DOI:10.22034/CSRAR.2026.550448.1518

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۲۶

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۰۹

چکیده

به منظور بررسی اثر تنش خشکی بر پایداری عملکرد دانه سویا (*Glycine max* L.)، آزمایشی با ۱۹ ژنوتیپ سویا در دو محیط بدون تنش (آبیاری هفتگی) و تنش خشکی (آبیاری هر دو هفته یکبار) در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار در دو سال متوالی انجام گردید. نتایج تجزیه واریانس مرکب عملکرد دانه در دو آزمایش در دو سال نشان داد که عملکرد دانه به طور معنی داری تحت تأثیر اثرات ساده و متقابل سال و ژنوتیپ قرار گرفت ($p < 0.01$). سهم درصد واریانس محیط، ژنوتیپ و اثر متقابل ژنوتیپ در محیط به ترتیب ۵۸/۳۱، ۲۰/۷۱ و ۱۶/۰۴ درصد بود. بیشترین عملکرد دانه در شرایط بدون تنش در ژنوتیپ‌های G2، G3، G4 و G13 و در شرایط تنش خشکی در ژنوتیپ‌های G5، G9، G11 و G13 به دست آمد. براساس نمودار بای پلات دو مولفه اصلی IPC1 و IPC2 در روش تجزیه AMMI ژنوتیپ‌های G2، G3، G4 و G16 علاوه بر عملکرد بالا در مرکز بای پلات پراکنش داشتند و دارای پایداری عمومی در همه محیط‌ها بودند. در روش GGE-بای پلات با استفاده از نمایش نمودار چندضلعی، ژنوتیپ‌های G9، G11، G13 دارای پایداری اختصاصی به محیط تنش داشتند و ژنوتیپ‌های G2، G3 و G4 با محیط طبیعی سازگاری داشتند. بنابراین براساس هر دو روش ژنوتیپ‌های G2، G3، G4 و G13 به عنوان ژنوتیپ‌های پرمحصول و پایدار در هر دو شرایط بدون تنش و تنش شناخته شدند که از بین آنها ژنوتیپ G13 در شرایط تنش خشکی و ژنوتیپ G7 با پایداری خصوصی در آبیاری نرمال برای اقلیم نیمه گرمسیری مانند خرم‌آباد قابل می شود.

واژه‌های کلیدی: تنش خشکی، عملکرد دانه، AMMI، GGE-بای پلات

مقدمه

می‌باشد (Ungureanu et al., 2020). با بررسی واکنش ژنوتیپ‌های مختلف سویا به تنش خشکی مشاهده گردید که تنش خشکی با اثر منفی بر وزن دانه، تعداد دانه در غلاف و تعداد شاخه فرعی سبب کاهش عملکرد دانه سویا شد (Yan et al., 2020). لذا یکی از بهترین راه‌های مقابله با تنش خشکی به کارگیری عملیات زراعی مناسب و استفاده از ارقامی است که تحمل بیشتری به خشکی داشته باشند.

از آنجایی که تجزیه و تحلیل روش‌های معمولی مثل استفاده از جدول‌های تجزیه واریانس مرکب فقط اطلاعاتی در مورد اثر متقابل ژنوتیپ و محیط به دست می‌دهد، محققان معیارهای متفاوتی را برای تشخیص پایداری ارقام و معرفی آنها بکار برده‌اند. روش اثرات اصلی جمع پذیر و اثر متقابل ضرب پذیر (AMMI) در واقع ترکیب تجزیه واریانس و تجزیه مؤلفه‌های اصلی می‌باشد. در این روش ابتدا با استفاده

تنش خشکی یکی از مهم‌ترین تنش‌های غیرزنده در تولید محصولات کشاورزی است که هر ساله خسارت‌های زیادی به گیاهان زراعی مخصوصاً سویا (*Glycine max* L.) وارد می‌نماید. سویا از گیاهان با ارزش تولید کننده دانه‌های روغنی می‌باشد که با داشتن روغن و پروتئین در بین دانه‌های روغنی در سطح دنیا بیشترین سطح زیر کشت را دارد. یکی از عوامل بسیار مهم که توسعه سطح زیر کشت و تولید موفقیت‌آمیز گیاه سویا را در کشور با خطر مواجه می‌سازد، کمبود آب می باشد. زیرا کم آبی از مهم‌ترین عوامل محدود کننده رشد گیاهان و تولید به حساب می‌آید و در حال حاضر هیچ راه منطقی برای افزایش نزولات جوی در طول دوره‌های خشکی وجود ندارد. در منابع اخیر گزارش شده است که عدم دسترسی به آب کافی مسئول بیش از ۵۲ درصد در عملکرد نهایی گیاهان زراعی

ژنوتیپ‌های برتر به کار می‌رود (Demelash, 2024; Abdi et al., 2025).

یکی از مشکلات اصلی در استان لرستان همانند دیگر مناطق کشور، کاهش سطح آب‌های زیرزمینی و حتی خشک شدن بسیاری از چاه‌ها در اثر مصرف بی‌رویه منابع آبی است. در این خصوص بررسی دامنه تحمل به خشکی سویا به‌منظور حداکثر صرفه‌جویی در مصرف آب آبیاری ضروری است؛ بنابراین، پژوهش حاضر با هدف بررسی برهم‌کنش ژنوتیپ × محیط در ژنوتیپ‌های سویا در دو شرایط طبیعی و تنش خشکی و شناسایی ژنوتیپ‌های با عملکرد بالا، پایدار از نظر عملکرد دانه به دو روش AMMI و GGE-بای‌پلات بررسی گردید.

مواد و روش‌ها

به‌منظور بررسی واکنش‌های مورفو-فیزیولوژیک گیاه سویا به تنش خشکی در کشت دوم (کشت تابستانه)، آزمایشی در تابستان سال‌های ۱۳۹۶ و ۱۳۹۷ در دو محیط طبیعی (آبیاری هفتگی) و تنش (آبیاری هر دو هفته یکبار) اجراء شد. در هر محیط ۱۹ ژنوتیپ سویا (جدول ۱) ارسالی از مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر کرج در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار مورد بررسی قرار گرفت.

از تجزیه واریانس معمولی اثرات اصلی جمع‌پذیر و بعد با استفاده از تجزیه مؤلفه‌های اصلی اثر متقابل ژنوتیپ و محیط را به یک تا n مؤلفه اصلی (PCA) که معروف به اثر متقابل ضرب‌پذیر است مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌دهند (Gauch, 1992). در دهه اخیر استفاده از روش گرافیکی یا روش GGE-بای‌پلات در بررسی اثر متقابل ژنوتیپ × محیط در برنامه‌های به‌نژادی متداول شده است. در این روش اثر ژنوتیپ و اثر متقابل ژنوتیپ × محیط از هم تفکیک نشده و گزینش ارقام پایدار براساس هر دو اثر مذکور صورت می‌گیرد (Olanrewaju et al., 2021). روش بای‌پلات یکی از مهم‌ترین روش‌های پارامتری چند متغیره است. بای‌پلات ابزار مناسبی برای توصیف و خلاصه نمودن ماتریس اطلاعات در تجزیه توصیفی داده‌ها می‌باشد. بای‌پلات اکثر تنوع موجود در یک ماتریس دو طرفه داده‌ها را نمایش می‌دهد. محققان روش GGE-بای‌پلات را برای آزمایش‌های ناحیه‌ای پیشنهاد کردند (Oyedele, 2020). روش GGE-بای‌پلات به صورت بصری روابط بین ژنوتیپ‌ها، محیط‌های آزمایشی و برهم‌کنش‌های ژنوتیپ × محیط، را بررسی کرده و روشی موثر برای توصیه ژنوتیپ‌های ویژه در مگا محیط‌های خاص، ارزیابی میانگین عملکرد و پایداری ژنوتیپ‌ها و تجزیه و تحلیل تاثیر محیط‌های هدف برای تشخیص

جدول ۱- نام ژنوتیپ‌های مورد آزمایش

Table 1- Names of genotypes tested

کد ژنوتیپ Genotype code	ژنوتیپ Genotype	گروه رسیدگی Handling group
G1	L504-14	Intimidate
G2	L504-6	Intimidate
G3	Collombus × Fora (L.6)	Intimidate
G4	Clean	Intimidate
G5	Dellsoy × Willo82 (L.2)	Intimidate
G6	LH 2500	Intimidate
G7	Dellsoy × Willo82 (L.5)	Intimidate
G8	Stress Land	Intimidate
G9	AVRDC-25	Intimidate
G10	AVRDC-21	Intimidate
G11	Collombus × Fora (L.13)	Intimidate
G12	Cheleston × Mustang (L.1)	Intimidate
G13	AVRDC-15	Intimidate
G14	Cheleston × Mustang (L.5)	Intimidate
G15	AVRDC-3	Intimidate
G16	Collombus × Fora (L.3)	Intimidate
G17	Kuthar	Intimidate
G18(Control ₁)	TMS	Intimidate
G19(Control ₂)	Habitt	Intimidate

جدول ۲- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نمونه خاک مزرعه تحقیقاتی

Table 2- Physical and chemical characteristics of the research field soil sample

سال کشت	هدایت الکتریکی	pH	فسفر	پتاسیم	نیترژن
Cultivation year	Electrical conductivity (dS.m)		P (ppm)	K (ppm)	N (ppm)
2017	1.27	7.6	12.1	332	0.31
2018	1.25	7.5	13.5	361	0.42

۹۰ درصد با استفاده از پمپ آب کنترل شد در زمان برداشت محصول عملکرد دانه دو ردیف وسط هر کرت آزمایشی با رعایت نیم متر حاشیه از طرفین از مساحت معادل ۴ مترمربع اندازه‌گیری و بر اساس ۱۲ درصد رطوبت محاسبه شد.

تجزیه آماری

پس از آزمون بارتلت و اطمینان از یکنواختی واریانس خطای آزمایش، تجزیه واریانس مرکب عملکرد دانه در دو محیط در دو سال انجام شد. مقایسه میانگین‌ها ژنوتیپ‌ها نسبت به شاهد به روش آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد مقایسه شدند. تجزیه آماری با استفاده نرم‌افزار آماری SAS 9.1 صورت گرفت. در تجزیه پایداری ۱۹ ژنوتیپ سویا برای عملکرد دانه از روش AMMI استفاده شد. در این روش برای تعیین پایداری عمومی و خصوصی (ارتباط دادن ژنوتیپ‌های مختلف به محیط‌های متفاوت) از نمودارهای بای پلات مؤلفه‌های اصلی اول و دوم استفاده شد (Zobel et al., 1988). علاوه بر این، تجزیه پایداری GGE-بای پلات به روش میان و همکاران انجام شد. تجزیه پایداری هر دو روش با استفاده از نرم افزار R-Ver4.5 انجام شد (Yan et al., 2000).

نتایج

تجزیه واریانس و مقایسه میانگین ژنوتیپ‌ها

نتایج تجزیه واریانس مرکب عملکرد دانه در دو آزمایش در دو سال نشان داد که تفاوت بین سال‌ها، بین ژنوتیپ‌ها و اثرات متقابل ژنوتیپ در سال معنی دار بود ($p < 0.01$) (جدول ۳). در شرایط آبیاری نرمال ژنوتیپ‌های G2، G3، G4، G5، G6، G7، G8، G9، G13، G16 با دامنه عملکرد ۲۹۰۸ (G9) تا ۴۲۵۰ کیلوگرم در هکتار (G7) نسبت به شاهد عملکرد بیشتری داشتند. در آبیاری دو هفته یکبار، ژنوتیپ‌های G1، G2، G3، G4، G5، G6، G8، G9، G11، G12، G13، G15.

عملیات آماده‌سازی زمین در اواخر بهار هر سال صورت گرفت. براساس نتایج آزمون خاک مقدار ۱۰۰ کیلوگرم کود اوره به همراه ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار کود فسفات آمونیوم و ۵۰ کیلوگرم در هکتار سولفات پتاسیم بصورت یکنواخت پاشیده شد و به وسیله دیسک سبک مخلوط گردید. آنگاه خطوط کاشت به فاصله ۵۰ سانتیمتر از یکدیگر با استفاده از دستگاه فاروئر ایجاد گردید. هر کرت مشتمل بر چهار خط کاشت به طول پنج متر بود. فاصله بین کرت‌های اصلی دو متر، کرت‌های فرعی یک متر و بین تکرارها سه متر در نظر گرفته شد. کلیه عملیات زراعی مطابق معمول منطقه و براساس توصیه‌های تحقیقاتی انجام پذیرفت. عملیات کاشت بذر ژنوتیپ‌های سویا به صورت دستی و در وسط شیار ایجاد شده روی هر پشته و به عمق حدود ۵ سانتیمتر در هفته اول تیر ماه انجام شد. در مرحله ۳ تا ۵ برگ حقیقی عملیات تنک کردن انجام شد، به این صورت که در هر ۱۰ سانتی‌متر یک بوته سالم و قوی نگهداری و بقیه حذف شدند و بدین ترتیب تراکم ۲۰ بوته در متر مربع بدست آمد. پس از عمل تنک، بقیه کود نیتروژنه به میزان ۵۰ کیلوگرم کود اوره به صورت سرک بین ردیف‌های کاشت پاشیده شد و زمین آبیاری گردید. عمل وجین علف‌های هرز به صورت دستی بسته به نیاز صورت گرفت.

جهت اعمال تیمارهای تنش خشکی، دو محیط در دو طرف آب‌پاش‌های سیستم آبیاری بارانی نیمه متحرک قرار گرفتند و یک هفته با نازل‌های دو طرفه هر دو محیط و یک هفته با نازل‌های یک طرفه تنها محیط طبیعی آبیاری شد. شروع تیمارهای تنش خشکی بعد از استقرار کامل بوته‌ها در مرحله ۴ برگ حقیقی بود. درصد رطوبت خاک در فواصل زمانی بین دو آبیاری اندازه‌گیری شد. میزان آب آبیاری برای رسیدن درصد رطوبت خاک به ظرفیت مزرعه (۲۷ درصد) و زمان آبیاری با توجه به حداکثر عمق نفوذ ریشه در خاک محاسبه گردید. میزان آب داده شده به هر کرت بر اساس توزیع آب با راندمان

G16، با دامنه عملکرد ۱۰۱۳ (G9) تا ۲۳۰۱ کیلوگرم در هکتار (G7) نسبت به شاهد عملکرد بیشتری داشتند. براساس میانگین کل داده های دو محیط در دو سال ژنوتیپ های G13، G12، G11، G9، G8، G7، G6، G5، G4، G3، G2، G16 با دامنه عملکرد ۲۰۵۱ (G12) تا ۲۷۹۱ کیلوگرم در هکتار (G13) نسبت به شاهد عملکرد بیشتری داشتند (جدول ۴).

جدول ۳- تجزیه واریانس مرکب عملکرد دانه در ژنوتیپ های سویا در ۴ محیط

Table 3- Combined ANOVA for grain yield across four environments

منبع تغییرات	درجه آزادی	واریانس	میانگین مربعات	درصد واریانس	درصد تجمعی
Source	Degree of Freedom	Variance	Mean of Square	Sum of Square S%	Cumulative%
Environment (E)	3	154648083	51549361**	58.37%	
Error 1	8	517790	64724		
Genotype (G)	18	54860621	3047812**	20.71%	
G × E	54	42498208	787004**	16.04%	
IPCA1	20	39840153	1992008	93.78%	93.8%
IPCA2	18	2576597	143144	6.06%	99.8%
IPCA3	16	67162	4198	0.16%	100%
Error 2	144	12412177	86196	4.68%	
Total	227	264936880			

**، Significant at 1% probability level.

**، معنی دار در سطح احتمال ۱ درصد

جدول ۴- مقایسه میانگین عملکرد دانه ژنوتیپ ها در شرایط آبیاری طبیعی و تنش خشکی به تفکیک سال های اول و دوم و مقادیر مؤلفه های اول و دوم اثر متقابل به روش و AMMI و GGE Biplot برای عملکرد ژنوتیپ های سویا در ۴ محیط

Table 4- Mean of grain yield of genotypes under natural irrigation and drought stress conditions, separated into the first and second years and the first two PC1 to IPC2 scores of (AMMI) and PC1 and PC2 of (GGE) of 19 genotypes at four environments

ژنوتیپ	آبیاری نرمال			تنش خشکی			کل	تجزیه آمی		تجزیه بای پلات	
	Normal Irrigation			Drought stress			Total	AMMI		GGE	
	سال	سال	میانگین	سال	سال	میانگین	میانگین	مؤلفه اول	مؤلفه دوم	مؤلفه اول	مؤلفه دوم
Line#	Year1	Year1	Mean	Year1	Year1	Mean	Mean	PC1	PC2	PC1	PC2
G1	2336.5	2021.9	2179.2	1299.7 ^a	1154.7 ^a	1227.2 ^a	1704	-13.51	-2.15	451	545
G2	3538.0 ^a	3497.9 ^a	3518.0 ^a	1925.0 ^a	1633.3 ^a	1779.2 ^a	2649 ^a	1.21	3.89	949	35
G3	3598.6 ^a	3213.9 ^a	3406.3 ^a	1694.5 ^a	1558.7 ^a	1626.6 ^a	2517 ^a	1.66	-5.70	908	55
G4	3686.1 ^a	3663.9 ^a	3675.0 ^a	1839.7 ^a	1558.8 ^a	1699.3 ^a	2687 ^a	5.57	3.80	839	149
G5	3193.8 ^a	2841.7 ^a	3017.8 ^a	2037.4 ^a	1922.3 ^a	1979.9 ^a	2499 ^a	-11.96	-3.42	671	321
G6	3885.4 ^a	3855.7 ^a	3870.6 ^a	1141.8 ^a	884.1 ^a	1013.0 ^a	2442 ^a	21.77	1.67	88	910
G7	4496.1 ^a	4005.4 ^a	4250.8 ^a	919.3	765.8	842.6	2547 ^a	31.54	-11.69	70	904
G8	2796.1	3418.9 ^a	3107.5 ^a	1359.0 ^a	1087.6 ^a	1223.3 ^a	2166 ^a	4.32	20.27	1	180
G9	3083.6 ^a	2733.5	2908.6 ^a	2276.1 ^a	2172.9 ^a	2224.5 ^a	2567 ^a	-18.47	-2.69	557	440
G10	2489.0	2403.4	2446.2	909.4	656.1	782.8	1614	-0.22	2.69	979	18
G11	2944.5 ^a	2591.0	2767.8	2111.4 ^a	2013.9 ^a	2062.7 ^a	2415 ^a	-18.09	-2.86	369	627
G12	2706.4	2638.8	2672.6	1570.5 ^a	1289.0 ^a	1429.8 ^a	2051 ^a	-7.94	4.20	56	877
G13	3462.3 ^a	3097.5 ^a	3279.9 ^a	2349.7 ^a	2253.6 ^a	2301.7 ^a	2791 ^a	-13.09	-3.69	865	132
G14	2713.4	2642.6	2678.0	797.6	569.6	683.6	1681	5.85	2.28	957	41
G15	2541.6	2213.9	2377.8	1122.6 ^a	961.7 ^a	1042.2 ^a	1710	-6.46	-3.20	752	237
G16	3146.7 ^a	3097.6 ^a	3122.2 ^a	1402.6 ^a	1135.8 ^a	1269.2 ^a	2196 ^a	3.29	3.30	98	723
G17	2839.6 ^a	2487.7	2663.7	1007.3 ^a	833.7	920.5	1792	1.03	-4.60	966	2
G18C	2678.0	2608.9	2643.5	556.2	333.0	444.6	1544	9.62	1.86	923	76
G19C	2334.6	2016.8	2175.7	376.8	182.2	279.5	1228	3.88	-3.95	995	3
Mean	3017.1	2889.6	2953.4	1386.4	1237.7	1312.1	2132.7				

میانگین ها که در هر ستون با حرف a مشخص شده اند براساس آزمون LSD دارای اختلاف معنی دار در سطح ۵ درصد با شاهد می باشند.

Means followed by letter a in each column are significantly different from the control at the 5% level based on the LSD test.

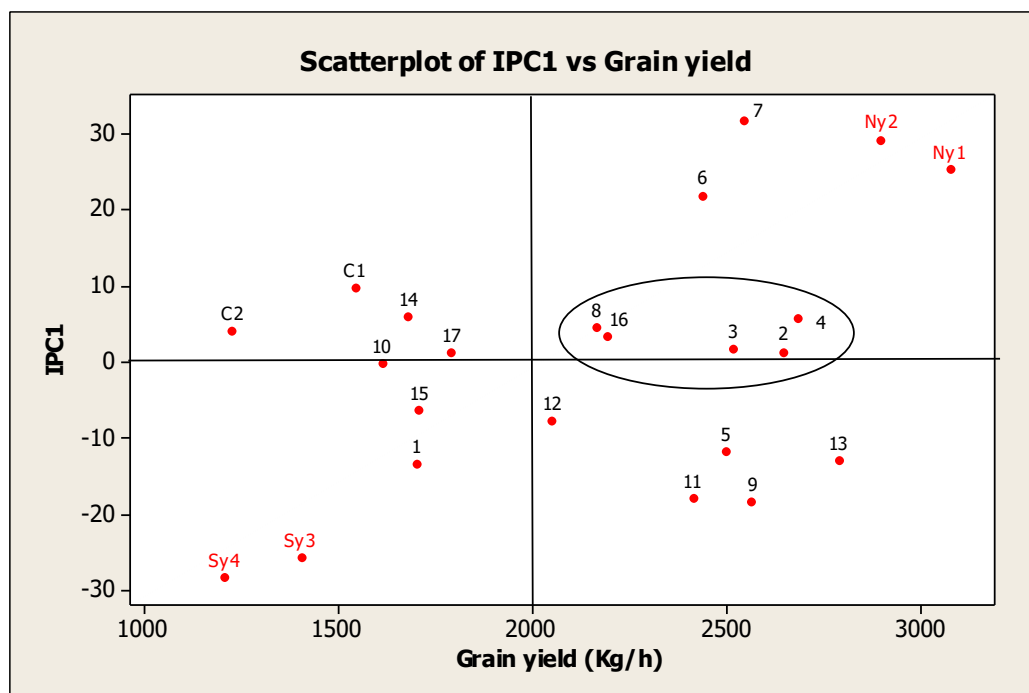
نام و مشخصات ژنوتیپ ها در جدول ۱ آمده است

The names and characteristics of the genotypes are given in Table 1

تجزیه AMMI

در تجزیه GGE-بای پلات دو مؤلفه اول را نشان داد که به ترتیب ۹۳٪ و ۶٪ از کل تغییرات عملکرد را در بین ژنوتیپ‌های ارزیابی شده در چهار محیط آزمایش شده تشکیل دادند (شکل ۱ و جدول ۴). با توجه به نمودار اینکه مؤلفه اول بیش از ۹۳٪ از واریانس اثر متقابل را بیان نمود، بنابراین بای پلات این مؤلفه به همراه میانگین عملکرد دانه بر حسب کیلوگرم در هکتار (شکل ۱) ارائه شد. همچنان که ملاحظه می‌گردد ژنوتیپ‌های

G2، G3، G4، G8 و G16 که دارای عملکرد بالا و موقعیت آنها نزدیک محور اصلی مؤلفه اول هستند پایداری عمومی بیشتری در همه محیط‌ها دارند ژنوتیپ‌های G6 و G7 دارای عملکرد دانه بیشتر و سازگاری خصوصی مطلوبی با شرایط آبیاری نرمال دارند (شکل ۱). از طرف دیگر با توجه موقعیت محیط‌ها که بر اساس مؤلفه اول بای پلات محیط‌ها تفکیک شدند و بیشترین و کمترین عملکرد دانه به ترتیب در شرایط نرمال و تنش بدست آمد.

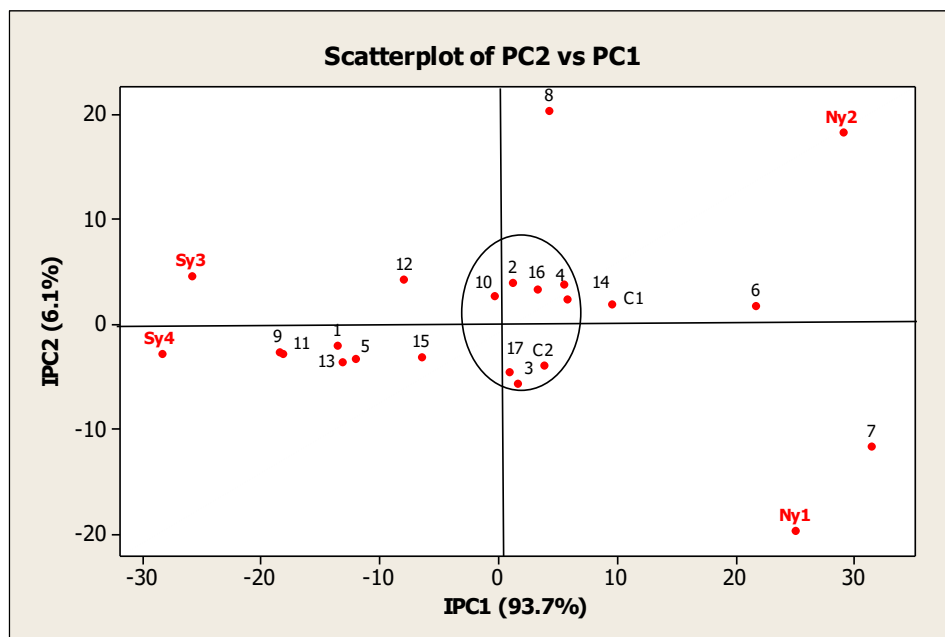


شکل ۱- نمایش بای پلات AMMI حاصل از مؤلفه IPC1 و میانگین عملکرد دانه در ۱۹ ژنوتیپ سویا در چهار محیط

Figure 1- AMMI biplot of the IPC1 and DM yield for 19 genotypes *Glycine max* across four environments. E1=N.yr1, E2=N.yr2
E3=S.yr1, E4=S.yr2

در ادامه با توجه به نمودار بای پلات مؤلفه‌های اول و دوم به ترتیب ۹۳٪ و ۶٪ از واریانس اثر متقابل را بیان نمود. (شکل ۲ و جدول ۴). در این نمودار ژنوتیپ‌هایی که عملکرد بیشتر و به مرکز بای پلات نزدیک‌تر هستند پایداری بیشتری دارند و ژنوتیپ‌هایی که از مرکز دور هستند، اثر متقابل ژنوتیپ در محیط بالایی دارند. با توجه به بای پلات عدم تمرکز محیط‌ها سبب شد که هر کدام جداگانه در یک منطقه بای پلات قرار بگیرند و محیط‌ها در سه دسته قرار گرفتند و محیط‌ها روندهای متفاوتی داشتند. بنابراین ژنوتیپ‌های G2، G3، G4، G10، G16 و G17 و شاهد با قرار گرفتن در مرکز بای پلات دارای

کمترین میزان اثر متقابل براساس هر دو مؤلفه بودند و بیشترین سازگاری عمومی را نشان دادند که در بین آنها G2، G3، G4 و G16 با داشتن عملکرد مطلوب به عنوان اکسشن‌های پایدار و دارای پتانسیل تولیدی عملکرد مناسب و قابل توجه می‌باشد. از طرف دیگر G8 و G6 با آبیاری نرمال سال ۱ و ژنوتیپ G7 با آبیاری زمال سال ۲ دارای سازگاری اختصاصی بودند. به همین ترتیب ژنوتیپ‌های G5، G9، G11 و G13 با شرایط تنش خشکی سازگاری خصوصی داشت (شکل ۲). در مقایسه دو روش AMMI، استفاده همزمان از دو مؤلفه اصلی با توجه به اینکه اطلاعات کاملتری را در بر دارد، مفیدتر است.



شکل ۲- بای پلات دو مولفه اصلی اول و دوم در تجزیه امی در ۱۹ ژنوتیپ سویا در ۴ محیط

Figure 2- AMMI IPC1 and IPC2 biplot of GE interaction for 19 genotypes Glycine max across four environments.

Ny1=Normal irrigation/year1, Ny2=Normal irrigation/year2, Sy1=Drought stress/year1, Sy2=Drought stress/year2

تنش سال دوم، تنش سال اول، آبیاری نرمال سال دوم، آبیاری نرمال سال اول

اساس میانگین عملکرد و پایداری، ۳) بررسی روابط بین محیط‌ها، ۴) رتبه‌بندی محیط‌ها بر اساس محیط ایده‌ال، ۵) رتبه‌بندی ژنوتیپ‌ها بر اساس ژنوتیپ ایده‌ال برای ژنوتیپ‌ها برتر نمایش داده می‌شوند (Yan, 2001).

که به شرح زیر برای رسم نمودار می‌باشند.

۱. الگوی "کدام ژنوتیپ (ها) برای کدام محیط" (Which)

(win where) مناسب‌ترند؟

۲. رتبه‌بندی گرافیکی ژنوتیپ‌ها بر اساس ترکیب همزمان

عملکرد با پایداری.

۳. رتبه‌بندی گرافیکی ژنوتیپ‌ها بر اساس ژنوتیپ مطلوب.

۴. رتبه‌بندی گرافیکی محیط‌ها بر اساس محیط ایده‌ال.

بر اساس نمودار چندوجهی محیط‌ها و ژنوتیپ‌های سازگار هر محیط تعیین شد. نمایش چندضلعی بای پلات مربوط به میانگین ۱۹ ژنوتیپ و شاهد در ۴ محیط نشان داد که ژنوتیپ‌های G1، G2، G7، G13 و G9 در راس‌های چندضلعی قرار گرفتند (شکل ۳). با توجه به نمودار چندضلعی، ژنوتیپ‌های G5، G11، G13 و G9 دارای پایداری اختصاصی به محیط تنش داشتند و ژنوتیپ‌های G7 و G6 با محیط طبیعی سازگاری داشتند و ژنوتیپ‌های G8 و G16 که در مرکز

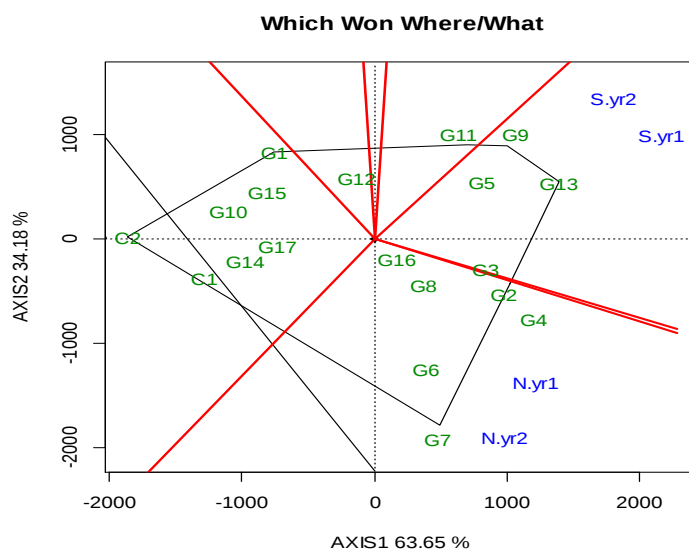
تجزیه GGE بای پلات

اثر ژنوتیپ و اثر متقابل ژنوتیپ و محیط بصورت گرافیکی توسط روش GGE-بای پلات برآورد شده و هم ژنوتیپ‌ها و هم محیط‌ها بصورت نمودار گرافیکی نمایش داده می‌شوند اثرات اصلی محیط، ژنوتیپ و اثر متقابل ژنوتیپ در محیط در سطح احتمال ۱٪ معنی‌دار بود (جدول ۳). معنی‌دار شدن اثر متقابل ژنوتیپ در محیط بیانگر این است که ژنوتیپ‌ها در محیط‌های مختلف عملکردهای متفاوتی داشته‌اند و برای تعیین رقم مناسب، لازم است تا پایداری عملکرد آنها مورد بررسی قرار گیرد. یکی از الزامات تجزیه پایداری تعیین سهم (درصد) واریانس محیط، ژنوتیپ و اثر متقابل ژنوتیپ در محیط (از کل واریانس) است. سهم (درصد) واریانس‌های محیط، ژنوتیپ و اثر متقابل ژنوتیپ در محیط، به ترتیب ۵۸/۳۷، ۲۰/۷۱ و ۱۶/۰۴ درصد بود، همان‌طور که ملاحظه می‌شود، سهم واریانس‌های محیط ژنوتیپ و اثر متقابل ژنوتیپ در محیط قابل توجه بودند و می‌توان تجزیه پایداری انجام داد (جدول ۳).

در تجزیه GGE بای پلات، اثر ژنوتیپ و اثر متقابل ژنوتیپ و محیط که مجموع آنها را به صورت GGE در ۵ الگو شامل: ۱) تعیین بهترین رقم در هر محیط، ۲) رتبه‌بندی ژنوتیپ‌ها بر

ژنوتیپ‌ها به فاصله آنها از ژنوتیپ ایده‌آل بستگی دارد. هر چقدر فاصله یک ژنوتیپ از ژنوتیپ ایده‌آل کمتر باشد مطلوبیت آن بیشتر و هر چقدر این فاصله بیشتر باشد مطلوبیت آن کمتر خواهد بود.

بای پلات قرار گرفتند دارای پایداری عمومی در هر محیط بودند. ژنوتیپ ایده‌آل ژنوتیپی فرضی است که دارای بیشترین عملکرد و پایداری بوده و از نظر مکانی در مرکز دایره متحدالمرکز بای پلات قرار دارد (Shojaei et al., 2022). میزان مطلوبیت

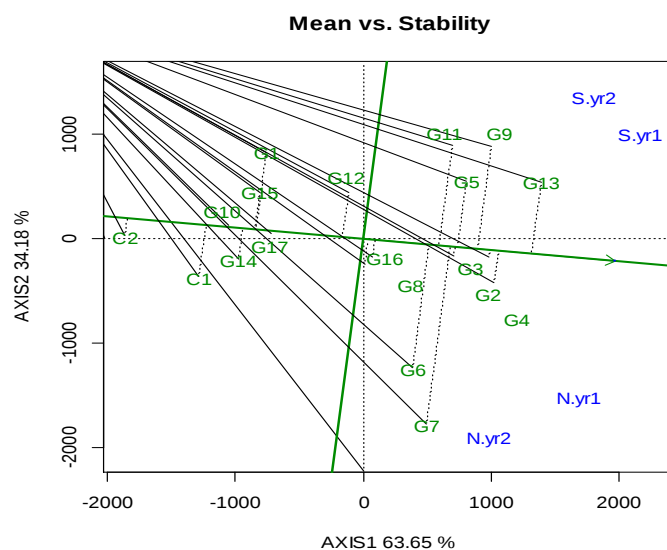


شکل ۳- نمودار بای پلات چندضلعی جهت تعیین ژنوتیپ‌های برتر سویا در دو شرایط طبیعی و تنش خشکی

Figure 3- Polygonal biplot diagram for determining superior soybean genotypes under both natural and drought stress conditions

AEC و نزدیک‌تر به بردار باشند پایداری عمومی بیشتری دارند. با توجه به نمودار بای پلات، ژنوتیپ G2، G3، G4، و G13 که نزدیک خط ATC قرار گرفتند که علاوه بر عملکرد بالا و دارای پایداری عملکرد در همه محیط‌ها نیز بودند.

جهت گزینش همزمان عملکرد سرشاخه و پایداری ژنوتیپ‌ها، از نمایش خط مختصات میانگین محیط (AEC) که از محور مختصات می‌گذرد استفاده شد (شکل ۴). ژنوتیپ‌هایی که در جهت ژنوتیپ ایده‌آل (بردار) روی خط AEC قرار دارند عملکرد بیشتری دارند. با این حال، هرچه ژنوتیپ‌ها به خط

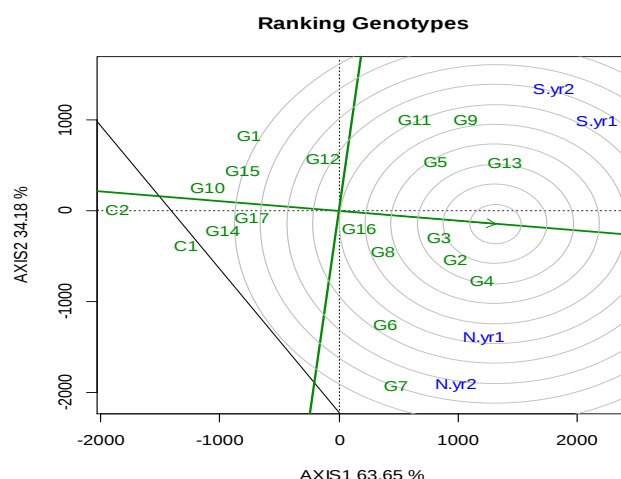


شکل ۴- نمودار بای پلات گزینش همزمان عملکرد و پایداری ژنوتیپ‌های سویا بر اساس خط مختصات میانگین محیط (AEC)

Figure 4- Biplot diagram of simultaneous selection of yield and stability of soybean genotypes based on the average environmental coordinate (AEC) line

قرار دارد، مطلوب‌تر در نظر گرفته می‌شود. رتبه‌بندی ژنوتیپ‌ها بر اساس ژنوتیپ ایده‌آل نشان داد که ژنوتیپ‌های G2، G3، G4، G5 و G13 بهترین ژنوتیپ‌ها بودند. ژنوتیپ‌های داخل دایره‌های رتبه‌بندی در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند و ژنوتیپ‌های خارج از دایره‌های رتبه‌بندی به دلیل عملکرد پایین یا اثر متقابل ژنوتیپ $\times$ محیط بالا (پایداری عملکرد پایین)، به عنوان ژنوتیپ‌های ضعیف در رتبه آخر قرار گرفتند.

در نمایش میانگین رتبه‌بندی ژنوتیپ‌ها بر اساس ژنوتیپ ایده‌آل (شکل ۵). ژنوتیپ ایده‌آل باید بالاترین میانگین عملکرد را داشته باشد و پایدار باشد و با داشتن بیشترین طول بردار ژنوتیپ‌های پرمحصول و بدون اثر متقابل ژنوتیپ $\times$ محیط، تعریف می‌شود. اگرچه چنین ژنوتیپ ایده‌آلی ممکن است وجود نداشته باشد، اما می‌تواند به عنوان مرجعی برای ارزیابی ژنوتیپ در نظر گرفته شود، و ژنوتیپی که در نزدیکی ژنوتیپ ایده‌آل

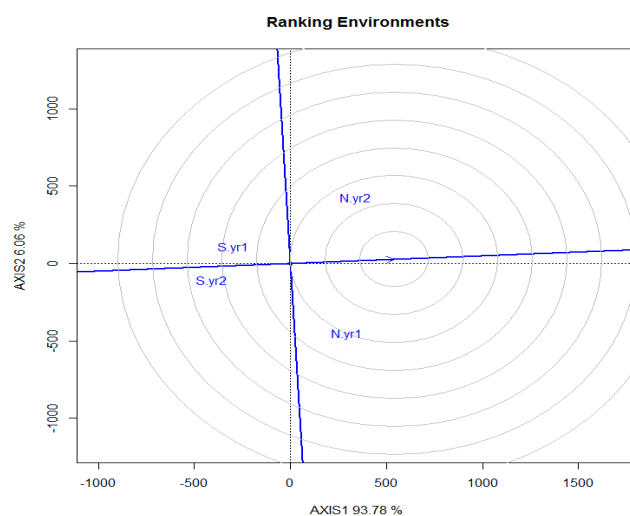


شکل ۵- نمایش میانگین رتبه بندی ژنوتیپ‌ها بر اساس ژنوتیپ ایده‌آل (مرکز دایره)

Figure 5- Display of the average ranking of genotypes based on the ideal genotype (center of the circle)

ژنوتیپ‌ها براساس این دو محیط و عملکرد بالای ژنوتیپ‌ها در این دو محیط بود. بر این اساس، محیط تنش در سال اول در رتبه سوم و در نهایت محیط تنش سال دوم در پایین‌ترین رتبه قرار گرفت.

ارزیابی رتبه‌بندی محیط‌ها براساس محیط ایده‌آل (شکل ۶) ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، محیط‌های آبی با نزدیک بودن به مرکز بای پلات به عنوان بهترین محیط‌ها در رتبه اول قرار گرفتند. دلیل این امر، قدرت تفکیک بالای



شکل ۶- نمایش میانگین رتبه بندی محیط‌ها بر اساس محیط ایده‌آل

Figure 6- GGE biplot for ranking the environments with the ideal environment

در مجموع نتایج نشان داد که GGE-بای پلات روشی کارا برای بررسی اثر متقابل ژنوتیپ در محیط بوده و اطلاعات مفیدی در خصوص ژنوتیپ‌های سویا و محیط‌های تحت بررسی در اختیار قرار می‌دهد. براساس میزان تولید دانه، ژنوتیپ شماره G7 برای شرایط طبیعی و ژنوتیپ شماره G9 برای شرایط تنش خشکی در شرایط اقلیمی نیمه گرمسیری مانند خرم‌آباد قابل توصیه و می‌توان در برنامه‌های به‌نژادی آتی استفاده نمود.

بحث

تنش خشکی را می‌توان به‌صورت فقدان آب کافی مورد نیاز برای رشد طبیعی و تکمیل چرخه زندگی گیاه تعریف نمود که روی فرآیندهای رشد و نمو موثر است (Seleiman et al., 2021). سویا گیاهی است حساس به تنش خشکی که کمبود رطوبت قابل دسترس ریشه به‌ویژه در مرحله گل‌دهی تا تشکیل دانه، عملکرد دانه را به شدت کاهش می‌دهد (Poudel et al., 2023). عملکرد دانه به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر اثرات ساده سال و ژنوتیپ قرار گرفت. اثر متقابل تنش خشکی در ژنوتیپ بر این صفت معنی‌دار بود (جدول ۳). معنی‌دار بودن اثر ژنوتیپ‌ها نشان‌دهنده وجود تنوع کافی بین ژنوتیپ‌های مورد مطالعه می‌باشد. براساس یافته‌های حاضر می‌توان بیان کرد که وجود تنوع در پاسخ ژنوتیپ‌های سویا به محیط‌های مختلف تنش آبی نشان می‌دهد که امکان بهبود عملکرد دانه و بهره‌برداری از تنوع ژنتیکی وجود دارد. یکی از الزامات تجزیه پایداری تعیین سهم (درصد) واریانس محیط، ژنوتیپ و اثر متقابل ژنوتیپ در محیط (از کل واریانس) است. سهم واریانس‌های محیط، ژنوتیپ و اثر متقابل ژنوتیپ در محیط، به ترتیب برای عملکرد ۵۸/۳۷، ۲۰/۷۱ و ۱۶/۰۴ درصد بود. اطلاعات حاصل از اثرات متقابل ژنوتیپ در محیط کمک می‌کند تا ژنوتیپ‌های با عملکرد بالا و پایدار با دقت بیشتر ارزیابی و انتخاب شوند (Pour-Aboughadareh et al., 2023).

مقایسه میانگین دو ساله نشان داد که بیشترین و کمترین عملکرد دانه در محیط طبیعی از ژنوتیپ‌های G7 و G19 (به ترتیب با میانگین ۴۲۵۰ و ۲۱۷۶ کیلوگرم در هکتار) و در محیط تنش از ژنوتیپ‌های G13 و G19 (به ترتیب با میانگین ۲۳۰۲ و ۲۸۰ کیلوگرم در هکتار به دست آمد (جدول ۴). این اختلافات مربوط به تفاوت‌های ژنتیکی می‌باشد. در شرایط تنش

خشکی، با کاهش میزان هدایت روزنه‌ای، سرعت سوخت و ساز کربن کم می‌شود؛ در نتیجه ضمن کاهش دوره مؤثر پر شدن دانه، میزان سقط غلاف افزایش می‌یابد و در نهایت موجب کاهش عملکرد می‌گردد (Wang et al., 2025).

عملکرد دانه صفت پیچیده‌ای است که با تعداد غلاف‌های پر در واحد سطح همبستگی دارد و تعداد غلاف‌های پر نیز با تعداد گل‌هایی که به غلاف تبدیل می‌شوند متناسب است. بنابراین عملکرد دانه وابسته به گل‌های بارور است و با ریزش گل یا غلاف رابطه عکس دارد (Yerzhebayeva et al., 2024). با توجه به حساسیت ارقام سویا به تنش خشکی، تعداد گل‌های ریزش یافته و غلاف‌های تولید شده نیز کاهش خواهد یافت که خود باعث کاهش عملکرد دانه خواهد شد.

نتایج نشان داد که روش AMMI، با توجه به این که با دو مؤلفه اصلی اول و دوم ۹۹ درصد از تغییرات اثر متقابل ژنوتیپ × محیط را توجیه می‌کند، روش مناسبی برای تجزیه پایداری ژنوتیپ‌ها بوده است. در مدل AMMI₁ و عملکرد دانه که ۹۳ درصد از تغییرات اثر متقابل را توجیه نمود ژنوتیپ‌های G2 و G3، G4، G8 و G16 دارای پایداری عمومی بیشتری در همه محیط‌ها دارند، ژنوتیپ‌های G6 و G7 دارای عملکرد دانه بیشتر و سازگاری خصوصی مطلوبی با شرایط آبیاری نرمال دارند. در مدل بای پلات AMMI₁₂ ژنوتیپ‌های G2، G3، G4 و G16 علاوه بر عملکرد بالا در مرکز بای پلات پراکنش داشتند و به عنوان پایدارترین ژنوتیپ‌ها برای هر دو شرایط تنش و بدون تنش معرفی شدند.

در آزمایشی با استفاده از ۲۰ رقم گندم نان در شش محیط با استفاده از روش AMMI بررسی شدند بهترین مدل پیش‌بینی، بای پلات AMMI₁₂ معرفی شد (Kaya et al., 2002).

در روش GGE-بای پلات با استفاده از نمایش نمودار چندضلعی، ژنوتیپ‌های G9، G11، G13 دارای پایداری اختصاصی به محیط تنش داشتند و ژنوتیپ‌های G2، G3 و G4 با محیط طبیعی سازگاری داشتند. همچنین جهت گزینش همزمان عملکرد سرشاخه و پایداری ژنوتیپ‌ها، از نمایش خط مختصات میانگین محیط (AEC) که از محور مختصات می‌گذرد استفاده شد و ژنوتیپ‌های G2، G3، G4 و G13 که نزدیک خط ATC قرار گرفتند که علاوه بر عملکرد بالا و دارای پایداری عملکرد در همه محیط‌ها نیز بودند.

دو شرایط بدون تنش و تنش شناخته شده‌اند که از بین آنها ژنوتیپ G13 در شرایط تنش خشکی و ژنوتیپ G7 با پایداری خصوصی در آبیاری نرمال برای اقلیم نیمه گرمسیری مانند خرم‌آباد قابل توصیه و می‌توان در برنامه‌های به‌نژادی آبی استفاده نمود.

سپاسگزاری

نویسنده از راهنمایی‌های ارزنده جناب آقایان پروفسور دکتر علی اشرف جعفری و دکتر علی الفتی که در انجام و راهنمایی این پژوهش تقبل زحمت نموده‌اند کمال تقدیر و قدردانی می‌گردد.

تعارض منافع

نویسندگان اظهار می‌نمایند که هیچ‌گونه تعارض منافی در رابطه با نشر این مقاله وجود ندارد.

طبق برخی مطالعات، تجزیه و تحلیل GGE-بای‌پلات برای تعیین مگا محیط‌ها (ادغام چندین محیط در یک محیط بزرگ نسبت به روش AMMI کارتر است (Yan et al., 2007; Shahriari et al., 2018; Hassani et al., 2018). در تحقیقی نتیجه گرفتند که وقتی هدف ارزیابی ژنوتیپ‌ها برای محیط‌های کمتری (محیط‌های مشابه) است، عملکرد روش GGE-بای‌پلات کمی برتر است، در حالی که در برنامه‌های انتخاب ژنوتیپ‌های برتر در مکان‌های متعدد کارایی روش AMMI بهتر است (Oliveira et al., 2010).

نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق کارایی هر دو روش AMMI و GGE-بای‌پلات را برای انتخاب ژنوتیپ‌های پایدار و پرمحصول سویا را نشان داد. به طور کلی، براساس هر دو روش ژنوتیپ‌های G2، G3 و G4 بعنوان ژنوتیپ‌های پرمحصول و پایدار در هر

References

- Abdi, N., Bordbar, M., Darvishzadeh, R., Rabiei, B., Alipour, H., Soufimaleky, S., Hatami Maleki, H. and Jabbari, M., 2025. A review of stability analysis methods in plant breeding with an emphasis on cereals, II: Multivariate approaches and future prospects. *Cereal Research*, 15(2), pp.199-232. <https://doi.org/10.22124/CR.2025.29969.1858>
- Demelash, H., 2024. Genotype by environment interaction, AMMI, GGE biplot, and mega environment analysis of elite *Sorghum bicolor* (L.) Moench genotypes in humid lowland areas of Ethiopia. *Heliyon*, 10(5), pp.e26528. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26528>
- Gauch, H.G., 1992. Statistical analysis of regional trials. AMMI analysis of factorial designs. Elsevier Pub. Amsterdam, Netherlands.
- Hassani, M., Heidari, B., Dadkhodaie, A. and Stevanato, P., 2018. Genotype by environment interaction components underlying variations in root, sugar and white sugar yield in sugar beet (*Beta vulgaris* L.). *Euphytica*, 214, 79. <https://doi.org/10.1007/s10681-018-2160-0>
- Kaya, Y., Palta, C. and Taner, S., 2002. Additive main effect and multiplicative interactions analysis of yield performances in bread wheat genotypes across environments. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 26, pp.275-279.
- Olanrewaju, O.S., Oyatomi, O., Babalola, O.O. and Abberton, M., 2021. GGE Biplot Analysis of Genotype × Environment Interaction and Yield Stability in Bambara Groundnut. *Agronomy*, 11(9), 1839. <https://doi.org/10.3390/agronomy11091839>

- Oliveira, R.L.D., Von Pinho, R.G., Balestre, M. and Ferreira, D.V., 2010. Evaluation of maize hybrids and environmental stratification by the methods AMMI and GGE biplot. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, 10(3), pp.247-253. <https://doi.org/10.1590/S1984-70332010000300010>
- Oyedele, O.F., 2020. Extension of biplot methodology to multivariate regression analysis. *Journal of Applied Statistics*, 48(10), pp.1816-1832. <https://doi.org/10.1080/02664763.2020.1779192>
- Poudel, S., Vennam, R.R., Shrestha, A., Reddy, K.R., Wijewardane, N.K., Reddy, K.N. and Bheemanahalli, R., 2023. Resilience of soybean cultivars to drought stress during flowering and early-seed setting stages. *Scientific Reports*, 13(1), pp.1277. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-28354-0>
- Pour-Aboughadareh, A., Ghazvini, H., Jasemi, S.S., Mohammadi, S., Razavi, S.A., Chaichi, M., Ghasemi Kalkhoran, M., Monirifar, H., Tajali, H., Fathihafshjani, A. and Bocianowski, J., 2023. Selection of High-Yielding and Stable Genotypes of Barley for the Cold Climate in Iran. *Plants*, 12(13), 2410. <https://doi.org/10.3390/plants12132410>
- Seleiman, M.F., Al-Suhaibani, N., Ali, N., Akmal, M., Alotaibi, M., Refay, Y., Dindaroglu, T., Abdul-Wajid, H.H. and Battaglia, M.L., 2021. Drought Stress Impacts on Plants and Different Approaches to Alleviate Its Adverse Effects. *Plants (Basel)*, 10(2), 259. <https://doi.org/10.3390/plants10020259>
- Shahriari, Z., Heidari, B. and Dadkhodaie, A., 2018. Dissection of genotype $\times$ environment interactions for mucilage and seed yield in Plantago species: Application of AMMI and GGE biplot analyses. *PLoS ONE* 13(5), e0196095. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0196095>
- Shojaei, S.H., Mostafavi, K., Bihamta, M.R., Omrani, A., Mousavi, S.M.N., Illés, Á., Bojtor, C. and Nagy, J., 2022. Stability on Maize Hybrids Based on GGE Biplot Graphical Technique. *Agronomy*, 12(2), 394. <https://doi.org/10.3390/agronomy12020394>
- Ungureanu, N., Vlăduț, V. and Voicu, G., 2020. Water Scarcity and Wastewater Reuse in Crop Irrigation. *Sustainability*, 12(21), 9055. <https://doi.org/10.3390/su12219055>
- Wang, C., Sun, A., Zhu, L.J., Liu, M., Zhang, Q., Wang, L. and Gao, X., 2025. Drought and rewatering effects on soybean photosynthesis, physiology and yield. *Peer J*, 3(13), e19658. <https://doi.org/10.7717/peerj.19658>
- Yan, C., Song, S., Wang, W., Wang, C., Li, H., Wang, F., Li, S. and Sun, X., 2020. Screening diverse soybean genotypes for drought tolerance by membership function value based on multiple traits and drought-tolerant coefficient of yield. *BMC Plant Biology*, 20(1), 321. <https://doi.org/10.1186/s12870-020-02519-9>
- Yan, W., 2001. GGE Bi plot-A Windows application for graphical analysis of multi-environment trial data and other types of two-way data. *Agronomy Journal*, 93, pp.1111-1118. <https://doi.org/10.2134/agronj2001.9351111x>
- Yan, W., Hunt, L.A., Sheng, Q. and Szlavnic, Z., 2000. Cultivation and mega-environment investigation based on GGE biplot. *Crop Science*, 40, pp.596-605. <https://doi.org/10.2135/cropsci2000.403597x>
- Yan, W., Kang, M.S., Ma, B., Wood, S. and Cornelius, P.L., 2007. GGE biplot vs. AMMI analysis of genotype-by-environment data. *Crop Science*, 47, pp.643-655. <https://doi.org/10.2135/cropsci2006.06.0374>

- Yerzhebayeva, R., Didorenko, S., Bastaubayeva, S., Amangeldiyeva, A., Maikotov, B., Kassenov, R., and Shavrukov, Y., 2024. Soybean Drought Tolerance and Escape: Field Trial Assessment of Yield, Maturity Groups and Smooth-Wrinkled Seed Coats in Kazakhstan. *Agriculture*, 14(11), 1884. <https://doi.org/10.3390/agriculture14111884>
- Zobel, R.W., Wright, M.J. and Gauch, H.G., 1988. Statistical analysis of a yield trial. *Agronomy Journal*, 80(3), pp.388–393. <https://doi:10.2134/agronj1988>