

Original article

Studying the genotype $\times$ environment interaction under different environmental stresses conditions using graphical GGE-biplot analysis in new sunflower hybrids

Amir Gholizadeh^{1*}, Mehdi Ghaffari², Hossein Ahmadi-Ochtapeh¹, Morad Cheshmehnoor³, Gholamhossein Shiresmaeili⁴, Farnaz Shariati⁵

1. 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
2. Associate Professor, Oil Crops Research Department, Seed and Plant Improvement Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran
3. Researcher, Crop and Horticultural Science Research Department, Lorestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Khoramabad, Iran
4. Assistant Professor, Crop and Horticultural Science Research Department, Isfahan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Isfahan, Iran
5. Assistant Professor, Oil Crops Research Department, Seed and Plant Improvement Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran

Received 21 May 2024; Revised 15 June 2024; Accepted 15 June 2024

Extended abstract

Introduction

The sunflower, with a global planting area of 29 million hectares and a yield of 1970 kg per hectare, is adapted to different regions of the world, including Iran. The sunflower is one of the most important oilseed plants in the world, whose seeds contain 26-50% oil and 20-27% protein. Sunflower oil is desirable for human consumption due to its favorable fatty acid composition. Sunflower oil quality is affected by the seed oil content and fatty acid composition of the oil and defines the oil's value for industry. The fatty acid composition of sunflower determines its uses and health advantages on for human beings, while oil content determines its economic value. For oil quality purposes, oleic and linoleic acids are the most important fatty acids because these contribute almost 90% to the total fatty acid content in sunflower oil. The amount of oleic acid determines the quality of sunflower oil more than other fatty acids because it is important for both edible purposes and biodiesel production. One of the most important factors inhibiting the growth and production of plants is abiotic stresses, especially drought and salinity stresses. Drought and salinity stresses are the most important factors limiting the growth and survival of plants in arid and semi-arid regions of the world. Water is a major component of the fresh produce and significantly effects on weight and quality of plants. Also, drought stress may cause significant changes in the yield and composition of fatty oils in oilseed plants. Iran, with an average annual rainfall of 240 mm, is included among arid and semi-arid regions of the world. Of the million hectares of cultivated region, only five million are under irrigation because of intense water limitations. The sunflowers have been cultivated for many years in different parts of Iran. Therefore, evaluating new sunflower hybrids under different environmental stress conditions is essential for identifying and selecting superior hybrids with high and stable yield potential.

* Corresponding author: Amir Gholizadeh; E-Mail: a.gholizadeh@areeo.ac.ir

Materials and methods

In this study, 18 new sunflower hybrids along with the Zarin cultivar, were evaluated under different environmental stresses (non-stress, drought stress, and salinity stress) in a randomized complete block design with three replications in four experimental field stations (Boroujerd, Gorgan, Gonbad and Isfahan) during the 2022-2023 cropping season. The GGE biplot statistical method (genotype effect + genotype $\times$ environment interaction) was used to study the stability of genotypes in the studied environments.

Results and discussion

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. The G, E, and G $\times$ E interaction effects accounted for 94.74%, 3.94%, and 1.32% of the total variation, respectively. The results of genotype $\times$ environment interaction analysis using the GGE-biplot method indicated that the first and second principal components of the GGE-biplot explained 83.2% of the total seed yield variation. Based on the polygon view of the biplot, the hybrid H2 in the Gorgan environment and the hybrids H1, H4, and H16 in Gonbad, Isfahan, and Boroujerd environments were identified as superior genotypes with high specific adaptation. Based on the hypothetical ideal genotype biplot, the hybrids H1, H4, and H16 performed better exhibited other hybrids in terms of seed yield and stability and had the high general adaptation to all environments. Therefore, these hybrids can be used for further testing, including adaptation tests. Furthermore, the results showed that the Gonbad environment was the closest to the ideal environment in terms of discriminating ability and representativeness. Therefore, the Gonbad environment can be considered a suitable test location for selecting superior sunflower hybrids.

Conclusion

In general, our results demonstrated the efficiency of the graphical method of the GGE-biplot in investigating the G $\times$ E interaction effect and providing valuable good information about the studied genotypes and environments.

Keywords: Ideal genotype, Seed yield, Stability, Sunflower

بررسی اثر متقابل ژنوتیپ × محیط در شرایط تنش‌های محیطی مختلف با استفاده از تجزیه گرافیکی GGE-biplot در هیبریدهای جدید آفتابگردان

امیر قلی‌زاده^{۱*}، مهدی غفاری^۲، حسین احمدی اوج‌تپه^۱، مراد چشمه‌نور^۳، غلامحسین شیراسماعیلی^۴، فرناز شریعتی^۵

۱. استادیار بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان گلستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، گرگان

۲. دانشیار بخش تحقیقات دانه‌های روغنی، مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج

۳. محقق، بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان لرستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، خرم‌آباد

۴. استادیار بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اصفهان

۵. استادیار بخش تحقیقات دانه‌های روغنی، مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج

موضوعات مقاله	چکیده
واژه‌های کلیدی: آفتابگردان پایداری ژنوتیپ ایده‌آل عملکرد دانه	ارزیابی هیبریدهای جدید آفتابگردان در شرایط تنش‌های محیطی مختلف، در شناسایی و انتخاب هیبریدهای برتر با پتانسیل عملکرد بالا و پایدار ضروری است. در این راستا تعداد ۱۸ هیبرید جدید آفتابگردان به همراه رقم زرین تحت شرایط تنش‌های محیطی مختلف (بدون تنش، تنش خشکی و تنش شوری) در چهار ایستگاه تحقیقاتی (بروجرد، گرگان، گنبد و اصفهان) در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در سال زراعی ۱۴۰۲-۱۴۰۱ مورد ارزیابی قرار گرفتند. برای ارزیابی پایداری و سازگاری ژنوتیپ‌ها در محیط‌های موردبررسی از روش آماری GGE با پلات با مدل اثر ژنوتیپ + برهمکنش ژنوتیپ × محیط استفاده شد. نتایج تجزیه مرکب عملکرد دانه نشان داد که اثر محیط، اثر ژنوتیپ و اثر متقابل ژنوتیپ × محیط معنی‌دار بود. اثر محیط، اثر ژنوتیپ و اثر متقابل ژنوتیپ × محیط به ترتیب ۹۴/۷۴، ۳/۹۴ و ۱/۳۲ درصد تغییرات داده‌ها را توجیه کردند. نتایج تجزیه اثر متقابل ژنوتیپ × محیط با روش GGE-biplot نشان داد که دو مؤلفه اول و دوم GGE-biplot، ۸۳/۲ درصد از تغییرات کل عملکرد دانه را توجیه کردند. بر اساس نمایش چندضلعی بای‌پلات، هیبرید H2 در محیط گرگان و هیبریدهای H1، H4 و H16 در محیط‌های گنبد، اصفهان و بروجرد، هیبریدهای برتر و با سازگاری خصوصی بالا بودند. بر اساس بای‌پلات ژنوتیپ فرضی ایده‌آل، هیبریدهای H1، H4 و H16 از نظر هر دو عامل پایداری و میانگین عملکرد دانه، بهتر از سایر هیبریدها بودند و سازگاری عمومی بالایی در همه محیط‌های موردبررسی داشتند و می‌توان از آن‌ها برای انجام آزمایش‌های بیشتر از جمله آزمایش‌های سازگاری استفاده نمود. همچنین نتایج نشان داد که محیط گنبد نزدیک‌ترین محیط به محیط ایده‌آل بود و بیشترین تمایز را نشان داد؛ بنابراین می‌توان از محیط گنبد به عنوان محل ارزیابی مناسب برای انتخاب هیبریدهای برتر آفتابگردان استفاده کرد.

مقدمه

اهمیت فراوانی در جیره غذایی و سلامت انسان‌ها برخوردار است (Ansarifard et al., 2020). آفتابگردان یکی از سازگارترین گیاهان به شرایط متنوع جغرافیایی ایران است و کشت آن در چهارفصل سال در مناطق مختلف صورت گرفته

دانه‌های روغنی پس از غلات دومین منبع تأمین انرژی در جهان محسوب می‌شوند. آفتابگردان یکی از مهم‌ترین دانه‌های روغنی در جهان محسوب می‌شود که روغن آن به دلیل داشتن اسیدهای چرب غیراشباع بالا و نداشتن کلسترول از

در کلزای بهاره از روش GGE-biplot استفاده کرده و گزارش کردند که روش مذکور با رسم نمودارهای دوبعدی (تصاویر گرافیکی) ابزاری مناسب برای تجزیه و تحلیل اثر متقابل ژنوتیپ $\times$ محیط بوده و تفسیر نتایج را راحت‌تر می‌کند و با استفاده از 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 آزمایش‌های ارزیابی عملکرد است و همچنین با استفاده از این روش می‌توان محیط‌های ایده‌آل و محیط‌های کلان را در آزمایش‌های آفتابگردان معرفی نمود.

از روش گرافیکی GGE-biplot برای ارزیابی ژنوتیپ‌ها و محیط در آزمایش‌های چندمحیطی در گیاهان دیگر از قبیل ذرت (Shiri and Bahrampour, 2015)، گندم دوروم (Badri et al., 2018)، سورگوم (Hamidou et al., 2019)، برنج (Jia et al., 2020)، لوبیا (Da Cruz et al., 2020)، جو (Ghazvini et al., 2022)، گشنیز (Gholizadeh and Khodadadi, 2023) و چغندر قند (Taleghani and Saremirad, 2022) استفاده شده است. هدف از اجرای این مطالعه، بررسی اثر متقابل ژنوتیپ $\times$ 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 تنش‌های محیطی مختلف شرایط در آفتابگردان بود.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش ۱۸ هیبرید جدید آفتابگردان به همراه رقم شاهد زرین ایستگاه‌های تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی بروجرد، گرگان، گنبد و اصفهان در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۰ 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. جهت آماده‌سازی زمین از گاوآهن برگردان‌دار به همراه عملیات دیسک‌زنی (دو بار) برای از بین بردن کلوخه‌ها استفاده گردید. کودهای مورد نیاز خاک، شامل ۲۰۰ کیلوگرم فسفر خالص در هکتار از منبع فسفات آمونیوم و ۱۰۰ کیلوگرم پتاس خالص در هکتار از منبع سولفات پتاسیم

و پتانسیل افزایش سطح کاشت را در مناطق سرد، معتدل، مرطوب شمال و نواحی گرمسیر جنوب دارد. با توجه به محدودیت تنوع زراعت‌های بهاره و با توجه به تحمل نسبی آفتابگردان در برابر تنش‌های محیطی توسعه کشت آفتابگردان می‌تواند بخشی از نیاز روغن خوراکی ایران را تأمین نماید (Ghaffari et al., 2023). به دلیل عدم حساسیت به تاریخ کاشت و به پشتوانه نیم‌قرن فعالیت تحقیقاتی در زمینه بهنژادی آفتابگردان مواد ژنتیکی و تکنولوژی لازم برای تهیه ارقام هیبرید آفتابگردان در ایران وجود دارد و هیبریدهای پرمحصول و سازگار در طی سالیان اخیر معرفی شده است.

قسمت عمده کشور ایران با تنش‌های محیطی گوناگون مواجه است که این تنش‌ها باعث بروز دامنه وسیعی از تغییرات در عملکرد کمی و کیفی محصولات می‌شوند (Reddy, 2004). تولید و دستیابی به هیبریدهای متحمل به تنش، یکی از راه‌های مقابله با تنش‌های محیطی است. هیبریدهایی به‌عنوان متحمل به تنش شناخته می‌شوند که از عملکرد و پایداری مطلوبی در هر دو شرایط بدون تنش و تنش برخوردار باشند و کمترین اثر متقابل را با محیط داشته باشند. اثر متقابل ژنوتیپ در محیط باعث می‌شود که شناسایی و انتخاب هیبریدهای با عملکرد و پایداری بالا با مشکل مواجه شود (Yau et al., 1991).

روش‌های گوناگونی برای بررسی اثر متقابل ژنوتیپ $\times$ محیط توسط پژوهشگران در گیاهان مختلف بکار برده شده است. روش‌های بررسی اثر متقابل ژنوتیپ $\times$ محیط شامل روش‌های عددی و گرافیکی هستند که در این میان روش گرافیکی GGE-biplot روشی با کارایی مناسب برای بررسی اثر متقابل ژنوتیپ $\times$ محیط بوده و اطلاعات خوبی در مورد ژنوتیپ‌ها و محیط‌های مورد مطالعه به‌صورت گرافیکی در اختیار قرار می‌دهد (Yan and Kang, 2003). از روش گرافیکی GGE-biplot در مطالعات مختلف بر روی گیاهان زراعی استفاده شده است. دادرس و همکاران (Dadras et al., 2017) و مس‌شناس و همکاران (Messhenas et al., 2023) به‌منظور شناسایی ارقام پایدار و متحمل به تنش خشکی سویا از روش GGE-biplot استفاده و گزارش کردند که روش گرافیکی GGE-biplot، روشی فوق‌العاده مناسب جهت ارزیابی و شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل به تنش خشکی سویا بود. در پژوهش دیگری امیری اوغان و همکاران (Amiri Oghan et al., 2020) در بررسی اثر متقابل ژنوتیپ $\times$ محیط

دانه‌های به‌دست‌آمده با ترازوی دقیق توزین گردید و پس از تبدیل، به‌عنوان عملکرد دانه در واحد سطح (کیلوگرم در هکتار) محاسبه شد.

جدول ۱. شماره، کد و شجره هیبریدهای آفتابگردان موردبررسی
Table 1. Code, name and pedigree of the tested sunflower hybrids

شماره No.	کد Code	نام/شجره Name/Pedigree
1	H1	R3×A1221
2	H2	R3×A330
3	H3	R3×A370
4	H4	R111×A1221
5	H5	R111×A370
6	H6	R15×A196
7	H7	R15×A110
8	H8	R131×A32
9	H9	R131×A370
10	H10	R131×A330
11	H11	RN75×A196
12	H12	RN75×AF81-112
13	H13	RF81-82×A370
14	H14	RO28×AO42
15	H15	R33×A370
16	H16	R33×AF81-112
17	H17	RF81-65×A32
18	H18	R60×AO70
19	H19	ZARIN

موقع تهیه زمین به خاک مزرعه اضافه گردید. همچنین مقدار ۱۵۰ کیلوگرم نیتروژن خالص در هکتار از منبع اوره که یک‌سوم آن موقع تهیه زمین و بقیه کود اوره طی دو نوبت یکی بعد از سبز شدن و دیگری در مرحله قبل از غنچه‌دهی به خاک مزرعه اضافه گردید. هر کرت آزمایشی شامل ۳ خط کشت به طول ۳ متر و کشت به‌صورت دستی و با قرار دادن ۳ عدد بذر در هر کپه و به فواصل ۲۵ سانتیمتر از هم انجام گردید. بعد از مرحله ۴ برگ، عملیات تنک انجام گردید و مبارزه با علف‌های هرز به‌صورت دستی در دو مرحله انجام گرفت. آبیاری در شرایط بدون تنش در ایستگاه‌های تحقیقات کشاورزی بروجرد و گرگان به نحوی بود که یک روز بعد از کشت آبیاری انجام و آبیاری‌های بعدی با توجه به نیاز گیاه به‌صورت نشتی صورت گرفت. در شرایط تنش خشکی در ایستگاه تحقیقات کشاورزی گنبد، آزمایش تنها با استفاده از نزولات جوی اجرا گردید. در شرایط تنش شوری در ایستگاه اصفهان نیز اولین آبیاری جهت سبز یکنواخت و استقرار گیاه با آب معمولی آبیاری گردید و در ادامه آبیاری‌های بعدی با آب شور با هدایت الکتریکی ۸/۳ دسی‌زیمنس بر متر به‌صورت نشتی انجام گردید.

پس از رسیدگی محصول، جهت اندازه‌گیری عملکرد دانه، ابتدا ۰/۵ متر از ابتدا و انتهای هر خط جهت از بین بردن اثر حاشیه حذف گردید. در ادامه تمام بوته‌های کرت برداشت شد و پس از خشک شدن کامل، بوته‌ها خرمن‌کوبی شدند و

جدول ۲. خصوصیات اقلیمی محیط‌های مورد مطالعه در این تحقیق

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

مکان Location	طول جغرافیایی Longitude (E)	عرض جغرافیایی Latitude (N)	ارتفاع از سطح دریا Altitude (m)	متوسط بارندگی سالانه Average annual rainfall (mm)
Borujerd بروجرد	48° 76'	33° 89'	1520	415
Gorgan گرگان	54° 25'	36° 54'	5	400
Gonbad گنبد	55° 12'	37° 16'	45	550
Isfahan اصفهان	51° 51'	32° 31'	1545	122

(Inc, 2011) استفاده شد. با توجه به معنی‌دار شدن اثر متقابل ژنوتیپ × محیط، تجزیه گرافیکی با استفاده از روش GGE بای‌پلات (Yan and Kang, 2003) انجام گردید. به‌منظور رسم نمودارهای بای‌پلات، میانگین عملکرد دانه ژنوتیپ‌ها در چهار محیط مختلف به‌صورت یک ماتریس دوطرفه تنظیم و به نرم‌افزار GGE بای‌پلات معرفی گردید. رسم نمودارهای

تجزیه و تحلیل آماری

ابتدا آزمون نرمال بودن باقی‌مانده داده‌ها از طریق آزمون کولموگوروف-اسیمروف (Kolmogorov-Smirnov) با استفاده از نرم‌افزار SPSS ver 20 (2010) موردبررسی قرار گرفتند. 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)

طریق رسم g_{i1} در مقابل g_{i2} و e_{1j} در مقابل e_{2j} یک نمودار پراکنش ایجاد می‌کند.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس مرکب صفت عملکرد دانه نشان داد که اثر محیط در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). محاسبه درصد مجموع مربعات سه منبع محیط، ژنوتیپ و اثر متقابل ژنوتیپ $\times$ محیط به مجموع آن‌ها نشان داد که عمده تغییرات موجود در داده‌ها به وسیله واریانس محیط‌ها توجیه شده است (جدول ۳).

بای‌پلات بر اساس دو مؤلفه اصلی اول و دوم صورت گرفت. مدل آماری این روش بر اساس رابطه زیر است.

$$y_{ij} - \mu - \beta_j = g_{i1}e_{1j} + g_{i2}e_{2j} + e_{ij} \quad [1]$$

در رابطه فوق y_{ij} ، ارزش میانگین ژنوتیپ i ام 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 i ام و محیط j ام، g_{i2} و e_{2j} به ترتیب مقادیر ثانویه برای ژنوتیپ i ام و محیط j ام و e_{ij} ، باقی‌مانده‌ای است که به وسیله آثار اولیه و ثانویه توضیح داده نمی‌شود. درواقع یک بای‌پلات GGE از

جدول ۳. تجزیه واریانس مرکب عملکرد دانه و عملکرد روغن ژنوتیپ‌های آفتابگردان در محیط‌های مختلف

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

Source of variations	منابع تغییرات	درجه آزادی df	عملکرد دانه Seed yield		
			مجموع مربعات Sum of squares	میانگین مربعات Mean square	مجموع مربعات توجیه شده % %TSS ^a
Environment (E)	محیط	3	95763176	31921059**	94.74
Replication/E	تکرار درون محیط	8	715516	89439	
Genotype (G)	ژنوتیپ	18	23912517	1328473**	3.94
G $\times$ E	ژنوتیپ $\times$ محیط	54	23902851	442645**	1.31
Error	خطا	144	18784662	130449	

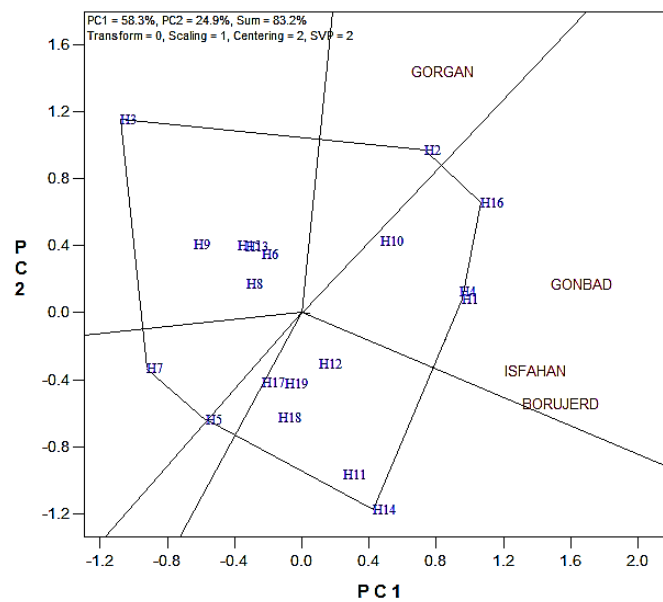
** معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۱. مجموع مربعات توجیه‌شده (درصد).

** Significant at the 0.01 probability level. ^aTotal sum of squares.

واریانس مرکب نشان داد که اثر متقابل ژنوتیپ $\times$ محیط برای دو صفت عملکرد دانه و عملکرد روغن در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). معنی‌دار شدن اثر متقابل ژنوتیپ $\times$ محیط در این مطالعه نیز بیانگر این مطلب است که ژنوتیپ‌ها در محیط‌های مختلف پاسخ متفاوتی نشان داده‌اند و اختلاف بین ژنوتیپ‌ها از محیطی به محیط دیگر متفاوت است؛ بنابراین باید ژنوتیپ‌هایی انتخاب شوند که پایداری عملکرد مطلوب‌تری در محیط‌های موردبررسی داشته باشند؛ بنابراین پایداری عملکرد دانه و تجزیه برهمکنش ژنوتیپ $\times$ محیط باید موردبررسی قرار گیرد.

نتایج حاصل از روش گرافیکی GGE-biplot نشان داد که دو مؤلفه اصلی اول و دوم در مجموع ۸۳/۲ درصد از تغییرات داده‌ها را توجیه کردند که بیانگر اعتبار بالای بای‌پلات به دست‌آمده در توجیه تغییرات مربوط به ژنوتیپ و اثر متقابل ژنوتیپ $\times$ محیط بود (شکل ۱).

با توجه به این که محیط‌های آزمایش طیف وسیعی از فاکتورهای محیطی (ارتفاع از سطح دریا، درجه حرارت، نوع خاک و تنش‌های محیطی) را دارا بوده، بنابراین اختصاص عمده تغییرات به واریانس محیط‌ها توجیه‌پذیر است. غفاری و همکاران (Ghaffari et al., 2021) نیز در پژوهش خود گزارش کردند که در آفتابگردان اثر محیط عمده تغییرات موجود در داده‌ها را به خود اختصاص داده است. همچنین بسیاری از پژوهشگران در محصولاتی از قبیل ذرت (Shiri and Bahrampour, 2015)، گلرنگ (Jamshidmoghaddam and Pourdad, 2013)، سویا (Babaei et al., 2019) و کلزا (Alizadeh et al., 2021) گزارش کردند که محیط بخش اعظم تغییرات موجود در داده‌ها را به خود اختصاص می‌دهد. معنی‌دار بودن اثر ژنوتیپ نیز نشان‌دهنده تنوع ژنتیکی کافی بین مواد آزمایشی مورد استفاده در این آزمایش است. همچنین نتایج تجزیه



شکل ۱. نمایش چندضلعی بای‌پلات برای گروه‌بندی ژنوتیپ‌ها و محیط‌ها در آفتابگردان؛ PC1: مؤلفه اصلی اول، PC2: مؤلفه اصلی دوم

Fig. 1. Biplot polygon view for grouping the genotypes and environments in sunflower; PC1: the first principal component, PC2: the second principal component

برتر این محیط‌ها بودند. در محیط کلان دوم نیز محیط گرگان قرار گرفت که هیبرید H2 هیبرید برتر این محیط کلان بود. هیبریدهای H3، H7، H5 و H14 نیز که در رأس نمودار چندضلعی قرار گرفته بودند، در هیچ کدام از محیط‌های کلان قرار نگرفتند که بیانگر عدم تولید عملکرد دانه بالای این هیبریدها در کلیه محیط‌ها بود (شکل ۱). در محیط کلان اول هیبرید H10 علاوه بر هیبریدهای قرار گرفته در رأس چندضلعی (هیبریدهای H4، H1 و H16) وجود داشت. این هیبرید نیز شباهت بالایی با هیبریدهای قرار گرفته در رأس چندضلعی و سازگاری خصوصی بالایی با محیط‌های قرار گرفته در آن قسمت داشت. 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).

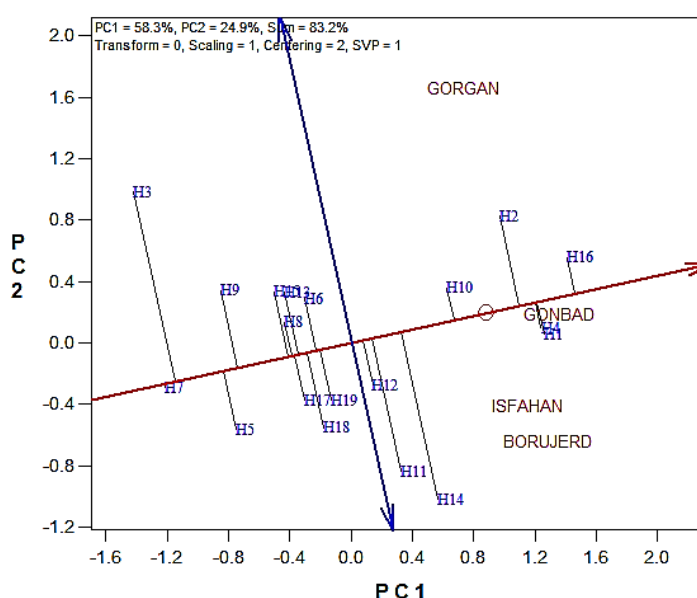
محیط‌هایی که در یک محیط کلان قرار می‌گیرند، دارای حداقل اثر متقابل ژنوتیپ × محیط نسبت به هم بوده و به عبارت دیگر دارای اثر متقابل از نوع غیرمقاطع (Non-Crossover) نسبت به هم هستند. در مقابل محیط‌هایی که در محیط‌های کلان متفاوت قرار می‌گیرند دارای برهمکنش مقاطع یا کراس‌آوری نسبت به هم هستند (Yan and Kang, 2003). با توجه به نتایج گروه‌بندی محیط‌ها، می‌توان

یکی از پرکاربردترین و مهم‌ترین کاربردهای روش گرافیکی GGE-biplot، رسم نمودارهای چندضلعی (Polygon) است. این نمودار متشکل از یک چندضلعی است. 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 است. 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) است. در این مطالعه نتایج نمودار چندضلعی بای‌پلات نشان داد که هشت هیبرید H5، H7، H3، H2، H16، H4، H1 و H14 که در رأس‌های چندضلعی قرار گرفته و که بیشترین فاصله را از مبدأ بای‌پلات داشته‌اند، به عنوان ژنوتیپ‌های برتر شناسایی شدند (شکل ۱). همچنین در این مطالعه دو محیط کلان مشخص گردید که محیط کلان اول شامل محیط‌های گنبد، اصفهان و بروجرد بود که هیبریدهای H1، H4 و H16 هیبریدهای

هیبریدهایی که در سمت راست محور عمودی AEC قرار گرفته‌اند، دارای عملکرد بالاتر از میانگین عملکرد کل و هیبریدهایی که در سمت چپ این محور قرار گرفته‌اند، عملکردی کمتر از میانگین عملکرد کل را دارا می‌باشند. نتایج بای‌پلات مختصات محیط نشان داد که هیبریدهای H16، H1، H4، H2، H10، H14، H11 و H12 به ترتیب بیشترین عملکرد دانه را دارا بودند و ژنوتیپ‌های H7، H3، H5، H9، H15، H13، H17، H8، H18، H6 و H19 به ترتیب با قرار گرفتن در انتهای محور افقی AEC کمترین مقدار عملکرد دانه را دارا بودند (شکل ۲). هیبریدهای H16، H1، H4 و H10 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. هیبریدهای H2، H14 و H11 با وجود اینکه دارای عملکرد دانه بالایی بودند ولی 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 پرمحصول در آفتابگردان (Hemmati et al., 2018)، گندم نان (Jafari and Farshadfar, 2018)، کلزا (Roodi et al., 2022) نیز استفاده شده است.

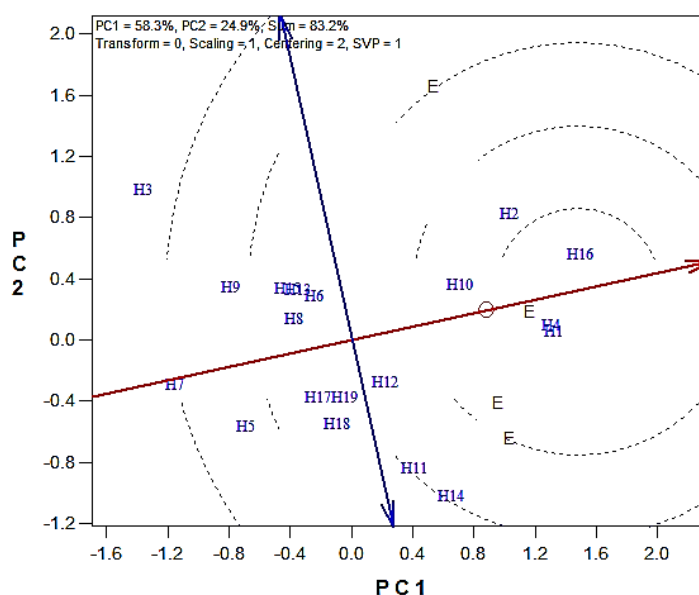
کاربرد دیگر روش گرافیکی GGE-biplot، مقایسه هیبریدهای مورد مطالعه با ژنوتیپ ایده‌آل است (شکل ۳).

نتیجه گرفت که هردو نوع اثر متقابل (مقاطع و غیرمقاطع) در آزمایش‌های چندمحیطی آفتابگردان وجود دارد. در یک برنامه اصلاحی هنگامی که اثر متقابل ژنوتیپ $\times$ محیط از نوع غیرمقاطع (Non-crossover) باشد، می‌توان از آن چشم‌پوشی کرد و تنها بر پایه عملکرد تصمیم گرفت؛ اما اگر اثر متقابل از نوع مقاطع (Crossover interaction) باشد، باید اثر ژنوتیپ و اثر متقابل ژنوتیپ $\times$ محیط را به‌طور هم‌زمان در نظر گرفت و نباید فقط اثر ژنوتیپ را در نظر گرفت. در پژوهش صارمی‌راد و همکاران (Saremi-Rad et al., 2020) نیز هر دو نوع اثر متقابل در آفتابگردان گزارش گردیده است. در این پژوهش به‌منظور بررسی هم‌زمان عملکرد و پایداری هیبریدها از نمودار مختصات محیط متوسط (Average Environment Coordinate; AEC) استفاده گردید (شکل ۲). این نمودار دارای دو محور افقی و عمودی است. هیبریدها در طول محور افقی AEC (محوری که با دایره و فلش مشخص شده است) بر اساس عملکرد رتبه‌بندی می‌شوند و جهت پیکان نشان‌دهنده میانگین عملکرد بالاتر است. همچنین محور افقی AEC بیانگر پایداری است و هر هیبریدی 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 هیبریدها است. به‌طوری‌که



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

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



شکل ۳. نمایش بای‌پلات برای مقایسه ژنوتیپ‌های مورد مطالعه با ژنوتیپ ایده‌آل در آفتابگردان؛ PC1: مؤلفه اصلی اول، PC2: مؤلفه اصلی دوم

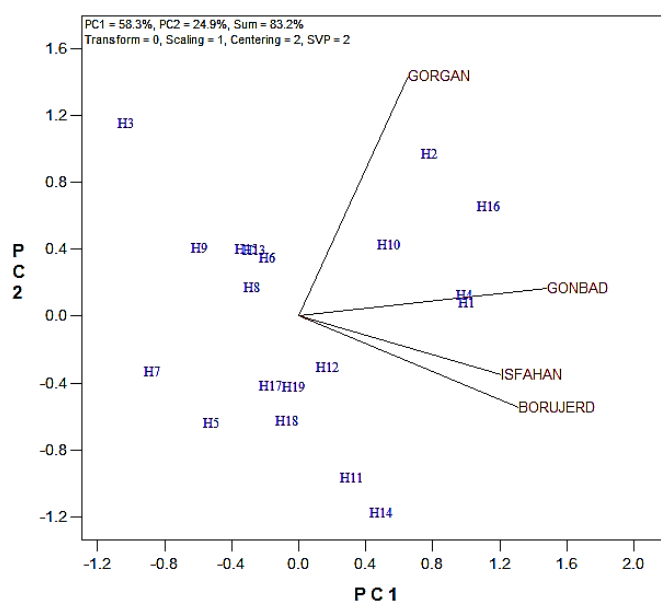
Fig 3. Biplot view to compare the studied genotypes with the ideal genotype in sunflower; PC1: the first principal component, PC2: the second principal component

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، همبستگی منفی و اگر زاویه بین دو بردار محیط ۹۰ درجه باشد، همبستگی وجود ندارد. بررسی همبستگی بین محیط‌ها نشان داد (شکل ۴) زاویه بین بردارهای محیطی گنبد، اصفهان و بروجرد کوچک بود. بیشترین همبستگی مثبت بین بردارهای دو محیط بروجرد و اصفهان بود. زاویه بین بردارهای محیط‌های شاهرود و گرگان نیز بالاتر از ۹۰ درجه بود که بیانگر همبستگی منفی بین این دو محیط بود.

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 هم‌مرکز 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

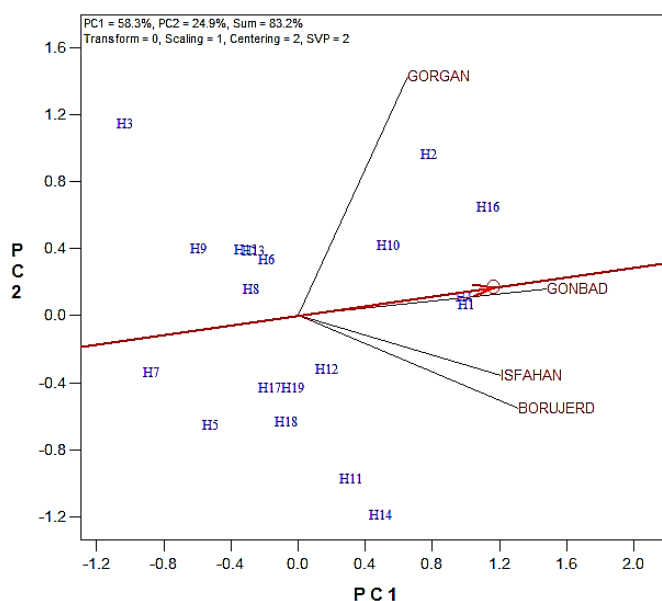
ژنوتیپ ایده‌آل فرضی ژنوتیپی است که از نظر مکانی به صورت یک دایره کوچک روی محور میانگین عملکرد ژنوتیپ‌ها قرار می‌گیرد و دارای بیشترین عملکرد و پایداری است (Yan and Kang, 2003). چنین ژنوتیپی دارای بیشترین طول روی بردار میانگین ژنوتیپ‌ها با عملکرد بالا بوده و حداقل نقش را در اثر متقابل ژنوتیپ × محیط دارا است. بنابراین، مبنای رتبه‌بندی بر مبنای میانگین عملکرد و پایداری است. بر اساس این نمودار هیبریدی با عملکرد بالا و پایدار شناخته می‌شود که فاصله کمتری را با ژنوتیپ ایده‌آل فرضی دارد. در شکل ۳، هیبریدهای H1، H4 و H16 کمترین فاصله را از ژنوتیپ ایده‌آل فرضی دارند و بنابراین به عنوان مناسب‌ترین هیبریدها در این پژوهش شناخته شدند. همتی و همکاران (Hemmati et al., 2018) و غفاری و همکاران (Ghaffari et al., 2021) از نمودار ژنوتیپ ایده‌آل فرضی برای مقایسه ژنوتیپ‌های آفتابگردان 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.

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



شکل ۴. نمایش بای پلات برای بررسی روابط بین محیط‌های مورد مطالعه در آفتابگردان؛ PC1: مؤلفه اصلی اول، PC2: مؤلفه اصلی دوم

Fig. 4. Biplot view for displaying the relationships among the studied environments in sunflower; PC1: the first principal component, PC2: the second principal component



شکل ۵. نمایش بای پلات برای مقایسه محیط‌های مورد مطالعه با محیط ایده‌آل در آفتابگردان؛ PC1: مؤلفه اصلی اول، PC2: مؤلفه اصلی دوم

Fig. 5. Biplot view to compare the studied environments with the ideal environment in sunflower; PC1: the first principal component, PC2: the second principal component

ایده‌آل محیطی است که می‌تواند به‌عنوان نماینده بقیه محیط‌های آزمایش باشد و نیز دارای بیشترین توانایی تمایز ژنوتیپ‌ها است (Jafari and Farshadfar, 2018). در این

کلان هدف خواهد بود. اگر محیط‌های آزمایش نماینده محیط کلان نباشند، ممکن است اطلاعات گمراه‌کننده‌ای درباره ژنوتیپ‌های مورد آزمایش ارائه دهند. بنابراین، یک محیط

مورد مطالعه به صورت گرافیکی در اختیار قرار می‌دهد. بر اساس نمایش چندضلعی بای‌پلات، هیبرید H2 در محیط گرگان و هیبریدهای H1، H4 و H16 در محیط‌های گنبد، اصفهان و بروجرد، هیبریدهای برتر و با سازگاری خصوصی بالا بودند. بر اساس بای‌پلات ژنوتیپ فرضی ایده‌آل، هیبریدهای H1، H4 و H16 از نظر هر دو عامل پایداری و میانگین عملکرد دانه، بهتر از سایر هیبریدها بودند و سازگاری عمومی بالایی در همه محیط‌های مورد بررسی داشتند و می‌توان از آن‌ها برای انجام آزمایش‌های بیشتر از جمله آزمایش‌های سازگاری استفاده نمود. همچنین نتایج نشان داد که محیط گنبد نزدیک‌ترین محیط به محیط ایده‌آل بود و بیشترین تمایز و بیانگری را نشان داد؛ بنابراین می‌توان از محیط گنبد به عنوان محل ارزیابی مناسب برای انتخاب هیبریدهای برتر آفتابگردان استفاده کرد.

پژوهش محیط گنبد نزدیک‌ترین محیط‌ها به محیط ایده‌آل فرضی بود (شکل ۵) و به عنوان محیط مطلوب جهت گزینش هیبریدهای برتر آفتابگردان معرفی می‌شود. از نمودار بای‌پلات محیط‌ها به منظور ارزیابی قدرت تمایز و بیانگری محیط‌ها در کلزا (Pourdad and Jamshidi Moghadam, 2013)، جو (Ghazvini et al., 2022) و چغندر قند (Taleghani and Saremirad, 2022) نیز استفاده شده است.

نتیجه‌گیری نهایی

به طور 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

منابع

- Alizadeh, B., Rezaizad, A., Yazdandoost Hamedani, M., Shiresmaeili, G., Nasserghadimi, F., Khademhamzeh, H.R., Gholizadeh, A., 2021. Analysis of genotype × 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, 95-108. [In Persian with English Summary]. <https://doi.org/10.47176/jcpp.11.1.36131>
- 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 with English Summary]. <https://doi.org/10.22092/spji.2020.123205>
- Ansarifard, I., Mostafavi, K., Khosroshahli, M., Bihamta, M.R., Ramshini, H., 2020. A study on genotype–environment interaction based on GGE biplot graphical method in sunflower genotypes (*Helianthus annuus* L.). *Food Science & Nutrition*. 8, 3327-3334. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1610>
- Babaei, H.R., Sabzi, H., Razmi, N., 2019. Application of AMMI approach in “Genotype x Environment” interaction analysis and determining yield stability of soybean pure lines (*Glycine max* L. Merrill). *Iranian Journal of Field Crop Science*. 50, 129-137. [In Persian with English Summary]. <https://doi.org/10.22059/ijfcs.2018.240594.654374>
- Badri, H., Mohammadi, R., Etminan, A., 2018. Study of genotype × environment interaction for grain yield of durum wheat genotypes under rainfed and supplemental irrigation conditions by GGE biplot. *Cereal Research*. 8, 73-83. [In Persian with English Summary]. <https://doi.org/10.22124/c.2018.9127.1365>
- 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. <https://doi.org/10.1007/s10681-020-02693-9>
- 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, 18-26. [In Persian with English Summary]. <https://doi.org/10.29252/jcb.9.23.18>
- Ghaffari, M., Gholizadeh, A., Andarkhor, S.A., Zareei Siahbidi, A., Kalantar Ahmadi, S.A., Shariati, F., Rezaeizad, A., 2021. Stability and genotype × environment analysis of oil yield of

- sunflower single cross hybrids in diverse environments of Iran. *Euphytica*. 217(10),187. <https://doi.org/10.1007/s10681-021-02921-w>
- Ghaffari, M., Gholizadeh, A., Rauf, S., 2023. Dissection of genotype-by-environment interaction and stability analysis of major fatty acids in sunflower. *Archives of Agronomy and Soil Science*. 69, 3184-3200. <https://doi.org/10.1080/03650340.2023.2210503>
- 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, 461-472. [In Persian with English Summary]. <https://doi.org/10.1080/15427528.2021.1977448>
- 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, 277-289. [In Persian with English Summary]. <https://doi.org/10.22077/escs.2022.4491.2029>
- 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, 43-52. [In Persian with English Summary]. <https://doi.org/10.22077/escs.2020.3574.1878>
- 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. <https://doi.org/10.1017/S1479262118000382>
- Hemmati, I., Pourdad, 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 with English Summary]. <https://doi.org/10.22077/escs.2017.633.1124>
- Jafari, T., Farshadfar, E., 2018. Stability analysis of bread wheat genotypes (*Triticum aestivum* L.) by GGE biplot. *Cereal Research*. 8, 199-208. [In Persian with English Summary]. <https://doi.org/10.22124/c.2018.6232.1243>
- Jamshidmoghaddam, M., Pourdad, S.S., 2013. Genotype $\times$ environment interactions for seed yield in rainfed winter safflower (*Carthamus tinctorius* L.) multi-environment trials in Iran. *Euphytica*. 190, 357-369. <https://doi.org/10.1007/s10681-012-0776-z>
- 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. <https://doi.org/10.1017/S1479262120000118>
- 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, 287-298. [In Persian with English Summary]. <https://doi.org/10.22077/escs.2020.3527.1871>
- Messhenas, M., Najafi Zarini, H., Rameei, V., Ranjbar, G., 2023. Identification of stable and drought-tolerant soybean cultivars using AMMI and GGE biplot analysis. *Journal of Crop Breeding*. 15, 195-205. [In Persian with English Summary]. <https://doi.org/10.61186/jcb.15.47.195>
- Pourdad, S.S., Jamshidi Mohjadam, M., 2013. Study on genotype $\times$ 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 with English Summary]. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.22286128.1392.5.12.1.1>
- Reddy, A.R., Chaitanya, K.V., Vivekanadan, M.V., 2004. Drought-induced responses of photosynthesis and Antioxidant metabolism in higher plants. *Journal of Plant Physiology*. 161, 1189-1202. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2004.01.013>
- Roodi, D., Ghodrati, G., Kazerani, N., Masoudi, B., 2022. Investigation the yield stability of brassica genotypes (*Brassica* spp.) under drought stress by using statistical parameters and GGE biplot graphical methods. *Journal of Crop Breeding*. 14, 138-147. [In Persian with English Summary]. <https://doi.org/10.52547/jcb.14.42.138>

- Saremi-Rad, A., Mostafavi, K., Mohammadi, A., 2020. Genotype-environment interaction study base GGE biplot method for kernel yield in sunflower (*Helianthus annuus* L.) cultivars. Journal of Crop Breeding. 12, 43-53. [In Persian with English Summary]. <https://doi.org/10.29252/jcb.12.34.43>
- SAS Institute Inc., 2011. SAS/STAT user's guide, second edition. SAS institute Inc., Cary, Nc. <https://www.scrip.org/reference/referencespapers?referenceid=1937032>
- Shiri, M.R., Bahrampour, T., 2015. Genotype × environment interaction analysis using GGE biplot in grain maize (*Zea mays* L.) hybrids under different irrigation conditions. Cereal Research. 5, 83-94. [In Persian with English Summary]. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.22520163.1394.5.1.6.7>
- SPSS Inc., 2010. SPSS 20. Users Guided. Chicago, USA. https://eio.upc.edu/ca/qui-som/laboratori-de-calcul/manuals-del-sistema/IBM_SPSS_Statistics_Core_System_Users_Guide.pdf
- 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, 103-118. [In Persian with English Summary]. <https://doi.org/10.52547/jcb.14.44.103>
- 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. <https://doi.org/10.5829/idosi.wjas.2015.11.4.12763>
- Yan, W., Kang, M.S., 2003. GGE Biplot Analysis: A Graphical Tool for Breeders, Geneticists and Agronomists. CRC Press, Boca Raton, FL, USA. <https://doi.org/10.1201/9781420040371>
- Yan, W., Hunt, L., Sheng, Q., Szlavniks, Z., 2000. Cultivar evaluation and mega-environment investigation based on the GGE biplot. Crop Science. 40, 597-605. <https://doi.org/10.2135/cropsci2000.403597x>
- Yau, S., Ortiz-Ferrara, G., Srivastava, J., 1991. Classification of diverse bread wheat-growing environments based on differential yield responses. Crop Science. 31, 571-576. <https://doi.org/10.2135/cropsci1991.0011183X003100030004x>