

Research Paper

The Investigation of the Seed Yield Stability of Cumin Genotypes in Different Environments using the GGE-Biplot Graphical Method

Hamid Reza Fanaei¹, Behzad Sorkhilalehloo², Seid Mohammad Alavi-siney³,
Majid Reza Kiani Freez⁴, Ali Eftekhari⁵, Abolghasem Moradgholi⁶,
Manni Marefatzadeh-Khameneh⁷ and Hossein Akbari Moghadam⁸

- 1- Professor, Seed and Plant Improvement Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran, (Corresponding author: fanay52@yahoo.com)
- 2- Assistant Professor, Seed and Plant Improvement Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran
- 3- Assistant Professor, Crop and Horticultural Science Research Department, Southern Kerman Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Jiroft, Iran
- 4- Assistant Professor, Crop and Horticultural Science Research Department, Razavi Khorasan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Mashhad, Iran
- 5- Assistant Professor, Crop and Horticultural Science Research Department, Southern Khorasan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Birjand, Iran
- 6- Researcher, Crop and Horticultural Science Research Department, Sistan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Zabol, Iran
- 7- Researcher, Seed and Plant Improvement Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran
- 8- Assistant Professor, Knowledge-Based Research and Development Company of Agricultural and Natural Resources Idea Developers of Hirmand Region, Zabol, Iran

Received: 02 June, 2025

Revised: 18 September, 2025

Accepted: 22 October, 2025

Extended Abstract

Background: Given that some medicinal plants show high drought resistance, utilizing these species can be considered a strategy to increase productivity and manage water consumption in agricultural farming systems. Cumin is a suitable option for production in limited lands due to its nativeness, the presence of indigenous and diverse masses adapted to the diverse weather conditions of Iran, and having genes for resistance to drought, salinity, pests, and diseases. Despite the valuable features of green cumin, no officially improved varieties of this plant have been introduced so far; therefore, identifying and studying the genetic and functional diversity in the germplasm available in plant gene banks are significant for breeding purposes. The main breeding objectives in green cumin include increasing seed yield, improving essential oil quality with an emphasis on effective medicinal compounds, and enhancing resistance to biotic and abiotic stresses, such as diseases and drought. This experiment aimed to evaluate genotypes, environments, and relationships between genotypes and environments, and finally to identify stable genotypes with high performance and general and specific compatibility of cumin using the GGE-Biplot graphic method.

Methods: To evaluate the seed yield stability of 36 cumin genotypes, an experiment was conducted in a complete randomized block design (RCBD) with three replications in five research stations (Jiroft, Mashhad, Birjand, Zabol, and Karaj) in 2022-2023. The seeds of each genotype were planted in four rows with a row distance of 20 cm. To achieve a density of 100-120 plants per square meter, the field was thinned with a distance of 5-7 cm between two plants on the line in the 5-leaf stage. The plants were harvested at the ripening stage (80% yellowing of the plant). The plants were pounded after completely drying, and the seeds were separated from the straw, followed by calculating the seed yield per unit area. Data were analyzed using SAS and SPSS software. The GGE-Biplot graphical method was used to analyze the stability of the studied genotypes, interpret the genotype \times environment interaction, and determine the super environment.

Results: The results of the combined variance analysis based on the data of five environments for grain yield showed that the effects of the genotype, environment, and the genotype \times environment interaction were significant. Analysis of stability was done for genotypes in different environments due to the significance of both the environment and the genotype \times environment interaction. The results of GGE-Biplot analysis showed that the two main components explained 67% of the total variation of the genotype-environment interaction variance. Two macro environments and the compatible genotypes of each environment were determined based on the



polygon diagram. Genotypes G30 and G6 showed the best reaction as specific compatibility in the super environment 1, including Mashhad, Zabul, Birjand, and Karaj. This super environment allocated almost four of the investigated environments located in the warm climate of the south and the temperate climate of the country, with the exception of Jiroft, which indicated the importance of determining this super environment. The second super environment included Jiroft, and the G35 genotype was identified as the superior genotype of this environment with specific compatibility. Based on the biplot, genotype G30 was the ideal genotype, and then the genotypes G24, G31, G5, G26, G6, G33, and G32 showed the smallest distance from the ideal genotype. In terms of both average performance and stability, therefore, it is better than the other genotypes, and they presented high general compatibility in the studied environments. Based on the results of the biplot of the ideal environment, the Mashhad environment showed the most differentiation and was found to be the most suitable environment to compare cumin genotypes.

Conclusions: The necessity of using stable cultivars with high yield potential has always been considered due to the current climatic conditions of the country and the persistence of drought and water shortage in most parts of the country, especially in hot and dry regions. In this research, stable and superior genotypes were clearly identified graphically, which shows the appropriate efficiency of the GGE biplot method for selecting high-yielding and stable cultivars. The Mashhad environment can be introduced as a favorable environment for selecting the best cumin genotypes. Based on the total results, G30, G6, G5, G26, and G35 genotypes were identified as suitable and ideal choices for cumin in the regions due to their higher seed yield, stability in performance, and general and specific compatibility. These genotypes can be evaluated in research and extension trials under farmers' conditions, and the superior genotype(s), compared to the local check, can enter the process of introducing new cumin cultivars.

Keywords: Adaptability, Cumin, Seed yield, Stability

How to Cite This Article: Fanaei, H. R., Sorkhilalehloo, B., Alavi-siney, S. M., Kiani, M. R., Eftekhari, A., Moradgholi, A., Marefatzadeh-Khameneh, M., & Akbari Moghadam, H. (2026). The Investigation of the Seed Yield Stability of Cumin Genotypes in Different Environments using the GGE-Biplot Graphical Method. *J Crop Breed*, 18(1), 93-105. DOI: 10.61882/jcb.2026.1597



مقاله پژوهشی

بررسی پایداری عملکرد دانه ژنوتیپ‌های زیره سبز در محیط‌های مختلف کاشت با استفاده از روش گرافیکی GGE-Biplot

حمیدرضا فنایی^۱، بهزاد سرخی مله‌لو^۲، سید محمد علوی سینی^۳، مجیدرضا کیانی فریز^۴، علی افتخاری^۵، ابوالقاسم مرادقلی^۶، مانی معرفت‌زاده خامنه^۷ و حسین اکبری مقدم^۸

۱- استاد، مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، سازمان تحقیقات، ترویج و آموزش کشاورزی، کرج، ایران، (نویسنده مسوول: fanay52@yahoo.com)

۲- استادیار، مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، سازمان تحقیقات، ترویج و آموزش کشاورزی، کرج، ایران

۳- استادیار، بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی جیرفت، سازمان تحقیقات، ترویج و آموزش کشاورزی، جیرفت، ایران

۴- استادیار، بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی، سازمان تحقیقات، ترویج و آموزش کشاورزی، مشهد، ایران

۵- استادیار، بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان جنوبی، سازمان تحقیقات، ترویج و آموزش کشاورزی، بیرجند، ایران

۶- محقق، بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی سیستان، سازمان تحقیقات، ترویج و آموزش کشاورزی، زابل، ایران

۷- محقق، مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، سازمان تحقیقات، ترویج و آموزش کشاورزی، کرج، ایران

۸- استادیار، شرکت دانش بنیان تحقیق و توسعه ایده‌پردازان کشاورزی و منابع طبیعی حوزه هیرمند، زابل، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۳۰

تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۶/۲۷
صفحه: ۹۳ تا ۱۰۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۱۲

چکیده مبسوط

مقدمه و هدف: با توجه به این که برخی گیاهان دارویی از مقاومت بالایی در برابر خشکی برخوردارند، بهره‌گیری از این گونه‌ها می‌تواند به‌عنوان یکی از راهکارهای افزایش بهره‌وری و مدیریت مصرف آب در نظام‌های زراعی کشاورزی مورد توجه قرار گیرد. زیره سبز به‌دلیل بومی بودن، وجود توده‌های بومی و متنوع سازگار با شرایط آب و هوایی متنوع کشور و دارا بودن ژن‌های مقاومت به خشکی، شوری و آفات و بیماری‌ها گزینه بسیار مناسب برای تولید در اراضی دارای محدودیت آب است. با وجود ویژگی‌های ارزشمند زیره سبز، تاکنون ارقام اصلاح‌شده‌ای از این گیاه به‌طور رسمی معرفی نشده‌اند؛ از این‌رو، شناسایی و بررسی تنوع ژنتیکی و عملکردی در ژرم پلاسم موجود در بانک‌های ژن گیاهی، با اهداف اصلاحی حایز اهمیت هستند. مهم‌ترین اهداف اصلاحی در زیره سبز شامل افزایش عملکرد دانه، بهبود کیفیت اسانس با تأکید بر ترکیبات مؤثره دارویی و ارتقای مقاومت به تنش‌های زیستی و غیر زیستی مانند بیماری‌ها و خشکی هستند. هدف این آزمایش ارزیابی ژنوتیپ‌ها، محیط‌های کشت، روابط ژنوتیپ‌ها و محیط‌ها و در نهایت شناسایی ژنوتیپ‌های پایدار با عملکرد بالا و سازگاری عمومی و خصوصی زیره سبز تحت شرایط محیطی مختلف با استفاده از روش گرافیکی GGE-Biplot پلات بود.

مواد و روش: به‌منظور بررسی پایداری عملکرد دانه ۳۶ ژنوتیپ زیره سبز، آزمایشی در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در پنج ایستگاه تحقیقاتی شامل (جیرفت، مشهد، بیرجند، زابل و کرج) در سال زراعی ۱۴۰۲-۱۴۰۱ اجرا گردید. بذر هر ژنوتیپ در چهار ردیف و با فاصله ردیف ۲۰ سانتی‌متر کشت شد. در مرحله پنج برگی، جهت دستیابی به تراکم ۱۲۰-۱۰۰ بوته در مترمربع، تنک مزرعه با رعایت فاصله ۷-۵ سانتی‌متری بین دو بوته روی خط صورت گرفت. بوته‌ها در مرحله رسیدگی (۸۰ درصد زردشدن بوته) برداشت و پس از خشک شدن کامل بوته‌ها اقدام به کوبیدن و جداسازی بذور از کاه و کلش شد و عملکرد دانه در واحد سطح محاسبه شد. داده‌ها با استفاده از نرم‌افزارهای SAS و SPSS مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. برای ارزیابی پایداری و سازگاری ژنوتیپ‌ها در محیط‌های مورد بررسی و تفسیر برهم‌کنش ژنوتیپ × محیط و تعیین ابرمحیط از روش گرافیکی GGE-Biplot استفاده شد.

یافته‌ها: نتایج تجزیه واریانس مرکب بر اساس داده‌های پنج محیط برای عملکرد دانه نشان دادند که اثر ژنوتیپ، محیط و برهم‌کنش ژنوتیپ در محیط معنی‌دار بود. با توجه به معنی‌دار شدن محیط و همچنین برهم‌کنش ژنوتیپ × محیط، تجزیه پایداری برای ژنوتیپ‌ها در محیط‌های مختلف انجام شد. نتایج حاصل از تجزیه GGE-Biplot نشان دادند که دو مؤلفه اصلی در مجموع ۶۵ درصد از کل تغییرات واریانس برهم‌کنش ژنوتیپ در محیط را توجیه نمودند. بر اساس نمودار چند ضلعی، دو محیط کلان و ژنوتیپ‌های سازگار هر محیط تعیین شدند. ژنوتیپ‌های G30 و G6 در ابرمحیط ۱ شامل مشهد، زابل، بیرجند و کرج بهترین عکس‌العمل را از نظر سازگاری خصوصی نشان دادند. این ابرمحیط تقریباً چهار تا از محیط‌های مورد بررسی واقع در اقلیم گرم جنوب و معتدل کشور، به استثنای جیرفت، را به خود اختصاص داد که نشان‌دهنده اهمیت تعیین‌کنندگی این ابرمحیط بود. ابرمحیط ۲ شامل جیرفت بود و ژنوتیپ G3 شامل ژنوتیپ‌های G31، G24، G5، G26، G6، G33 و G32 کمترین فاصله را از ژنوتیپ آرمانی فرضی داشتند. لذا از نظر هر دو عامل میانگین عملکرد و پایداری، بهتر از سایر ژنوتیپ‌ها بودند و سازگاری عمومی بالایی در محیط‌های مورد مطالعه داشتند. همچنین، بر اساس نتایج نمودار بای‌پلات محیط ایده‌آل، محیط مشهد بیشترین تمایز را نشان داد و برای انجام بررسی‌های مقایسه ژنوتیپ‌های زیره سبز به‌عنوان مناسب‌ترین محیط تشخیص داده شد.

نتیجه‌گیری: با توجه به شرایط حال اقلیمی کشور و تداوم خشکی و کم‌آبی در اکثر نقاط کشور به‌ویژه مناطق گرم و خشک، لزوم استفاده از گیاهان کم‌آب‌بر و ارقام پایدار با پتانسیل عملکرد بالا از آنها همواره مورد توجه بوده است. در این تحقیق، به‌وضوح شناسایی ژنوتیپ‌های پایدار و برتر به‌صورت گرافیکی انجام شد که نشان‌دهنده کارایی مناسب روش بای‌پلات برای انتخاب ارقام پرمحصول و پایدار است. محیط مشهد را می‌توان به‌عنوان محیط مطلوب جهت انتخاب ژنوتیپ‌های برتر زیره سبز معرفی کرد. بر اساس نتایج کلی و تفسیرهای صورت گرفته، ژنوتیپ‌های G30، G6، G5، G26 و G35 به‌دلیل دارا بودن عملکرد دانه بالاتر، پایداری در عملکرد و دارا بودن سازگاری عمومی و خصوصی در مناطق به‌عنوان گزینه‌های انتخابی مناسب و ایده‌آل زیره سبز مشخص شدند. این ژنوتیپ‌ها می‌توانند در آزمایش تحقیقی و ترویجی در شرایط زارعین مورد ارزیابی قرار گیرند و ژنوتیپ یا ژنوتیپ‌های برتر نسبت به شاهد محلی، وارد فرایند معرفی ارقام جدید زیره سبز شوند.

واژه‌های کلیدی: پایداری، زیره سبز، سازگاری، عملکرد دانه

مقدمه

حدود دو سوم برسد. توجه به گیاهان دارویی به‌دلیل برخورداری از میزان تحمل بالا به خشکی می‌تواند به‌عنوان یکی از راهکارهای افزایش بهره‌وری و مدیریت مصرف آب در

در حال حاضر، حدود یک سوم زمین‌های زراعی دنیا با کمبود آب مواجه هستند که انتظار می‌رود تا سال ۲۰۲۵ به

و بررسی اثرات متقابل ژنوتیپ و محیط و پایداری تولید با توجه به تنوع شرایط آب و هوایی مناطق مختلف در راستای تولید و معرفی ارقام جدید زیره سبز حائز اهمیت است (Alavi-Siney *et al.*, 2024). دست‌یابی به ارقام با عملکرد زیاد و دامنه سازگاری وسیع مهم‌ترین هدف اصلاح‌گران است (Mardeh *et al.*, 2006) که البته برهم‌کنش ژنوتیپ × محیط دست‌یابی به این مهم را دشوار می‌سازد. برهم‌کنش ژنوتیپ × محیط پاسخ ژنوتیپ‌های مختلف در مقابل تغییرات شرایط محیطی است. وجود این برهم‌کنش منجر به کاهش بازدهی روش‌های اصلاحی و مانع توسعه ارقام زراعی در عرصه تولید می‌شود (Haile & Kebede, 2021; Sheikh & Feyzbakhsh, 2019). در چنین شرایطی، اصلاح محصول بالاخص برای صفات پیچیده نیازمند به معیارهای انتخاب دقیق بر اساس مدل‌های بیومتریک مناسب است (Cruz, 2013). بررسی سازگاری محصول با انجام آزمایشات چندمحیطی کمک به درک ماهیت برهم‌کنش ژنوتیپ × محیط، شناسایی ژنوتیپ‌هایی با عملکرد زیاد در چند محیط و محیط‌های دارای قدرت تمایز در فرایند اصلاح گیاهان زراعی خواهد نمود (Yan & Rajcan, 2002; Yan WeiKai & Hunt, 2002; Zeleke & Berhanu, 2016). برای غلبه بر چالش برهم‌کنش، ارزیابی ژنوتیپ‌ها در شرایط محیطی متنوع و انتخاب ژنوتیپ‌هایی که پتانسیل عملکرد پایدار و بالا در مکان‌ها و سال‌های متفاوت دارند، بسیار مهم هستند. این رویکرد توسط محققان متعددی در محصولات مختلف پیشنهاد شده است (Belay *et al.*, 2020; Singh *et al.*, 2016).

روش GGE بای‌پلات (ژنوتیپ و ژنوتیپ در محیط) ابزاری چند وجهی است که در تجزیه و تحلیل ژنتیک کمی و اصلاح نباتات به شدت نظر اصلاح‌کنندگان گیاهی و تولیدکنندگان زراعی را به خود جلب کرده است (Mortazavian *et al.*, 2014; Mortazavian *et al.*, 2018; Yan WeiKai & Kang, 2003). این روش به رونمایی روابط متقابل بین ژنوتیپ‌ها و محیط‌ها کمک می‌کند. داده‌های عملکردی حاصل از آزمایش‌های چند محیطی، معمولاً بزرگ هستند و ارائه گرافیکی آنها به درک الگوی اثر متقابل محیط در ژنوتیپ داده‌های آزمایشات چندمحیطی کمک می‌کند (Sawargaonkar *et al.*, 2011). روش GGE-Biplot نه‌تنها برهم‌کنش ژنوتیپ × محیط را در نظر می‌گیرد، بلکه از اثر اصلی ژنوتیپ نیز استفاده می‌کند. این روش با رسم نمودارهای دو بعدی کار تفسیر نتایج را نیز تسهیل می‌نماید و روش ایده‌آلی جهت انجام تجزیه پایداری است. محققان مختلف با استفاده از این تجزیه در محیط‌های مختلف کاشت اکوتیپ‌های را به‌عنوان مطلوب‌ترین کاندیدها برای تحقیقات بیشتر در برنامه‌های به‌زادگی شناسایی و مشخص نمودند (Haile & Kebede, 2021; Mortazavian *et al.*, 2018; Sheikh *et al.*, 2021). این محققان اظهار می‌کنند که استفاده از شاخص‌های تحمل و استفاده از روش‌های چندمتغیره راه منطقی برای انتخاب دقیق بهترین ژنوتیپ‌ها است. در مطالعه علوی سینی و همکاران (Alavi-Siney *et al.*, 2024) نیز نتایج حاصل از روش GGE بای‌پلات نشان دادند که دو مؤلفه اصلی اول و دوم به‌ترتیب ۸۳/۷۱ و ۹/۲۹ درصد و در مجموع ۹۳ درصد از

نظام‌های زراعی کشاورزی باشد. گیاهان تیره چتریان در ایران به‌عنوان گیاهان دارویی و معطر، سبزیجات خوراکی، ادویه‌جات، علوفه‌ای و سمی دارای ترکیبات شیمیایی مهمی هستند (Motamedi *et al.*, 2022). زیره سبز یکی از ارزشمندترین گیاهان دارویی این تیره در دنیا و ایران است که به‌دلیل بومی بودن و وجود توده‌های بومی و ژرم‌پلاسم متنوع و سازگار با شرایط آب و هوایی متنوع کشور و دارا بودن ژن‌های مقاومت به خشکی، شوری و آفات و بیماری‌ها گزینه‌ای بسیار مناسب برای تولید در اراضی دارای محدودیت است (Mozafarian, 2016). زیره سبز یک گیاه معطر چندمنظوره است که در سراسر جهان برای مصارف مختلف آشپزی و دارویی به‌کار برده می‌شود. در حال حاضر، دومین ادویه پرمصرف جهان بعد از فلفل است (Kanani *et al.*, 2019). در مقیاس جهانی تقاضای بالایی برای دانه آن وجود دارد و به‌عنوان یک ماده خام برای مصارف دارویی، غذایی، صنایع آرایشی و بهداشتی کاربرد دارد (Gondaliya *et al.*, 2018). دانه‌ها دارای مقادیر ارزشمندی از ویتامین‌ها، اسیدهای آمینه، مواد معدنی و غیره هستند که فواید زیادی برای سلامتی انسان دارند (Agarwal *et al.*, 2017). دانه زیره سبز حاوی ۷ درصد رطوبت، ۳ تا ۴ درصد روغن فرار، ۱۲ تا ۱۷/۸ درصد پروتئین، ۳۳ تا ۴۴/۲۴ درصد کربوهیدرات، ۱۰ درصد خاکستر کل، ۱۱ درصد فیبر، ۱۱ درصد نشاسته و ۱۱ درصد چربی است. ترکیبات کومین‌آلدهید، سیمن، الکل کومینیک (کومینول)، گاما تریپنن، سافرانال، لیمونن، اوژنول، بتا میرسن، آلفا فلاندرن، بتا فلاندرن، آلفا پینن و بتا پینن در دانه زیره سبز گزارش شده‌اند (Singh *et al.*, 2017). کومین‌آلدهید، به‌عنوان اصلی‌ترین ترکیب فعال زیستی گیاه زیره سبز شناخته شده است (Nirmala *et al.*, 2020). عطر معمولی و مطبوع دانه‌ها به‌دلیل محتوای روغن فرار آن‌ها است که ماده اصلی تشکیل دهنده آن کومینول (کومین‌آلدهید) است. ترکیبات بذر زیره سبز بسته به مکان رشدی و چگونگی فرآوری دچار تغییرات می‌شود (Ahuja & Mathpal, 2022). هند با تولید سالانه ۱۰۰ تا ۲۰۰ هزار تن بزرگ‌ترین تولیدکننده دانه زیره در جهان است. سوریه با تولید ۲۵۰۰۰ تن در رتبه دوم قرار دارد. ترکیه و ایران هر دو با تولیدی متغیر اما نسبتاً برابر بین ۱۵۰۰۰ تا ۲۰۰۰۰ تن در رتبه‌های سوم و چهارم جهان قرار دارند (Bharti *et al.*, 2018; Lim & Lim, 2012). زیره سبز با داشتن فصل رویش کوتاه (۱۰۰ تا ۱۱۰ روز)، تحمل بسیار بالا به کم‌آبی و نیاز آبی کم، عدم تداخل زمانی کشت آن با محصولات پاییزه دیگر، آفات کمتر و ارزش افزوده اقتصادی بالا در واحد سطح و عدم نوسان‌پذیری در قیمت، به‌طور گسترده در الگوی کشت مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران به‌عنوان زراعتی مناسب و تأثیرگذار مطرح است. این گیاه در مرحله گلدهی و تشکیل میوه به رطوبت کمتری نیاز دارد (Nazarian, 2014) و می‌تواند در بدترین شرایط کم‌آبی تولید شود. در سال‌های نرمال و متوسط از نظر بارندگی آبیاری نقش زیادی ندارد و حتی در اکثر موارد باعث کاهش محصول نیز می‌گردد (Alizadeh *et al.*, 2005). توده‌های محلی از نظر صفات کمی و کیفی بسیار متفاوت هستند و ویژگی‌های متمایز زراعی دارند. شناخت تنوع ژنتیکی

در نظر گرفته شد. در مرحله پنج برگی، جهت دستیابی به تراکم ۱۲۰-۱۰۰ بوته در مترمربع، تنک کردن بوته‌ها با رعایت فاصله ۷-۵ سانتی‌متری بین دو بوته روی خط صورت گرفت. عملیات زراعی شامل آماده سازی زمین (شخم پاییزه، دیسک و لولر)، پخش کودهای پایه قبل از کشت، وجین علف‌های هرز، آبیاری، تغذیه و مبارزه با آفات و بیماری در زمان مناسب بر اساس شرایط هر منطقه انجام شد. در هر پنج منطقه بر روی نمونه‌های سبز شده، وجین علف‌های هرز در طی دوره رشد تا رسیدن دانه‌ها به صورت دستی انجام شد. برای تعیین عملکرد دانه پس از حذف دو ردیف کناری و ۰/۵ متر از ابتدا و انتهای خطوط هر کرت به عنوان اثر حاشیه‌ای، بوته‌ها در مرحله رسیدگی (۸۰ درصد زردشدن بوته) در سطحی معادل یک متر مربع برداشت شدند و پس از خشک شدن کامل بوته‌ها اقدام به کوبیدن و جداسازی بذور از کاه و کلش گردید. دانه‌های به دست آمده توزین شدند و پس از تبدیل، به‌عنوان عملکرد دانه در واحد سطح (کیلوگرم در هکتار) محاسبه گردید.

تجزیه و تحلیل آماری

آزمون نرمال بودن باقیمانده داده‌ها از طریق آزمون کولموگوروف-سیمروف و با استفاده از نرم‌افزار SPSS ver 20 انجام گرفت. سپس آزمون بارتلت به‌منظور بررسی یکنواختی واریانس محیط‌ها انجام شد و در ادامه، تجزیه واریانس مرکب انجام شد. با توجه به معنی دار شدن اثر متقابل ژنوتیپ × محیط، تجزیه گرافیکی، با استفاده از روش GGE بای‌پلات انجام شد (Yan WeiKai & Kang, 2003). به‌منظور رسم نمودارهای بای‌پلات، مربوط به پایداری ژنوتیپ‌ها، میانگین عملکرد دانه ژنوتیپ‌ها در محیط‌های مختلف به صورت یک ماتریس دوطرفه تنظیم و به نرم‌افزار GGE Biplot V6.3 معرفی شد. رسم نمودارهای بای‌پلات بر اساس دو مؤلفه اصلی اول و دوم صورت گرفت. تعیین ژنوتیپ‌هایی با عملکرد بالا و پایدار و شناسایی محیط‌های کلان، با استفاده از مدل آماری زیر انجام شد (Sabaghnia et al., 2008; Sheikh et al., 2022):

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

در مدل فوق، Y_{ij} میانگین آمین ژنوتیپ در زمین محیطی، μ میانگین کل، β_j میانگین اثر محیط زام، λ_1 و λ_2 مقادیر ویژه برای اولین و دومین مؤلفه، ξ_{i1} و ξ_{i2} بردارهای ویژه ژنوتیپی و η_{j1} و η_{j2} بردارهای محیطی مؤلفه‌های اول و دوم و ε_{ij} مقدار باقیمانده برای ژنوتیپ نام در محیط زام هستند.

تنوع مربوط به برهمکنش اکوتیپ × تاریخ کاشت را توجیه نمودند که حاکی از اعتبار تجزیه انجام شده بود. در این بررسی، زیره سبز نهبندان پایدارترین اکوتیپ با عملکرد کمتر از حدمتوسط و اکوتیپ بیرجند ایده‌آل‌ترین اکوتیپ معرفی شدند. در بررسی مرتضویان و همکاران (Mortazavian et al., 2018)، عملکرد بذر زیره سبز تحت تأثیر محیط قرار گرفت، به‌طوری‌که محیط ۷۱/۳۴ درصد از مجموع مربعات (محیط + ژنوتیپ + برهم‌کنش ژنوتیپ × محیط) را به خود اختصاص داد، در حالی که ژنوتیپ (G) و برهم‌کنش ژنوتیپ × محیط (GEI) به ترتیب ۱۶/۵ و ۱۲/۱۵ درصد از مجموع مربعات کل را شامل شدند و این موضوع نشان داد که شرایط محیطی و سال‌های مختلف تأثیر بیشتری بر تغییرات عملکرد (عملکرد بذر) نسبت به ژنوتیپ‌ها و برهم‌کنش ژنوتیپ × محیط در این آزمایش داشتند. استفاده از روش GGE-Biplot برای بررسی برهمکنش ژنوتیپ × محیط و پایداری ژنوتیپ‌ها در محصولات زراعی مختلف از جمله گشنیز (Ebrahimi, Gholizadeh & Khodadadi, 2023) گلرنگ (Masoudi et al., 2024)، سویا (Mengistu et al., 2023)، و باقلا (Greveniotis, et al., 2021) گزارش شده است. تنوع ژنتیکی نقش مهمی در اصلاح نباتات دارد و استفاده از این تنوع سبب موفقیت در برنامه‌های اصلاحی و بهبود عملکرد محصولات زراعی می‌گردد. هدف این پژوهش، ارزیابی برهم‌کنش ژنوتیپ × محیط با استفاده از روش GG بای‌پلات به‌منظور ارزیابی ژنوتیپ‌ها، محیط‌ها، روابط ژنوتیپ‌ها و محیط‌ها و در نهایت شناسایی ژنوتیپ‌های پایدار با عملکرد دانه بالا تحت شرایط محیطی مختلف بود.

مواد و روش‌ها

به‌منظور بررسی پایداری عملکرد دانه ۳۶ ژنوتیپ زیره سبز، آزمایشی در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در ایستگاه‌های تحقیقات کشاورزی پنج منطقه شامل (جیرفت، مشهد، بیرجند، زابل و کرج) در تاریخ کشت مناسب هر منطقه در سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۲ اجرا گردید. برخی از ویژگی‌های جغرافیایی، اطلاعات هواشناسی مناطق کشت به‌همراه منشا ژنوتیپ‌های مورد بررسی در جداول ۱ و ۲ ارائه شده‌اند. کشت در کرج (اواسط بهمن‌ماه)، مشهد (اواسط آذرماه)، بیرجند (اوایل آذرماه)، و جیرفت و زابل (اواخر آبان‌ماه) انجام گرفت. بذر هر ژنوتیپ روی دو پشته و در هر پشته دو خط به طول ۳ متر (جمعا ۴ خط) و با فاصله ردیف ۲۰ سانتی‌متر کشت شد. فاصله کرت‌ها یک پشته نکاشته و فاصله تکرارها از هم ۲ متر

جدول ۱- خلاصه‌ای از وضعیت جغرافیایی، متوسط بارندگی، حرارت، و ارتفاع از سطح دریا برای محیط‌های محل آزمایش

Table 1. A summary of the geographical situation, rainfall mean, temperature, and mean sea level of the experimental environments

ارتفاع از سطح دریا (متر) Altitude	طول جغرافیایی Longitude	عرض جغرافیایی Latitude	میانگین بارندگی سالانه (میلیمتر) Mean annual rainfall (mm)	میانگین دمای سالانه (سانتی‌گراد) Average annual temperature (cg)	میانگین حداقل دمای سالانه (سانتی‌گراد) Average minimum annual temperature (cg)	میانگین حداکثر دمای سالانه (سانتی‌گراد) Average maximum annual temperature (cg)	Location
1300	50°97'	28°35'	247.3	14.1	10.4	22	Karaj
984	59.6°	36.2°	250.0	15.0	6.8	20.5	Mashhad
1470	59°26'	38°32'	133.0	19.3	10.8	28.3	Birjand
489	41°61'	31°54'	50.8	22.0	14.6	29.5	Zabol
702	57°66'	28°91'	220.2	25.97	17.45	34.48	Jiroft

جدول ۲- مشخصات ژنوتیپ‌های زیره سبز تهیه شده از بانک ژن گیاهی ملی ایران

Table 2. Cumin genotypes prepared from the National Plant Gene Bank of Iran.

منشأ Source	کد Code	شماره ژنوتیپ Genotype No	منشأ Source	کد Code	شماره ژنوتیپ Genotype No	منشأ Source	کد Code	شماره ژنوتیپ Genotype No
TorbateJam2	TN-146	G25	Birjand	TN-90	G13	Bafgh	TN-2	G1
IPK	TN-172	G26	Birjand	TN-92	G14	Khorasan	TN-11	G2
Taibad	TN-28	G27	Kangan	TN-107	G15	Mehriz	TN-15	G3
Ferdos	TN-45	G28	SBZ	TN-118	G16	Naein	TN-17	G4
Ferdos	TN-61	G29	TorbateJam5	TN-119	G17	Ferdos	TN-21	G5
Ghaienat	TN-81	G30	TorbateJam1	TN-123	G18	Taibad	TN-29	G6
Birjand	TN-91	G31	Firoozeh	TN-131	G19	Tabas	TN-35	G7
Taibad	TN-113	G32	Khaf	TN-135	G20	Tabas	TN-37	G8
Esfaraen	TN-125	G33	Jovein	TN-136	G21	Sabzevar	TN-53	G9
BRJ	TN-150	G34	Boshroieh	TN-139	G22	Ardakan	TN-78	G10
Sabzevar	TN-180	G35	Khaf	TN-143	G23	Torbat	TN-87	G11
Sistan1	TN-181	G36	Marvdasht	TN-145	G24	Birjand	TN-88	G12

نتایج و بحث

G31، G4، G33 و G25 مشاهده شد (شکل ۱). محاسبه درصد میانگین مربعات (واریانس) سه منبع محیط، ژنوتیپ و اثر متقابل ژنوتیپ × محیط به مجموع آنها نشان داد که عمده تغییرات موجود در داده‌ها به وسیله واریانس محیط‌ها توجیه شدند (۹۷/۲۸ درصد) و واریانس بین ژنوتیپ‌ها و نیز واریانس اثر متقابل ژنوتیپ × محیط به ترتیب ۰/۱۶ و ۱/۰۵ درصد از تغییرات را به خود اختصاص دادند (جدول ۳). بزرگی اثر محیط نشان‌دهنده تنوع محیط‌ها است که باعث ایجاد تفاوت در عملکرد دانه ژنوتیپ‌ها شده است. سایر محققان در آزمایش‌های چندمحیطی خود نشان دادند که اثر محیط درصد قابل توجهی از تغییرات موجود در داده‌ها را به خود اختصاص داد (Mortazavian *et al.*, 2018; Mengistu *et al.*, 2023). فاکتورهای محیطی چون میزان بارندگی، ارتفاع از سطح دریا، و طول و عرض جغرافیایی در محیط‌های مختلف می‌توانند از دلایل اختلاف عملکرد ژنوتیپ‌ها باشند (Ghazvini *et al.*, 2019; Sheikh *et al.*, 2022).

نتایج تجزیه واریانس مرکب عملکرد دانه برای محیط‌های مختلف برآورد شدند. اثر ژنوتیپ، محیط و برهم‌کنش ژنوتیپ، محیط برای عملکرد دانه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). معنی‌دار شدن اثر متقابل ژنوتیپ × محیط نشان‌دهنده این مطلب بود که ژنوتیپ‌ها در محیط‌های متفاوت پاسخ‌های متفاوتی نشان دادند و به عبارت دیگر، اختلاف بین ژنوتیپ‌ها از محیطی به محیطی دیگر یکسان نیست که می‌تواند به دلیل پاسخ متفاوت ژن‌ها و یا قدرت تظاهر متفاوت آنها در محیط‌های مختلف باشد (Falconer, 1981; Jafari & Farshadfar, 2018). نتایج به دست آمده با نتایج سایر پژوهشگران در تطابق بود (Alavi-Siney *et al.*, 2024; Azizi & Mirmiran, 2023; Mortazavian *et al.*, 2018).

بر اساس نتایج آزمون مقایسه میانگین‌ها که بر اساس حداقل اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد بود، بالاترین عملکرد دانه در ژنوتیپ‌های G12، G32، G35، G6، G24، G30، G12.

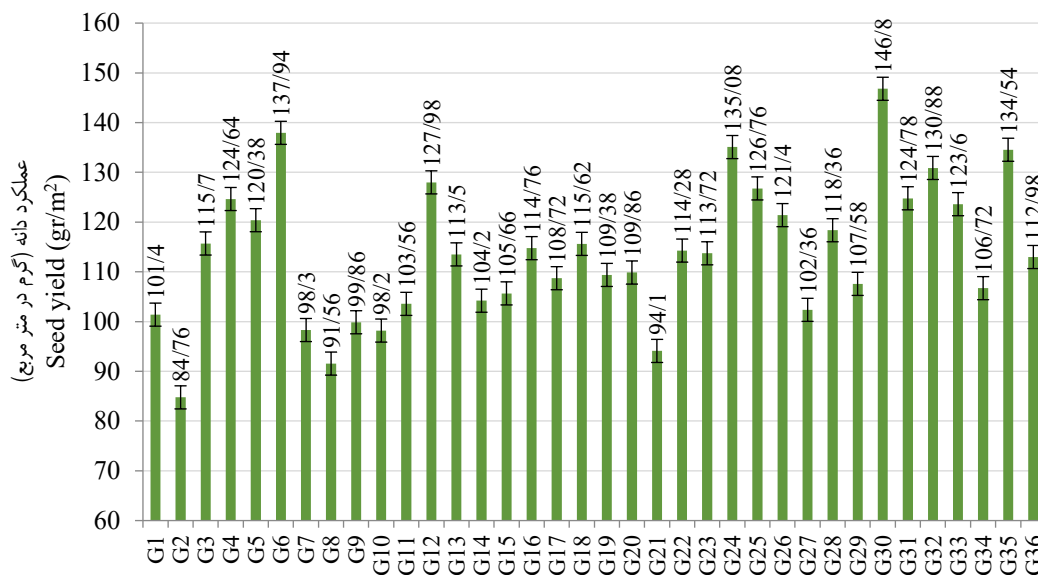
جدول ۳- تجزیه واریانس مرکب عملکرد دانه ژنوتیپ‌های زیره سبز در محیط‌های مختلف

Table 3. Combined analysis of variance for grain yields of cumin genotypes in different environments

درصد واریانس کل Total variation (%)	میانگین مربعات Mean square	درجه آزادی Degree of freedom	منابع تغییرات Source of variation
97.28	169670**	4	محیط Environment (E)
-	1798.644	10	تکرار (محیط) Replication (R)
0.16	2907.7735**	35	ژنوتیپ Genotype (G)
1.05	1833.550**	140	ژنوتیپ × محیط G × E

** معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد.

**significant at the 0.01 probability level.



شکل ۱- میانگین عملکرد دانه ژنوتیپ‌های زیره سبز مورد بررسی در پنج محیط مورد مطالعه
Figure 1. Mean seed yields of cumin genotypes evaluated across five studied environments

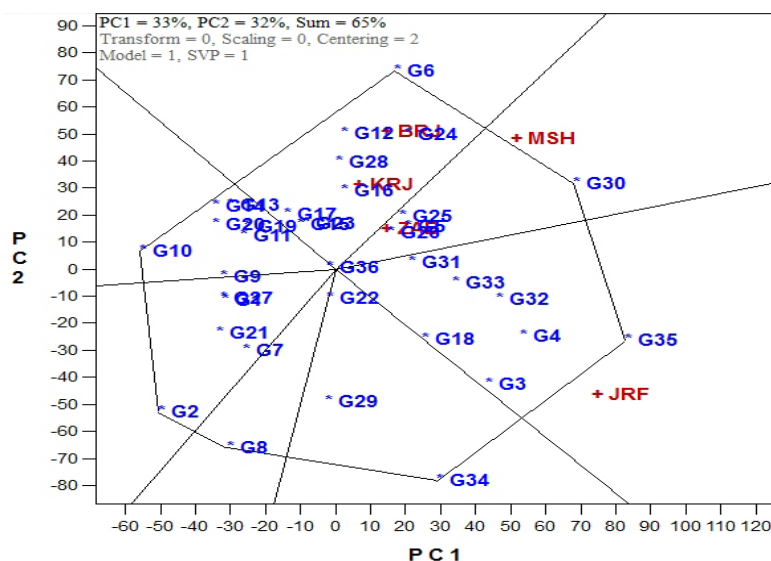
عمود بر اضلاع چندوجهی حاصل رسم و از این طریق ابرمحیطها تعیین می‌شوند (Yan *et al.*, 2007). GGE بای‌پلات چندضلعی برترین و بدترین ژنوتیپها را برای هر ابرمحیط نشان می‌دهد. با بررسی نمودار چندضلعی (Polygon) دو محیط کلان یا ابرمحیط مشخص شدند. ابرمحیط ۱ شامل محیطهای مشهد، زابل، بیرجند و کرج بود. ژنوتیپهای G6 و G30 که در رأس چندضلعی قرار داشتند، ژنوتیپهای برترین محیط بودند. علاوه بر این دو ژنوتیپ در این محیط کلان، ژنوتیپهای دیگری هم وجود داشتند که شباهت بالایی با ژنوتیپهای قرارگرفته در رأس چندضلعی داشتند و دارای سازگاری خصوصی بالا با این محیط و محیطهای واقع شده در ابر محیط هستند (شکل ۳). ابر محیط ۲ شامل جیرفت بود و ژنوتیپ G35 به‌عنوان ژنوتیپ برتر و دارای سازگاری خصوصی بالا با این محیط شناسایی شد. ابرمحیط ۱، چهار تا از محیطهای مورد بررسی واقع در اقلیم گرم جنوب و معتدل کشور به استثنای جیرفت را به خود اختصاص داد که نشان‌دهنده اهمیت تعیین‌کنندگی این ابرمحیط نسبت به سایر ابر محیطها است. ژنوتیپهای G33، G5، G31، G25 و G26 در مرز بین دو ابرمحیط ۱ و ۲ قرار گرفتند که نشان‌دهنده سازگاری مناسب این ژنوتیپها در اغلب محیطهای مورد بررسی است. ژنوتیپهای G8، G11 و G10 در رأس قرار داشتند اما در هیچ یک از ابر محیطها قرار نگرفتند که نشان‌دهنده عملکرد کم این ژنوتیپها در تمامی محیطها است و به‌عنوان ضعیف‌ترین ژنوتیپهای مورد بررسی در قیاس با سایر ژنوتیپها بودند. در این بین، ژنوتیپ G11 دورترین و ضعیف‌ترین ژنوتیپ شناخته شد. این ژنوتیپها کمترین مقدار عملکرد دانه در واحد سطح را داشتند و دلیل عدم قرارگیری این ژنوتیپها به‌عنوان اکوتیپهای مناسب در تمامی محیطها می‌تواند به همین خاطر باشد. شیخ و همکاران (Sheikh *et al.*, 2022)، قلی‌زاده و خدادادی (Gholizadeh &

تعیین ژنوتیپهای پایدار با استفاده از تجزیه GGE-Biplot

نتایج حاصل از تجزیه GGE-Biplot نشان دادند که مؤلفه اصلی اول (۳۳ درصد) و مؤلفه اصلی دوم (۳۲ درصد) در مجموع ۶۵ درصد از واریانس برهم‌کنش ژنوتیپ در محیط را توجیه نمودند (شکل ۲). درصد تغییرات توجیه‌شده توسط دو مؤلفه اول نشان‌دهنده پیچیدگی اثر متقابل ژنوتیپ × محیط است و در چنین شرایطی استفاده از روشهای چندمتغیره بر مبنای دو مؤلفه اول و به‌منظور بررسی اثرات متقابل ژنوتیپ × محیط کارآمد خواهد بود (Yan WeiKai & Hunt, 2002). یان و کانگ (Yan & Rajcan, 2002) گزارش کرده‌اند که روش GGE بای‌پلات در صورتی برای ارزیابی محیطهای کلان مفید و کاربردی است که دو مؤلفه اول در مجموع بالای ۶۰ درصد تغییرات را توجیه کرده باشند (Yan WeiKai & Hunt, 2002). در این مطالعه، با توجه به درصد بالای تغییرات توجیه‌شده توسط دو مؤلفه اول GGE بای‌پلات، نتایج به‌دست آمده می‌توانند مبنای قضاوت برای انتخاب ژنوتیپهای پایدار باشند و گروه‌بندی ژنوتیپها و محیطها روی مقادیر این مؤلفه‌ها انجام شد. در مطالعات انجام شده روی بررسی پایداری ژنوتیپهای محصولاتی چون کلزا، باقلا، زیره سبز، گشنیز، سیر و سویا هم با استفاده از GGE بای‌پلات، درصد واریانس توجیه شده بین ۷۵ تا ۹۴ درصد گزارش شده است (Alavi-Siney *et al.*, 2024; Amiri Oghan *et al.*, 2019; Mengistu *et al.*, 2023; Mortazavian *et al.*, 2018; Sabaghnia *et al.*, 2008; Gholizadeh & Khodadadi, 2023; Sheikh *et al.*, 2022; Masoudi *et al.*, 2024). در این تحقیق، برای شناسایی ابرمحیطها و ژنوتیپهای برتر از نمودار چندضلعی استفاده شد (شکل ۳). در نمودار چندضلعی GGE بای‌پلات ژنوتیپهایی که حداکثر فاصله را از مبدأ دارند یا ژنوتیپهایی که در رأس اضلاع قرار دارند به یکدیگر متصل و یک چندوجهی ایجاد می‌شود؛ سپس، از مبدأ مختصات خطی

برای انتخاب ژنوتیپ‌های برتر و تعیین پایداری در محصولات مختلف مانند گندم نان (Akan & Akcura, 2018)، کلزا (Amiri Oghan *et al.*, 2019; Pourdard & Moghaddam, 2014)، ذرت (Božović *et al.*, 2018)، آفتابگردان (Pourdad & Moghaddam, 2013)، بادام زمینی (Donoso-Nanculao *et al.*, 2019)، برنج (Jahanzaib *et al.*, 2019)، سویا (Masoudi *et al.*, 2016)، لوبیا (Firew *et al.*, 2019)، گشنیز (Gholizadeh & Khodadadi, 2024)، و باقلا (Sheikh *et al.*, 2022) استفاده شده است.

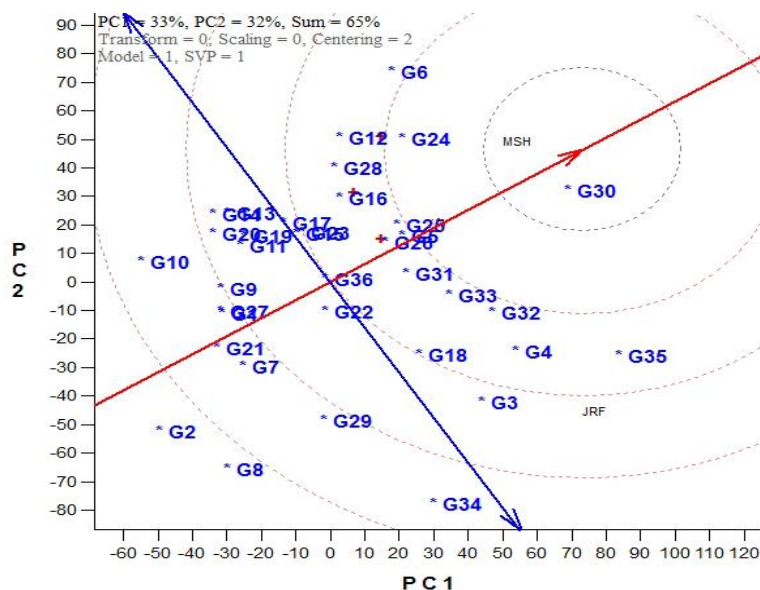
(Khodadadi, 2023) و مینجیستو و همکاران (Mengistu *et al.*, 2023) نیز پس از مطالعه عملکرد دانه نه ژنوتیپ باقلا، شش ژنوتیپ گشنیز و ۱۳ ژنوتیپ سیر در محیط‌های چندتایی مختلف در نتایج‌شان به شناسایی محیط‌های کلان اشاره کردند که ژنوتیپ‌های متفاوتی در این محیط‌ها، برتر بودند و این در تطابق با نتایج این آزمایش است. یکی از کاربردهای مهم GGE بای‌پلات، تعیین ژنوتیپ‌های برتر برای یک محیط اختصاصی است (Yan & Rajcan, 2002; Yan WeiKai & Hunt, 2002). این روش در موارد متعددی توسط محققان



شکل ۲- تعیین ژنوتیپ‌های برتر در ابرمحیط‌های مختلف با استفاده از نمودار چندضلعی (GGE بای‌پلات) بر اساس عملکرد دانه
Figure 2. Determination of superior genotypes in different hyper-environments by using the polygonal diagram (GGE biplot) based on grain yield.

آن، ژنوتیپ‌های G6, G26, G5, G31, G24, G32 و G33 کمترین فاصله را از ژنوتیپ آرمانی فرضی دارند و دارای میانگین و پایداری عملکرد بالایی هستند، و به‌عنوان برترین ژنوتیپ‌ها شناخته شدند (Yan & Rajcan, 2002). در مقابل، ژنوتیپ‌های G29 و G34، G7، G21، G10، G2، G8، بیشترین فاصله را از ژنوتیپ آرمانی فرضی داشتند و به‌عنوان ژنوتیپ‌های نامطلوب در این مطالعه بودند. ژنوتیپ‌های برتر در درجه اول برای کشت در طیف گسترده‌تری از شرایط محیطی و در درجه دوم به‌عنوان والد در برنامه‌های به‌نژادی برای بهبود همزمان سازگاری و عملکرد می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند (Sheikh *et al.*, 2022). مقایسه ژنوتیپ‌ها با ژنوتیپ ایده‌آل فرضی برای محصولات زراعی مختلف توسط فایری و همکاران (Firew *et al.*, 2019) در لوبیا سفید، شیخ و همکاران (Sheikh *et al.*, 2022) در باقلا و جعفری و فرشاد فر (Jafari & Farshadfar, 2018) در گندم نان و گشنیز (Gholizadeh & Khodadadi, 2022) با استفاده از روش GGE-Biplot گزارش شده است.

برای تعیین فاصله ژنوتیپ‌ها از ژنوتیپ آرمانی فرضی (مرکز دوایر متحدالمرکز) از نمودار ژنوتیپ آرمانی استفاده شد (شکل ۳). کاربرد دیگر روش GGE بای‌پلات، مقایسه کلیه ژنوتیپ‌ها با یک ژنوتیپ ایده‌آل است (شکل ۳). ژنوتیپی که در مرکز دوایر متحدالمرکز قرار دارد، ژنوتیپی است که در همه محیط‌ها بالاترین عملکرد را دارد و مطلقاً پایدار است (Yan & Rajcan, 2002). اگرچه در عمل چنین ژنوتیپی وجود ندارد، اما می‌تواند به‌عنوان یک مرجع برای ارزیابی ژنوتیپ‌ها استفاده شود. بر اساس گزارش یان و کانگ (Yan & Rajcan, 2002)، ژنوتیپی به‌عنوان ژنوتیپ آرمانی فرضی است که رتبه PC1 آن بالا (قابلیت تولید عملکرد بالا در تمام محیط‌ها) و رتبه PC2 آن کوچک یا صفر (پایداری عملکرد بالا در تمام محیط‌ها) باشد. بنابراین هر ژنوتیپی که نزدیک‌ترین فاصله را از این ژنوتیپ فرضی داشته باشد به‌عنوان یک ژنوتیپ برتر محسوب می‌شود (Yan WeiKai & Hunt, 2002). در شکل ۳، ژنوتیپ G30 کمترین فاصله را از ژنوتیپ ایده‌آل فرضی دارد و بنابراین به‌عنوان مناسب‌ترین ژنوتیپ در این مطالعه شناسایی شد. بعد از

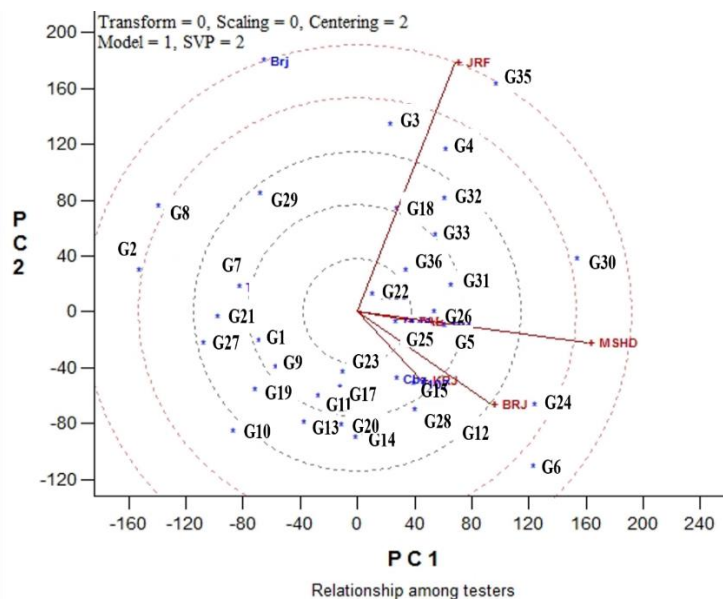


شکل ۳- رتبه‌بندی و مقایسه ژنوتیپ‌ها با ژنوتیپ آرمانی بر اساس خصوصیات پایداری و عملکرد دانه ژنوتیپ‌ها با استفاده از تجزیه گرافیکی GGE بای پلات

Figure 3. Ranking and comparing genotypes with the ideal genotype based on the stability and grain yield characteristics of the genotypes by using GGE biplot graphical analysis

برخوردار است و کم‌ترین زاویه را با بردار افقی دارد، بیشترین تنوع را در محیط‌ها نشان داده است و بیانگر توانایی تمایز خوب و نیز قدرت نمایندگی بیشتر است که به عنوان محیط مطلوب جهت گزینش ژنوتیپ‌های برتر معرفی می‌شود. طول بردار هر محیط، انحراف معیار درونی آن را نشان می‌دهد و این انحراف معیار توانایی تمایز محیط را نشان می‌دهد (Donoso-Nanculao *et al.*, 2016; Farshadfar, 2013). بعد از محیط مشهد، محیط‌های بیرجند و کرج در رتبه‌بندی بعدی قرار دارند. هیل و کبد (Haile & Kebede, 2021) و شیخ و همکاران (Sheikh *et al.*, 2022) در باقلا و قلی‌زاده و خدادادی (Gholizadeh & Khodadadi, 2023) در گشنیز از این روش برای میزان بیانگری یا نمایندگی محیط آزمایشی از محیط کلان استفاده نمودند.

کسینوس زاویه بین بردارهای دو محیط، ضریب همبستگی بین آن‌ها را نشان می‌دهد (Farshadfar, 2013); زاویه کوچک‌تر بین دو بردار به معنای همبستگی مثبت و بالای بین آن‌ها است. با استفاده از نتایج این نمودار می‌توان محیط‌های مشابه و یا نزدیک به هم را شناسایی کرد. با حذف محیط‌های مشابه در آزمایش‌های بعدی در وقت و هزینه صرفه‌جویی خواهد شد و کارایی افزایش خواهد یافت (Yan & Rajcan, 2002). در این بررسی بین محیط‌های مشهد و زابل همبستگی بالایی وجود دارد؛ به عبارتی، محیط زابل مشابه محیط مشهد است و اطلاعات بسیار بیشتری از آن در محیط مشهد قابل استنباط است؛ لذا به منظور صرفه‌جویی در وقت، زمان و هزینه‌ها محیط زابل برای انجام بررسی‌ها می‌تواند حذف شود. در این بررسی، محیط مشهد نزدیک‌ترین محیط به محیط ایده‌آل فرضی است (شکل ۴) و به دلیل این که از طول بردار بلند



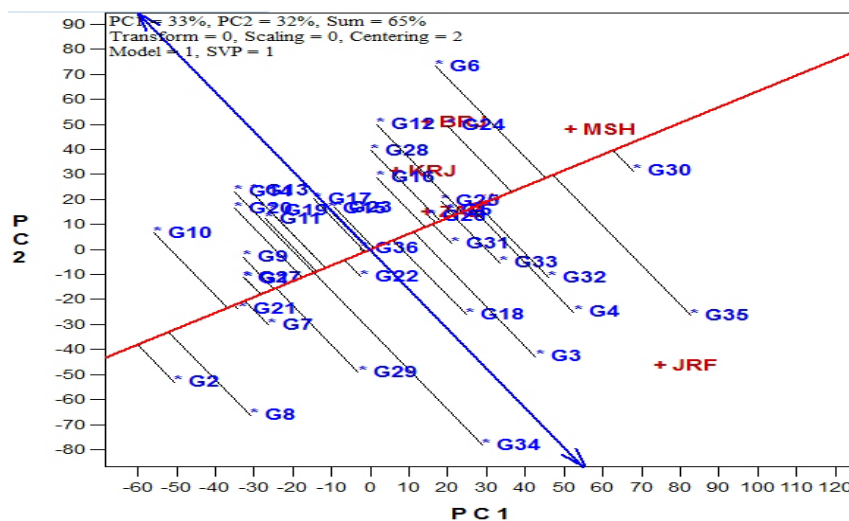
شکل ۴- نمودار بای‌پلات برای بررسی روابط بین محیط‌های مورد مطالعه با محیط ایده‌آل
Figure 4. The biplot diagram to study the relationships between environments with the ideal environment

G10، G21، و G7 به ترتیب با قرار گرفتن در انتهای محور افقی کم‌ترین مقدار عملکرد دانه را دارا بودند (شکل ۵). همچنین، محور افقی بیانگر پایداری است و هر ژنوتیپی که به این محور نزدیک باشد، پایدارتر است (Sheikh *et al.*, 2022; Yan WeiKai & Kang, 2003).

بر اساس نتایج، ژنوتیپ‌های G5، G31، G26، و G30 که در فاصله کمتری از محور افقی قرار گرفته‌اند پایدارترین ژنوتیپ‌ها بودند در انتخاب ژنوتیپ برتر تنها پایداری عملکرد مورد نظر نیست و باید هر دو مقوله پایداری و عملکرد را در نظر گرفت (Yan & Rajcan, 2002; Yan WeiKai & Kang, 2003). زیرا که در این حالت ممکن است ژنوتیپ‌هایی با عملکرد بالا و با پایداری نسبتاً مناسب که سبب افزایش تولید در یک محیط خاص خواهند شد نادیده گرفته شوند؛ بنابراین، کارایی عملکرد، دو مفهوم میانگین عملکرد و پایداری را در بر دارد. با این ملاحظات و با در نظر گرفتن هر دو مقوله پایداری و عملکرد، ژنوتیپ‌های G30، G6، و G35 با داشتن ویژگی پایداری و عملکرد بالا می‌توانند به‌عنوان ژنوتیپ مطلوب در نظر گرفته شوند (شکل ۵). از نمودار مختصات محیط متوسط AEC به‌منظور شناسایی ژنوتیپ‌های پایدار و پرمحصول در باقلا (Sheikh *et al.*, 2022; Mortazavian *et al.*, 2018)، زیره سبز (Mengistu *et al.*, 2023) و گندم نان (Jafari & Farshadfar, 2018) نیز استفاده شده است.

میانگین عملکرد و پایداری

با استفاده از نمودار بای‌پلات مختصات آزمونگر متوسط (Average Tester Coordinate)، امکان ارزیابی توأم پایداری و عملکرد در بای‌پلات وجود دارد (Yan *et al.*, 2001). این روش از جمله روش‌های مفید تجزیه پایداری است که اطلاعات مفیدی را از نحوه تظاهر ژنوتیپ‌های مورد بررسی ارائه می‌دهد. لذا در این مطالعه، از نمودار بای‌پلات مختصات آزمونگر متوسط (ATC) جهت بررسی همزمان عملکرد و پایداری ژنوتیپ‌ها استفاده گردید (شکل ۵). محور افقی مختصات آزمونگر متوسط از مبدأ مختصات و محیط میانگین عبور می‌کند و فلش جهت مثبت محور افقی مختصات آزمونگر متوسط را نشان می‌دهد که نشان دهنده میانگین عملکرد بالاتر است. محل قطع محور افقی مختصات توسط محور عمودی مختصات آزمونگر نشان دهنده متوسط عملکرد ژنوتیپ‌ها است و بر این اساس، ژنوتیپ‌هایی که در سمت راست محور عمودی قرار دارند دارای عملکرد بالاتر از میانگین عملکرد کل و ژنوتیپ‌هایی که در سمت چپ محور قرار دارند دارای عملکرد پایین‌تر از میانگین عملکرد کل هستند. محور افقی نشان‌دهنده عملکرد ژنوتیپ‌ها و محور عمودی برآوردی از برهم‌کنش ژنوتیپ \times محیط هر ژنوتیپ هستند (Farshadfar, 2013). فاصله کمتر از محور افقی نشانگر پایداری ژنوتیپ است (Sheikh *et al.*, 2022; Yan WeiKai & Kang, 2003). نتایج بای‌پلات مختصات محیط نشان دادند که ژنوتیپ‌های G30، G35، G6، و G24، و G33 بالاترین عملکرد دانه را داشتند و ژنوتیپ‌های G8، G2،



شکل ۵- نمایش بای پلات میانگین مختصات تستر برای گزینش همزمان عملکرد و پایداری در ژنوتیپ‌های زیره
Figure 5. Biplot view of Average tester coordinate for simultaneous selection of yield and stability in cumin genotypes

از ژنوتیپ آرمانی فرضی داشتند. لذا از نظر هر دو عامل میانگین عملکرد و پایداری، بهتر از سایر ژنوتیپ‌ها بودند و سازگاری عمومی بالایی در محیط‌های مورد مطالعه داشتند. همچنین بر اساس نتایج نمودار بای پلات محیط ایده‌آل، محیط مشهد بیشترین تمایز و بیانگری را نشان داد و برای انجام بررسی‌های مقایسه ژنوتیپ‌های زیره سبز به عنوان مناسب‌ترین محیط تشخیص داده شد. بر اساس نتایج کلی، ژنوتیپ‌های G6، G30، G5، G26 و G35 به دلیل دارا بودن عملکرد دانه بالاتر، پایداری در عملکرد و دارا بودن سازگاری عمومی و خصوصی به عنوان گزینه‌های انتخابی مناسب و ایده‌آل زیره سبز در مناطق مشخص شدند و می‌توانند جهت معرفی در فرایند معرفی رقم و ارزیابی در شرایط زارعی مورد استفاده قرار گیرند.

تشکر و قدردانی

این مقاله مستخرج از پروژه تحقیقاتی خاص به شماره قرارداد ۱۱۰۸/ح ق/۱۴۰۲ مورخ ۱۴۰۲/۵/۴ است که از سوی صندوق نوآوری و شکوفایی معاونت علمی ریاست جمهوری حمایت مالی آن در راستای تحقیق و توسعه شرکت های دانش بنیان صورت گرفته است. به این وسیله از مدیریت و همکاران محترم صندوق نوآوری و شکوفایی و همچنین مساعدت‌های بی‌دریغ عوامل مدیریتی موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر تشکر و قدردانی می‌گردد.

References

- Agarwal, U., Pathak, D. P., Kapoor, G., Bhutani, R., Roper, R., Gupta, V., & Kant, R. (2017). Review on *Cuminum Cyminum*—nature's magical seeds. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*, 9(9), 180-187.
- Ahuja, A., & Mathpal, D. (2022). A Review on Health Benefits of *Cuminum Cyminum* (Cumin). *International Journal of Innovative Research in Engineering & Management*, 9(1), 93-97.
- Akan, K., & Akcura, M. (2018). GGE biplot analysis of reactions of bread wheat pure lines selected from central anatolian landraces of Turkey to leaf rust disease (*Puccinia triticina*) in multiple location-years. *Cereal Research Communications*, 46(2), 311-320.
- Alavi-Siney, S. M., Yoneszadeh, R., Abasi, A., Aien, A., & Fanaei, H. (2024). The Stability of Seed Yield in Cumin Ecotypes in Different Planting Dates Using Multivariate Methods. *Journal of Crop Breeding*, 16(2), 80-92. [In Persian]

نتیجه‌گیری کلی

از آنجائی که در ایران از توده‌های محلی زیره سبز استفاده می‌شود و این توده‌های محلی از نظر کمی و کیفی بسیار متفاوت هستند، در راستای تولید و معرفی واریته اصلاح شده‌ی برتر از توده‌های بومی ضمن لزوم آگاهی از تنوع ژنتیکی و صفات مطلوب موجود در زیره سبز، شناخت و بررسی اثرات متقابل ژنوتیپ و محیط و پایداری تولید با توجه به تنوع شرایط آب و هوایی مناطق مختلف حائز اهمیت است. استفاده از روش‌های چندمتغیره برای بررسی اثر متقابل ژنوتیپ × محیط یک راهکار قوی و مناسب است. بر اساس مدل برهم‌کنش ژنوتیپ × محیط و تجزیه GGE-Biplot، حدود ۶۵ درصد از تغییرات اثر متقابل توسط دو مؤلفه اول توجیه گردید. بر اساس نتایج حاصل از روش GGE بای پلات، اطلاعات خوبی در مورد ژنوتیپ‌ها و محیط‌های مورد مطالعه در این پژوهش به دست آمد. ژنوتیپ‌های G6 و G30 برای کرج، مشهد، بیرجند و زابل، و ژنوتیپ G35 با عملکرد دانه بیشتر دارای سازگاری خصوصی بالا به این محیط‌ها بودند. محیط کلان ۱ به دلیل تجمع و پوشش دادن محیط‌های گرم جنوب و معتدل کشور در آن، به‌عنوان مهم‌ترین ابرمحیط مشخص شد. بر اساس بای پلات ژنوتیپ ایده‌آل فرضی نیز ژنوتیپ G30 و بعد از آن ژنوتیپ‌های G24، G31، G5، G6، G26، G33، G32 و کمترین فاصله را

- Alizadeh, A., Tavousi, M., Inanlou, M., & Nasiri, M.M. (2005). Effect of irrigation regimes on yield and yield components of Cumin. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 2(3), 35-42. [In Persian]
- Amiri Oghan, H., Zeinalzadeh-Tabrizi, H., Fanaei, H. R., Kazerani, N. K., Ghodrati, G., Danaie, A., & Valipour, M. B. (2019). Investigation of Stability of Seed Yield in Promising Lines of Spring Oilseed Rape in Southern warm Regions of Iran. *Journal of Crop Breeding*, 11(31), 42-54. <https://doi.org/10.29252/jcb.11.31.42>. [In Persian]
- Azizi, N., & Mirmiran, S. M. (2023). Investigation of the Agromorphological Diversity of some Iranian Stands of Cumin (*Cuminum cyminum* L.) under Climatic Conditions of Mashhad. *Journal of Crop Breeding*, 15(47), 21-29. <https://doi.org/10.61186/jcb.15.47.21>. [In Persian]
- Belay, F., Tekle, G., & Chernet, S. (2020). Evaluation of genotype environment interaction effect on performance of garlic (*Allium sativum* L.) genotypes in Tigray region, Northern Ethiopia using AMMI and GGE biplot analysis. *African Journal of Agricultural Research*, 16(5), 691-701.
- Bharti, R., Kumar, S., & Parekh, M. J. (2018). Development of genomic simple sequence repeat (gSSR) markers in cumin and their application in diversity analyses and cross-transferability. *Industrial Crops and Products*, 111, 158-164.
- Božović, D., Živanović, T., Popović, V., Tatić, M., Gospavić, Z., Miloradović, Z., Stanković, G., & Đokić, M. (2018). Assessment stability of maize lines yield by GGE-biplot analysis. *Genetika*, 50(3), 755-770.
- Chaubey, B. K., Yadav, C. B., Mishra, V., & Kumar, K. R. (2012). Genetic divergence analysis in faba bean (*Vicia faba* L.). *Trends in Biosciences*, 5, 64-67.
- Cruz, C. D. (2013). Genes: a software package for analysis in experimental statistics and quantitative genetics. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 35, 271-276.
- Donoso-Nanculao, G., Paredes, M., Becerra, V., Arrepol, C., & Balzarini, M. (2016). GGE biplot analysis of multi-environment yield trials of rice produced in a temperate climate. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 76(2), 152-157.
- Falconer, D. (1981). Introduction to quantitative genetics.
- Farshadfar, E. (2013). Simultaneous selection of yield and yield stability in chickpea genotypes using the GGE biplot technique. *Acta Agronomica Hungarica*, 61(3), 185-194. <https://doi.org/https://doi.org/10.1556/AAgr.61.2013.3.2>
- Firew, A. M., Amsalu, B., & Tsegaye, D. (2019). Additive main effects and multiplicative interaction (AMMI) and genotype main effect and genotype by environment interaction (GGE) biplot analysis of large white bean (*Phaseolus vulgaris* L.) genotypes across environments in Ethiopia. *African Journal of Agricultural Research*, 14(35), 2135-2145.
- Ghazvini, H., Marandi, M., & Amini Sefidab, A. (2019). Evaluation of Grain Yield Stability and Genetic Variation in Salt-Tolerant Bread Wheat Promising Lines and Cultivars. *Seed and Plant Journal*, 35(1), 1-25. <https://doi.org/10.22092/spij.2019.123759.1074>
- Gholizadeh, A., & Khodadadi, M. (2023). Graphic analysis of genotype, environment and genotype × environment interaction for oil yield in coriander. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 16(2), 277-289. [In Persian]
- Gondaliya, S., Khatrani, T., Soni, K., & Baravalia, Y. K. (2018). Consequence on long term storage on phytochemical attributes of cumin (*Cuminum cyminum*, L.) from districts of north Gujarat, India. *Industrial Crops and Products*, 111, 908-913.
- Greveniotis, V., Bouloumpasi, E., Zotis, S., Korkovelos, A., Kantas, D., & Constantinos G. (2023). Genotype-by-environment interaction analysis for quantity and quality traits in faba beans using AMMI, GGE models, and stability indices. *Plants*, 12(21), 3769
- Haile, G. A., & Kebede, G. Y. (2021). Identification of stable faba bean (*Vicia faba* L.) genotypes for seed yield in Ethiopia using GGE model. *Journal of Plant Sciences*, 9, 163-169.
- Jafari, T., & Farshadfar, E. (2018). Stability analysis of bread wheat genotypes (*Triticum aestivum* L.) by GGE biplot. *Cereal Research*, 8(2), 199-208. <https://doi.org/10.22124/c.2018.6232.1243>
- Jahanzaib, M., Nawaz, N., Khurshid, H., Jan, S. A., Arshad, M., & Hassan, I. (2019). Estimating genotype × environment interaction for groundnut seed yield across different ecological zones. *International Journal of Agriculture & Biology*, 139-145.
- Kanani, P., Shukla, Y. M., Modi, A. R., Subhash, N., & Kumar, S. (2019). Standardization of an efficient protocol for isolation of RNA from *Cuminum cyminum*. *Journal of King Saud University-Science*, 31(4), 1202-1207.
- Lim, T., & Lim, T. (2012). *Myrciaria dubia*. *Edible Medicinal And Non Medicinal Plants: Volume 3, Fruits*, 631-638.
- Masoudi, B., Gholizadeh, A., Majidian, P., Hezarjaribi, E., Razmi, N., & Shariati, F. (2024). A Study on the Genotype × Environment Interaction in Promising Advanced Genotypes of Soybean using Graphical GGE-biplot Analysis. *Journal of Crop Breeding*, 16(4), 77-88. DOI: 10.61186/jcb.16.4.77 [In Persian]
- Mardeh, A. S.-S., Ahmadi, A., Poustini, K., & Mohammadi, V. (2006). Evaluation of drought resistance indices under various environmental conditions. *Field Crops Research*, 98(2-3), 222-229.
- Mengistu, F. G., Mossie, G. A., & Fita, G. T. (2023). Evaluation of garlic genotypes for yield performance and stability using GGE biplot analysis and genotype by environment interaction. *Plant Genetic Resources*, 21(6), 490-496.

- Mortazavian, S., Nikkhah, H., Hassani, F., Sharif-al-Hosseini, M., Taheri, M., & Mahlooji, M. (2014). GGE biplot and AMMI analysis of yield performance of barley genotypes across different environments in Iran. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 16(3), 609-622.
- Mortazavian, S. M. M., Safari, B., Sadat Noori, S. A., & Foghi, B. (2018). Evaluation of Diverse Cumin (*Cuminum cyminum* L.) Ecotypes for Seed Yield under Normal and Water Stress Condition. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 20(2), 359-372. <http://jast.modares.ac.ir/article-23-10845-en.html>
- Motamedi, J., Jalili, A., Khodaghohi, M., KhalifehZadeh, R., & Arzani, H. (2022). The need to pay serious attention to "drylands" in the production of fodder and medicinal plants. *Iranian Nature*, 6(6), 7-24.
- Mozafarian, V. (2016). Flora of Iran, *Umbelliferae* family. 600. (Research institute, forests and pastures of the Iran country)
- Nazarian, H., Amoui, AM & Gholampourftideh, F. (2014). Cumin production entrepreneurship package. 97. (Asrar Alam)
- Nirmala, M. J., Durai, L., Rao, K. A., & Nagarajan, R. (2020). Ultrasonic nanoemulsification of Cuminum cyminum essential oil and its applications in medicine. *International Journal of Nanomedicine*, 795-807.
- Pourdad, S. S., & Moghaddam, M. J. (2013). Study on seed yield stability of sunflower inbred lines through GGE biplot. *Helia*, 36(58), 19-28.
- Pourdad, S. S., & Moghaddam, M. J. (2014). 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(12), 1-14. <http://jcb.sanru.ac.ir/article-1-212-fa.html> [In Persian]
- Sabaghnia, N., Dehghani, H., & Sabaghpour, S. H. (2008). Graphic analysis of genotype by environment interaction for lentil yield in Iran. *Agronomy Journal*, 100(3), 760-764.
- Sawargaonkar, S., Saxena, K., Madrap, I., & Rathore, A. (2011). Stability analysis of yield and related traits in pigeonpea hybrids. *Journal of Food Legumes*, 24(3), 184-193.
- Sheikh, F., & Feyzbakhsh, M. (2019). Faba bean handbook. Golestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center. *Agricultural Research, Education and Extension Organization*. [In Persian]
- Sheikh, F., Nazari, H., & Fanaii, H. (2022). Graphic analysis of trait relations and stability of faba bean genotypes using the biplot method. *Journal of Crop Production*, 15(2), fa117-fa135
- Sheikh, F., Sekhavat, R., Asteraki, H., Parkasi, A., & Aghajani, M. (2021). Evaluation of seed yield stability of faba bean (*Vicia faba* L.) genotypes using GGE biplot analysis. *Isfahan University of Technology- Journal of Crop Production and Processing*, 11(3), 85-99.
- Singh, R., Dubey, B., & Gupta, R. (2016). Genotype x environment interaction and stability analysis for yield and its attributes in garlic (*Allium sativum* L.). *Journal of Spices & Aromatic Crops*, 25(2).
- Singh, R. P., Gangadharappa, H., & Mruthunjaya, K. (2017). Cuminum cyminum—A popular spice: An updated review. *Pharmacognosy Journal*, 9(3).
- Yan, W., Cornelius, P. L., Crossa, J., & Hunt, L. (2001). Two types of GGE biplots for analyzing multi-environment trial data. *Crop Science*, 41(3), 656-663.
- Yan, W., Kang, M. S., Ma, B., Woods, S., & Cornelius, P. L. (2007). GGE biplot vs. AMMI analysis of genotype-by-environment data. *Crop Science*, 47(2), 643-653.
- Yan, W., & Rajcan, I. (2002). Biplot analysis of test sites and trait relations of soybean in Ontario. *Crop Science*, 42(1), 11-20.
- Yan WeiKai, Y. W., & Hunt, L. (2002). Biplot analysis of multi-environment trial data. In *Quantitative genetics, genomics and plant breeding* (pp. 289-303). CABI Publishing Wallingford UK.
- Yan WeiKai, Y. W., & Kang, M. (2003). GGE biplot analysis: a graphical tool for breeders, geneticists, and agronomists.
- Zelege, A., & Berhanu, F. (2016). AMMI and GGE models analysis of stability and GEI of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) lines in Ethiopia. *Journal of Biology, Agriculture and Healthcare*, 6(9), 127-135.