

Evaluation of the stability of cumin genotypes in terms of qualitative traits using multivariate statistical methods

Hamid Reza Fanaei ^a, Seid Mohammad Alavi-Siney ^{*b}, Behzad Sorkhi Laleloo ^a, Majid Reza Kiani Freez ^c, Ali Eftekhari ^d, Abolfazl Moradgholi ^e, Manni Marefatzadeh-Khameneh ^c, Hossein Akbari Moghadam ^e

^a Seed and Plant Improvement Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran

^b Crop and Horticultural Science Research Department, Southern Kerman Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Jiroft, Iran

^c Horticulture-Crops Research Department, Khorasan Razavy Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Mashhad, Iran

^d Horticulture-Crops Research Department, South Khorasan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Birjand, Iran

^e Horticulture-Crops Research Department, Sistan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Zabol, Iran

*Corresponding Author: M.alavis@areeo.ac.ir

Received: 20 April 2025

Accepted: 3 June 2025

DOI: 10.22034/CSRAR.2025.517793.1482

How to cite this article:

Fanaei, H.R., Alavi-Siney, S.M., Sorkhi Laleloo, B., Kiani Freez, M.R., Eftekhari, A., Moradgholi, A., Marefatzadeh-Khameneh, M. and Akbari Moghadam, H., 2026. Evaluation of the stability of cumin genotypes in terms of qualitative traits using multivariate statistical methods. *Crop Science Research in Arid Regions*, 8(1), 117-130. <https://doi.org/10.22034/CSRAR.2025.517793.1482>

Abstract

Introduction: Cumin (*Cuminum cyminum* L.), belonging to the family Apiaceae, is one of the most well-known aromatic spices in the world. Iran is also one of the leading producers of cumin globally, but no improved cultivar has yet been introduced to farmers in the country. To introduce new cumin cultivars, it is essential to understand genetic diversity, desirable traits, genotype-environment interactions, and production stability, given the varied climatic conditions across regions. When genotypes are evaluated in different environments, their performance compared to each other varies across environments. A genotype may exhibit the highest yield in some environments, while other genotypes may outperform it in other environments. This variation in the relative performance of genotypes across different environments is referred to as genotype-by-environment interaction (G×E). G×E interaction is a critical issue in plant breeding and plays a significant role in the release and introduction of improved genotypes. The objective of this study was to analyze G×E interactions using AMMI (Additive Main Effects and Multiplicative Interaction) and GGE (Genotype + Genotype-by-Environment) biplot methods to evaluate genotypes, environments, and their relationships, ultimately identifying ideal cumin genotypes with high essential oil percentage and essential oil yield.



Materials and Methods: To assess the stability of essential oil percentage and essential oil yield in 36 cumin genotypes, an experiment was conducted in a randomized complete block design (RCBD) with three replications at four agricultural research stations (Jiroft, Mashhad, Birjand, and Karaj) during the 2022-2023 growing season. Seeds of each genotype were sown on two ridges, with two rows per ridge (each 3 meters long, totaling 4 rows), and a row spacing of 20 cm. At the end of the growing season, plants were harvested at maturity, dried, threshed, and the seeds were separated from the straw. The essential oil percentage was measured using a Clevenger apparatus, and the essential oil yield was calculated by multiplying the seed yield per unit area by the essential oil percentage.

After verifying the assumptions of ANOVA, AMMI, and GGE biplot analyses were performed for essential oil percentage and essential oil yield using GenStat software (Version 12).

Results and Discussion: The results of the combined analysis of variance for the four locations indicated that the effects of environment, genotype, and genotype $\times$ environment interaction were highly significant (at the 1% probability level) for both essential oil percentage and essential oil yield traits. Due to the significance of the genotype $\times$ environment interaction, the interaction effect was analyzed using AMMI and GGE biplot methods. The genotype $\times$ environment interaction analysis revealed that, regarding essential oil percentage, genotype No. 17 exhibited high specific adaptability to Birjand and Jiroft environments. Additionally, genotypes No. 27 and 11 showed high specific adaptability to Karaj and Mashhad regions, respectively. For essential oil yield, genotype No. 27 demonstrated high specific adaptability to the Karaj region, while genotypes No. 3 and 4 were most suitable for the Jiroft region, and genotype No. 30 performed optimally in the Mashhad and Birjand regions. Based on the GGE biplot analysis, genotypes No. 22, 25, 31, and 10 were identified as ideal genotypes for essential oil percentage. For essential oil yield, genotypes No. 30 and 25 were the closest to the ideal genotype. These genotypes can be recommended as parental lines in breeding programs or as superior cultivars for farmers. Given the importance of cumin in medicinal and spice applications, it is essential to have both high yield and high essential oil percentage. The genotypes with the highest essential oil yield possessed both characteristics. Therefore, genotypes No. 30 and 25 were identified as the most ideal genotypes and can be utilized as parents in breeding programs or introduced as new cultivars.

Conclusion: The results of this study demonstrated that genotypes No. 22, 25, 31, and 10 were the most ideal for essential oil percentage. For essential oil yield, genotypes No. 30 and 25 were the closest to the ideal genotype. Considering the significance of cumin in medicinal and spice uses, which requires high yield and high essential oil content, the genotypes with the highest essential oil yield that exhibited both traits were recognized as the most suitable. Thus, genotypes No. 30 and 25 are considered the most ideal genotypes and can be introduced to farmers as stable genotypes with high essential oil percentage and yield. Furthermore, their potential can be effectively exploited as parental lines in breeding programs.

Keywords: AMMI, Essential oil percentage, Essential oil yield, GGE biplot

بررسی پایداری ژنوتیپ‌های زیره سبز از لحاظ صفات کیفی با استفاده از روش‌های آماری چندمتغیره

حمیدرضا فنایی^۱، سید محمد علوی سینی^{۲*}، بهزاد سرخی لله‌لو^۱، مجیدرضا کیانی فریز^۳، علی افتخاری^۴، ابوالقاسم مرادقلی^۵، مانی معرفت‌زاده خامنه^۳، حسین اکبری مقدم^۵

- ۱- مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، سازمان تحقیقات، ترویج و آموزش کشاورزی، کرج، ایران
- ۲- بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی جیرفت، سازمان تحقیقات، ترویج و آموزش کشاورزی، جیرفت، ایران
- ۳- بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی، سازمان تحقیقات، ترویج و آموزش کشاورزی، مشهد، ایران
- ۴- بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان جنوبی، سازمان تحقیقات، ترویج و آموزش کشاورزی، بیرجند، ایران
- ۵- بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی سیستان، سازمان تحقیقات، ترویج و آموزش کشاورزی، زابل، ایران

* مسئول مکاتبه: M.alavis@areeo.ac.ir

DOI: 10.22034/CSRAR.2025.517793.1482

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۱۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۳۱

چکیده

ایران یکی از تولیدکنندگان پیشرو زیره سبز در جهان است، اما تاکنون رقم اصلاح‌شده‌ای در کشور به کشاورزان معرفی نشده است. برای معرفی ارقام جدید زیره سبز بررسی تنوع ژنتیکی و اثرات متقابل ژنوتیپ و محیط و پایداری تولید اهمیت فراوانی دارد. بدین منظور آزمایشی با هدف بررسی پایداری درصد اسانس و عملکرد اسانس ۳۶ ژنوتیپ زیره سبز در ایستگاه‌های تحقیقات کشاورزی چهار منطقه (جیرفت، مشهد، بیرجند و کرج) در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. در این آزمایش صفات درصد اسانس و عملکرد اسانس اندازه‌گیری شدند. نتایج تجزیه AMMI نشان داد، اثر متقابل ژنوتیپ در محیط برای هر دو صفت معنی‌دار و نسبت قابل توجهی از واریانس (درصد اسانس: ۴۵/۶۱، عملکرد اسانس: ۲۳/۳۳) را به خود اختصاص داد. براساس تجزیه GGE بای‌پلات مشخص شد که ژنوتیپ‌های شماره ۲۲، ۲۵، ۳۱ و ۱۰ ژنوتیپ‌های ایده‌آل از لحاظ صفت درصد اسانس می‌باشند. از لحاظ عملکرد اسانس ژنوتیپ‌های شماره ۳۰ و ۲۵ نزدیک‌ترین ژنوتیپ‌ها به ژنوتیپ ایده‌آل بودند. گیاه زیره سبز به‌خاطر مصارف دارویی و ادویه‌ای لازم است در عین عملکرد بالا، درصد اسانس بالایی نیز داشته باشند. در این آزمایش مشخص شد ژنوتیپ‌های دارای بالاترین عملکرد اسانس، از هر دو ویژگی عملکرد و اسانس بالا برخوردارند، بنابراین ژنوتیپ‌های شماره ۳۰ و ۲۵ به‌عنوان ایده‌آل‌ترین ژنوتیپ‌ها مشخص شدند و می‌توان از آن‌ها در برنامه‌های معرفی ارقام و یا در برنامه‌های به‌نژادی به‌عنوان والد استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: درصد اسانس، عملکرد اسانس، GGE بای‌پلات، AMMI

مقدمه

نواحی خشک و نیمه‌خشک جهان از قبیل خاورمیانه، هند و ترکیه گسترش یافته است. در حال حاضر هند، ایران و ترکیه از صادرکنندگان اصلی بذر زیره سبز در جهان هستند. ایران یکی از تولیدکنندگان پیشرو زیره سبز در جهان است (Sowbhagya, 2013). زیره سبز منبع غنی از آهن و منگنز می‌باشد و سرشار از آنتی‌اکسیدان بوده به همین خاطر خواص ضدسرطانی و دارویی فراوانی دارد. این گیاه معطر در سرتاسر

کشور ایران از نظر تعداد و تنوع گیاهان دارویی از مناطق غنی در دنیا می‌باشد. در بین گیاهان دارویی، زیره سبز (*Cuminum Cuminum L.*) از خانواده چتریان (*Apiaceae (Umbelliferae)* یکی از گیاهان معطر و ادویه‌ای شناخته شده در جهان است (Moghaddam and Ghasemi, 2017). منشأ آن نواحی مدیترانه‌ای می‌باشد که به

چگونگی مدیریت مؤثر آنها تکیه می‌شود. پژوهشگران عنوان کرده‌اند، این فرآیند ارزیابی حیاتی، این امکان را می‌دهد تا در انتخاب مناسب‌ترین ژنوتیپ‌ها تصمیم‌گیری شود (Jat et al., 2017). مطالعات پایداری (اثرمتقابل ژنوتیپ× محیط) به ما کمک می‌کند تا ژنوتیپ‌هایی را توصیه کنیم که در تمام محیط‌های آزمایشی عملکرد بهتری دارند (Shiri and Bahrampour, 2015). درک اثرات متقابل ژنوتیپ و محیط برای اصلاح‌کنندگان نباتات جهت انتخاب ژنوتیپ‌های پایدار با عملکرد بالا بسیار مهم است. با مطالعه شرایط مختلف، اصلاح‌کنندگان می‌توانند اطمینان حاصل کنند که ژنوتیپ انتخابی آن‌ها در محیط‌های مختلف عملکرد مطلوبی دارد. مدل‌هایی مانند GGE بای‌پلات یا AMMI به تحلیل این اثرمتقابل کمک می‌کنند و تصمیم‌گیری اصلاح‌کنندگان را تسهیل می‌نمایند (Tahir et al., 2020). در میان روش‌های چندمتغیره، مدل AMMI روش کارآمدی برای حذف خطا به حساب می‌آید و الگوی مناسب داده‌ها را آشکار می‌کند (Yan and Hunt, 2002). روش GGE بای‌پلات با استفاده از نمایش گرافیکی اثرمتقابل ژنوتیپ در محیط، به به‌نژادگر این امکان را می‌دهد که به آسانی پایداری ژنوتیپ‌ها و ترکیب پایداری با عملکرد ژنوتیپ‌ها در محیط‌های مختلف را بررسی کرده و روابط میان محیط‌ها و محیط‌های هدف را در برنامه‌های به‌نژادی شناسایی کرد (Allahgholipour, 2016; Gholizadeh and Khodadadi, 2023). پژوهشگران برای بررسی پایداری عملکرد ژنوتیپ‌ها در محیط‌های مختلف در گیاهان زیره سبز (Alavi-Siney et al., 2024)، گشنیز (Siney et al., 2024)، پنبه (Gholizadeh and Khodadadi, 2023)، چغندر (Hemayati et al., 2024)، گندم (Esmailzadeh et al., 2024)، ذرت (Shiri et al., 2024)، بادمجان (Bagheri et al., 2021) از روش‌های چندمتغیره AMMI و GGE بای‌پلات به‌خوبی بهره برده‌اند.

در پژوهش‌های گذشته بررسی پایداری و گزینش ژنوتیپ‌های ایده‌آل زیره سبز بر مبنای عملکرد دلنه صورت گرفته و از لحاظ صفات کیفی (درصد اسانس و عملکرد اسانس) به این موضوع پرداخته نشده است. هدف از انجام این پژوهش تجزیه اثرمتقابل ژنوتیپ× محیط با استفاده از روش‌های AMMI و GGE بای‌پلات به‌منظور ارزیابی ژنوتیپ‌ها، محیط‌ها و

جهان برای مصارف مختلف آشپزی عموماً به‌عنوان چاشنی در غذاها مورد استفاده قرار می‌گیرد (Parthasarathy et al., 2010; Hajlaoui et al., 2008). علاوه‌بر مصارف دارویی و غذایی در صنایع بهداشتی و آرایشی نیز کاربرد دارد (Gondaliya et al., 2018).

در ایران سطح زیر کشت این گیاه حدود ۳۳ هزار هکتار با تولید ۱۵ هزار تن می‌باشد (MAJ, 2023). زیره سبز عمدتاً در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران از جمله استان‌های خراسان، آذربایجان شرقی، یزد، سمنان، اصفهان گلستان، فارس و کرمان کشت می‌شود (Hashemian et al., 2013; Ghanbari et al., 2017). این گیاه با دوره رشدی کوتاه و تحمل بالا به شرایط کم‌آبی سازگاری مناسبی با مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران پیدا کرده است؛ که در شرایط نامساعد فصلی نیز عملکرد قابل‌قبولی می‌تواند تولید نماید (Alizadeh et al., 2005). علی‌رغم وجود این خصوصیات برجسته زراعی و اکولوژیکی و وجود توده‌های بومی و ژرم‌پلاسم قوی از این گیاه تاکنون رقم اصلاح‌شده‌ای که از لحاظ عملکرد و خصوصیات اسانس برتر از توده‌های بومی باشد به کشاورزان معرفی نشده است. گزارش‌ها نشان می‌دهد توده‌های محلی از نظر کمی و کیفی بسیار متفاوت بوده و دارای خصوصیات متمایز می‌باشند. برای تولید و معرفی ارقام جدید زیره سبز علاوه‌بر آگاهی از تنوع ژنتیکی و صفات مطلوب موجود در زیره سبز، شناخت و بررسی اثرات متقابل ژنوتیپ در محیط و پایداری تولید در شرایط آب‌وهوایی مناطق مختلف اهمیت فراوانی دارد (Alavi-Siney et al., 2024). زمانی که ژنوتیپ‌ها در محیط‌های مختلف ارزیابی می‌شوند، عملکرد آنها در مقایسه با یکدیگر در محیط‌های مختلف یکسان نخواهد بود. ممکن است یک ژنوتیپ در تعدادی از محیط‌ها دارای بالاترین عملکرد باشد ولی در سایر محیط‌ها ژنوتیپ یا ژنوتیپ‌های دیگری برتری داشته باشد. به تغییراتی که در عملکرد نسبی ژنوتیپ‌ها در محیط‌های متفاوت به‌وجود می‌آید، اثرمتقابل ژنوتیپ در محیط گفته می‌شود. اثرمتقابل ژنوتیپ در محیط یکی از مسائل مهم در به‌نژادی گیاهان است که در آزادسازی و معرفی ژنوتیپ‌های اصلاح‌شده دارای اهمیت فراوان است (Jafari and Farshadfar, 2018).

در فرآیند انتخاب ژنوتیپ، عمدتاً به روش‌های آماری برای ارزیابی جنبه‌های مختلف مانند عملکرد، اثرمتقابل با محیط و

روابط ژنوتیپ‌ها و محیط‌ها و در نهایت شناسایی ژنوتیپ‌های ایده‌آل زیره سبز از لحاظ درصد اسانس و عملکرد اسانس بالا بود.

مواد و روش‌ها

مواد گیاهی، محل اجرا و طرح آزمایشی

به‌منظور بررسی پایداری درصد اسانس و عملکرد اسانس ۳۶ ژنوتیپ زیره سبز (جدول ۱) آزمایشی در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در ایستگاه‌های تحقیقات کشاورزی چهار منطقه (جیرفت، مشهد، بیرجند و کرج) در تاریخ کشت مناسب هر منطقه در سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۲ اجرا گردید.

جدول ۱- اطلاعات ژنوتیپ‌های زیره سبز تهیه شده از بانک ژن گیاهی ملی ایران

Table 1- Information of prepared cumin population

منشأ	کد	شماره ژنوتیپ	منشأ	کد	شماره ژنوتیپ	منشأ	کد	شماره ژنوتیپ
Source	Code	Genotype No	Source	Code	Genotype No	Source	Code	Genotype No
تربت جام ۲	TN-146	G25	بیرجند	TN-90	G13	یافق	TN-2	G1
TorbateJam2			Birjand			Bafgh		
IPK2	TN-172	G26	بیرجند	TN-92	G14	خراسان	TN-11	G2
تایباد	TN-28	G27	Birjand			san		
Taybad			کانگان	TN-107	G15	مهریز	TN-15	G3
فردوس	TN-45	G28	Kangan			Mehriz		
Ferdows			سبزواری	TN-118	G16	نائین	TN-17	G4
فردوس	TN-61	G29	Sabzevar			Naein		
Ferdows			تربت جام ۵	TN-119	G17	فردوس	TN-21	G5
قائن	TN-81	G30	TorbateJam5			ws		
Ghaen			تربت جام ۱	TN-123	G18	تایباد	TN-29	G6
بیرجند	TN-91	G31	TorbateJam1			Taybad		
Birjand			فیروزه	TN-131	G19	طبس	TN-35	G7
تایباد	TN-113	G32	Firoozeh			Tabas		
Taybad			خاف	TN-135	G20	طبس	TN-37	G8
اسفراین	TN-125	G33	Khaf			Tabas		
Esfaraiei			جوین	TN-136	G21	سبزواری	TN-53	G9
بیرجند بازاری	TN-150	G34	Jovein			Sabzevar		
BRJ			بشرویه	TN-139	G22	اردکان	TN-78	G10
سبزواری	TN-180	G35	Boshroieh			Ardakan		
Sabzevar			خاف	TN-143	G23	تربت	TN-87	G11
سیستان ۱	TN-181	G36	Khaf			Torbat		
Sistan1			مرودشت	TN-145	G24	بیرجند	TN-88	G12
			Marvdasht			Birjand		

عملیات زراعی و اندازه‌گیری صفات

بذر هر ژنوتیپ روی دو پشته و در هر پشته دو خط به طول سه متر (جمعاً چهار خط) و با فاصله ردیف ۲۰ سانتی‌متر کشت شد. فاصله کرت‌ها یک پشته نکاشت و فاصله تکرارها از هم دو متر در نظر گرفته شد. در مرحله پنچ برگی جهت دستیابی به تراکم ۱۲۰-۱۰۰ بوته در مترمربع تنک با رعایت فاصله ۷-۵ سانتی‌متری بین دو بوته روی خط صورت گرفت. عملیات زراعی شامل آماده‌سازی زمین شامل شخم پاییزه، دیسک، لولر و پخش کودهای پایه قبل از کشت، وجین علف‌های هرز، آبیاری،

تغذیه و مبارزه با آفات و بیماری در زمان مناسب براساس شرایط هر منطقه انجام شد. در هر چهار منطقه، پس از سبزشدن و استقرار گیاهچه‌ها، وجین علف‌های هرز در طی دوره رشد تا رسیدن دانه‌ها به‌صورت دستی انجام شد. در پایان فصل رشد، بوته‌ها در مرحله رسیدگی (۸۰ درصد زرد شدن بوته) برداشت و پس از خشک شدن کامل بوته‌ها اقدام به کوبیدن و جداسازی بذور از کاه و کلش شد. درصد اسانس نمونه‌های زیره سبز با استفاده از دستگاه کلونجر اندازه‌گیری شد (Fanaei et al., 2006). پس از اندازه‌گیری درصد اسانس، عملکرد اسانس

نتایج و بحث

قبل از انجام تجزیه واریانس مرکب، همگنی واریانس خطاهای آزمایشی با استفاده از آزمون بارتلت ارزیابی شد و با توجه به برقراری فرض صفر مبنی بر یکنواختی واریانس خطاهای آزمایشی، تجزیه واریانس مرکب برای چهار محیط انجام شد. تجزیه واریانس مدل AMMI برای صفت درصد اسانس نشان داد اختلاف بین ژنوتیپها و محیط (اثرهای جمع پذیر) و اثر متقابل ژنوتیپ در محیط از لحاظ درصد اسانس معنی دار بود. در پژوهش دیگری نیز اثر ژنوتیپ بر درصد اسانس زیره سبز را معنی دار گزارش شد (Alavi-Siney and Fanaei, 2025). ژنوتیپ و محیط به ترتیب ۱۳/۲۵ و ۱۹/۱۱ درصد از کل تغییرات داده‌ها را برای درصد اسانس تبیین کردند (جدول ۲). اثر متقابل بین ژنوتیپ و محیط نشان داد که درصد اسانس ژنوتیپها از مکانی به مکان دیگر متفاوت است. اثر متقابل بین ژنوتیپ و محیط ۴۵/۶۱ درصد از تغییرات کل داده‌ها را به خود اختصاص داد. این یافته با یافته‌های پژوهشگران دیگر مطابقت دارد. آنها نیز گزارش کردند که قسمت اعظم تغییرات مربوط به اثر متقابل ژنوتیپ در محیط می‌باشد (Enyew et al., 2021; Hassani et al., 2023). با توجه به معنی داری اثر متقابل ژنوتیپ × محیط و رفتار متفاوت ژنوتیپها در محیطهای مختلف، این اثر به دو عامل یا مؤلفه IPCA1 (AMMI1) و IPCA2 (AMMI2) تجزیه شد که هر دو مؤلفه اول، در سطح احتمال ۰/۰۱ معنی دار بودند. ۷۸ درصد از تغییرات کل اثر متقابل توسط PCA توضیح داده شد که ۴۳ درصد از این تغییرات مربوط به مؤلفه اصلی اول است و ۳۵ درصد دیگر مربوط به مؤلفه اصلی دوم بود (جدول ۲). مؤلفه اثر متقابل ژنوتیپ در محیط، شناسایی یک ژنوتیپ با قابلیت زنده ماندن و تولید محصول در یک محیط خاص را ممکن می‌سازد. این بدان معنی است که یک ژنوتیپ ممکن است عملکرد مشابهی را هنگام کشت در مکان دیگری نشان ندهد. به همین دلیل، پس از تولید لاین‌های امیدبخش یا ژنوتیپهای هیبرید، باید در محیطهای مختلف آزمایش شوند (Torres Filho et al., 2017). پایدارترین ژنوتیپها از لحاظ درصد اسانس، ژنوتیپهای شماره ۱۶، ۱۳، ۳۶، ۲۵، ۱، ۵ و ۸ به ترتیب با مقدار ASV ۰/۰۳، ۰/۰۴، ۰/۰۵، ۰/۰۸، ۰/۱، ۰/۱۱ و ۰/۱۱ بودند (جدول

از حاصل ضرب عملکرد دانه در واحد سطح در درصد اسانس به دست آمد.

تجزیه آماری

پس از بررسی برقراری مفروضات تجزیه واریانس، داده‌ها با استفاده از نرم افزار آماری SAS نسخه ۹/۴ مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. برای تجزیه AMMI و GGE بای پلات براساس صفات درصد اسانس و عملکرد اسانس ۳۶ ژنوتیپ مختلف زیره سبز در چهار محیط از نرم افزار GenStat نسخه ۱۲ استفاده شد. جهت تجزیه پایداری درصد اسانس و عملکرد اسانس ژنوتیپهای مورد بررسی از مدل AMMI و از مؤلفه‌های اثر متقابل اول و دوم AMMI (IPCA1, IPCA2) به عنوان پارامترهای پایداری برای ژنوتیپها و محیطها استفاده گردید (Annicchiarico, 1997).

جهت انجام آنالیز داده‌های به دست آمده و تفسیر اثر متقابل ژنوتیپ × محیط و تعیین ابر محیطها (Mega-Environment) از روش GGE بای پلات استفاده شد. مدل GGE بای پلات بر پایه مقادیر ویژه تفکیک پذیر برای دو مؤلفه اول به صورت رابطه (۱) است:

(۱)

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

که در این مدل میانگین لامین ژنوتیپ، 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 اکوتیپی، η_{j1} و η_{j2} بردارهای محیطی مؤلفه اول و دوم و ε_{ij} مقدار باقی مانده برای ژنوتیپ i ام هستند (Raiger and Prabhakaran, 2001). مقدار آماره پایداری عملکرد با استفاده از ارزش امی (ASV) از رابطه (۲) محاسبه شد (Ghodrati Niari and Abdolshahi, 2015).

$$ASV_i = \sqrt{\left[IPCA_1 \text{score} \times \frac{SS_{IPCA_1}}{SS_{G \times E}}\right]^2 + \left[IPCA_2 \text{score} \times \frac{SS_{IPCA_2}}{SS_{G \times E}}\right]^2 + \dots} \quad (2)$$

ASV_i ارزش پایداری امی برای ژنوتیپ i ام

SS_{IPCA_1} : مجموع مربعات مؤلفه اصلی اول برای ژنوتیپها

$SS_{G \times E}$: مجموع مربعات اثر متقابل ژنوتیپ در محیط

$IPCA_i \text{score}$: نمره مؤلفه اصلی برای ژنوتیپ i ام

۳). بیشترین درصد اسانس ژنوتیپ‌ها در این پژوهش به ژنوتیپ‌های شماره ۱۰، ۲۵، ۱۴، ۳۰، ۳۴ و ۳۱ به ترتیب با مقدار ۲/۷، ۲/۶۹، ۲/۵۷، ۲/۵۴ و ۲/۵۲ درصد اختصاص داشت. از بین ژنوتیپ‌های پایدار تنها ژنوتیپ شماره ۲۵ در گروه ژنوتیپ‌های با بیشترین درصد اسانس قرار گرفت و سایر ژنوتیپ‌های پایدار درصد اسانس پایین‌تری از گروه برتر داشتند. تجزیه واریانس مدل AMMI برای صفت عملکرد اسانس نشان داد اثر ژنوتیپ، محیط و اثر متقابل ژنوتیپ در محیط معنی‌دار بودند. در پژوهش دیگری نیز اثر ژنوتیپ بر عملکرد اسانس زیره سبز معنی‌دار گزارش شد (Alavi-Siney and Fanaei, 2025).

ژنوتیپ و محیط به ترتیب ۸/۱۷ و ۵۴/۱۹ درصد از کل تغییرات داده‌ها را برای عملکرد اسانس تبیین کردند (جدول ۲). اثر متقابل بین ژنوتیپ و محیط ۲۳/۳۳ درصد از تغییرات کل داده‌ها را به خود اختصاص داد. پژوهشگران دیگر نیز در بررسی پایداری عملکرد در گیاهان مختلف سهم بیشتر محیط از واریانس کل را گزارش کرده‌اند (Qasemi et al., 2022; Gholizadeh and Khodadadi, 2023; Hemayati et al., 2024; Alavi-Siney et al., 2024; Sharif et al., 2025). در این تجزیه دو مولفه اصلی اول حدود ۸۳/۴ درصد از واریانس

کل اثر متقابل را به خود اختصاص دادند. مولفه اصلی اول و دوم به ترتیب ۴۷/۵ و ۳۶ درصد از تغییرات کل داده‌ها را توضیح دادند (جدول ۲). نتایج به دست آمده از جدول ۳ نشان داد که پایدارترین ژنوتیپ‌ها از لحاظ عملکرد اسانس، ژنوتیپ‌های شماره ۱۹، ۸، ۲۸، ۷ و ۲۹ بودند. آماره *ASV* این ژنوتیپ‌ها دارای کمترین مقدار و به ترتیب ۰/۰۹، ۰/۱۲، ۰/۲۵، ۰/۲۷ و ۰/۲۹ بود. بیشترین عملکرد اسانس مربوط به ژنوتیپ‌های شماره ۳۰، ۲۵، ۳۱، ۱۴، ۳۵، ۱۲ و ۲۶ بود که مقدار عملکرد اسانس این ژنوتیپ‌ها در بازه ۳/۷۲-۳/۰۷ کیلوگرم در هکتار قرار داشت، در صورتی که عملکرد اسانس ژنوتیپ‌های پایدار کمتر بود و هیچ کدام از ژنوتیپ‌های پایدار در گروه دارای بیشترین عملکرد اسانس قرار نگرفت. از میان ژنوتیپ‌های پایدار بیشترین عملکرد اسانس مربوط به ژنوتیپ شماره ۲۸ با مقدار ۲/۸۶ کیلوگرم در هکتار بود. این موضوع نشان می‌دهد ژنوتیپ‌هایی که عملکرد اسانس بالاتری تولید می‌کنند، پایداری عملکرد اسانس پایین‌تری دارند، بنابراین ژنوتیپی که بتواند در عین اینکه پایداری عملکرد در محیط‌های مختلف دارد، عملکرد بالاتری نیز داشته باشد، می‌تواند به عنوان ژنوتیپ ایده‌آل گزینش شود. ژنوتیپ شماره ۲۸ دارای این ویژگی می‌باشد و ژنوتیپ ایده‌آل از لحاظ عملکرد اسانس به حساب می‌آید.

جدول ۲- تجزیه واریانس اثرات اصلی و ضرب پذیر برای عملکرد دانه ژنوتیپ‌های زیره سبز در چهار منطقه

Table 2- Anova of main and multiplicative effects for grain yield of cumin genotypes in four environments

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی df	میانگین مربعات MS		درصد واریانس Variance%	
				عملکرد اسانس	درصد اسانس
		Essential oil percentage	Essential oil Yield	Essential oil percentage	Essential oil Yield
محیط Environment	3	6.454**	145.85**	19.11	54.19
ژنوتیپ Genotype	35	0.384**	1.89**	13.25	8.17
بلوک (محیط) Block (Environment)	8	0.901**	1.65**	7.12	1.63
ژنوتیپ در محیط Genotype× Environment	105	0.440**	1.79**	45.61	23.33
IPCA 1	37	0.537**	2.42**	19.62	11.1
IPCA 2	35	0.461**	1.93**	15.91	8.36
باقی مانده Noise	33	0.309**	0.95**	10.08	3.86
اشتباه آزمایشی Error	280	0.054	0.37	14.92	12.67
کل Total	431			-	-

**: significant at 0.01 probability level

**: معنی دار در سطح احتمال ۰/۰۱

جدول ۳- میانگین درصد اسانس، عملکرد اسانس ژنوتیپ‌ها و آماره ASV برای ژنوتیپ‌های زیره سبز

Table 3- Average of genotypes for essential oil percent and essential oil yield and ASV statistic for cumin Genotypes

Table 5- Average of genotypes for essential oil percent and essential oil yield and ASV statistic for Camlin Genotypes									
ژنوتیپ Genotype	درصد اسانس Essential oil percentage (%)	عملکرد اسانس Essential oil Yield (kg/ha)	ASV		ژنوتیپ Genotype	درصد اسانس Essential oil percentage (%)	عملکرد اسانس Essential oil Yield (kg/ha)	ASV	
			درصد اسانس Essential oil percentage (%)	عملکرد اسانس Essential oil Yield (kg/ha)				درصد اسانس Essential oil percentage (%)	عملکرد اسانس Essential oil Yield (kg/ha)
G1	2.35	2.34	0.10	0.49	G19	2.23	2.58	0.29	0.09
G2	2.21	1.84	0.22	0.61	G20	2.51	2.65	0.32	0.45
G3	2.11	2.32	0.74	1.23	G21	2.22	2.00	0.23	0.45
G4	2.44	2.81	0.71	1.14	G22	2.35	2.71	0.37	0.53
G5	2.40	2.97	0.11	0.50	G23	2.28	2.76	0.18	0.41
G6	2.03	2.81	0.18	0.32	G24	2.21	3.03	0.35	0.70
G7	2.51	2.27	0.37	0.27	G25	2.69	3.29	0.08	0.61
G8	2.27	1.98	0.11	0.12	G26	2.44	3.07	0.33	0.57
G9	2.18	2.19	0.37	0.50	G27	2.49	2.74	0.37	1.41
G10	2.70	2.61	0.16	0.34	G28	2.48	2.86	0.50	0.25
G11	2.05	2.34	0.96	0.76	G29	2.45	2.53	0.34	0.29
G12	2.26	3.08	0.31	0.38	G30	2.57	3.72	0.29	0.50
G13	2.43	2.95	0.04	0.54	G31	2.52	3.20	0.23	0.71
G14	2.69	3.19	0.32	0.74	G32	2.10	2.67	0.53	0.55
G15	2.43	2.63	0.64	0.39	G33	2.34	2.91	0.65	0.73
G16	2.25	2.67	0.03	0.70	G34	2.54	2.76	0.49	0.60
G17	2.26	2.49	0.87	0.69	G35	2.34	3.14	0.32	1.02
G18	2.10	2.44	0.33	0.40	G36	2.36	2.84	0.05	0.35
LSD (0.05)	0.19	0.49	-	-	LSD (0.05)	0.19	0.49	-	-

جدول ۴- متوسط درصد اسانس و عملکرد اسانس و مناسب‌ترین ژنوتیپ برای محیط‌های مورد بررسی

Table 4- Average of genotypes for essential oil percent and essential oil yield and the most suitable genotype for the investigated environments

صفت Trait	محیط Environment	میانگین Mean	ژنوتیپ اول First genotype	ژنوتیپ دوم Second genotype	ژنوتیپ سوم Third genotype	ژنوتیپ چهارم Forth genotype
درصد اسانس Essential oil percentage (%)	مشهد Mashhad	2.34	G33	G34	G29	G26
	کرج Karaj	2.41	G27	G10	G14	G28
	جیرفت Jiroft	2.63	G14	G10	G25	G30
	بیرجند Birjand	2.04	G4	G14	G7	G30
	مشهد Mashhad	3.48	G26	G33	G35	G16
عملکرد اسانس Essential oil Yield (kg/ha)	کرج Karaj	3.83	G27	G31	G25	G24
	جیرفت Jiroft	1.32	G30	G35	G14	G4
	بیرجند Birjand	2.20	G30	G14	G4	G13

جیرفت، ژنوتیپ‌های شماره ۴، ۱۴، ۷ و ۳۰ در شرایط بیرجند درصد اسانس بالاتری داشتند (جدول ۴). نتایج نشان داد ژنوتیپ شماره ۱۴ در سه مکان کرج، جیرفت و بیرجند از

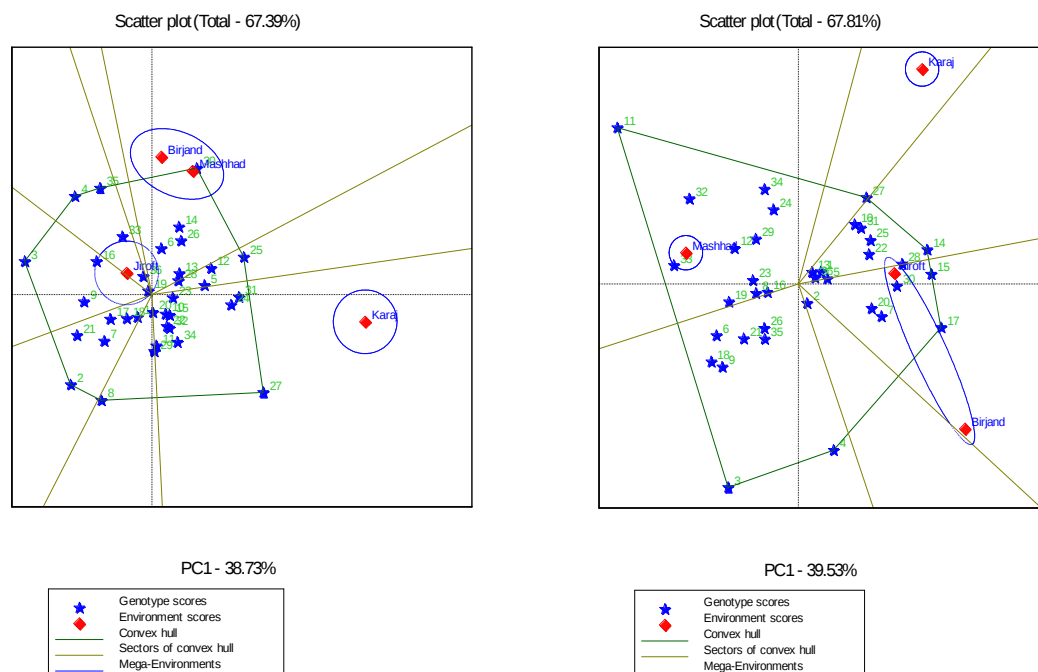
تجزیه AMMI نشان داد، ژنوتیپ‌های شماره ۳۳، ۳۴، ۲۹ و ۲۶ در شرایط مشهد، ژنوتیپ‌های شماره ۲۷، ۱۰، ۱۴ و ۲۸ در شرایط کرج، ژنوتیپ‌های شماره ۱۴، ۱۰، ۲۵ و ۳۰ در شرایط

(*et al.*, 2022). همچنین پژوهشگران نشان داده‌اند، زمانی که دو مؤلفه اصلی اول بیش از ۶۰ درصد تغییرات اثرات متقابل را توجیه کند، روش GGE بای‌پلات برای ارزیابی ابرمحیط‌ها کاربردی و مفید می‌باشد (Yan WeiKai and Hunt, 2002). برای حصول ابرمحیط‌ها از نمودار چندضلعی استفاده می‌شود. نمودار چندضلعی از اتصال ژنوتیپ‌هایی که در دورترین فاصله از مبدأ و محیط‌های آزمایشی قرار دارند، حاصل می‌شود و با رسم خطوط عمود از مبدأ مختصات بر اضلاع این چندوجهی ابرمحیط‌ها به دست می‌آیند (Yan *et al.*, 2007). براساس شکل ۱ ژنوتیپ شماره ۳۰ از لحاظ صفت عملکرد اسانس برای محیط‌های مشهد و بیرجند (در یک ابرمحیط قرار گرفتند) مناسب بوده و سازگاری خصوصی بالایی با این محیط‌ها دارد. ژنوتیپ شماره ۲۷ برای کرج مناسب بوده و سازگاری خصوصی بالایی با این محیط دارد. محیط جیرفت بر روی خط بین دو ابرمحیط قرار گرفت. بنابراین ژنوتیپ‌های دو ابرمحیط شامل ژنوتیپ شماره ۳ و ۴ سازگاری خصوصی بالایی با منطقه جیرفت دارند و مناسب این منطقه از لحاظ صفت عملکرد اسانس می‌باشند.

برترین ژنوتیپ‌ها بوده و ژنوتیپ‌های شماره ۱۰ نیز در دو محیط جیرفت و کرج از برترین ژنوتیپ‌ها می‌باشند، این موضوع نشان می‌دهد این ژنوتیپ‌ها از پایداری مناسبی برخوردارند.

همچنین مشخص شد ژنوتیپ‌های شماره ۳۵، ۳۳، ۲۶ و ۱۶ در منطقه مشهد، ژنوتیپ‌های شماره ۲۷، ۳۱، ۲۵ و ۲۴ در منطقه کرج، ژنوتیپ‌های شماره ۳۰، ۳۵، ۱۴ و ۴ در منطقه جیرفت و ژنوتیپ‌های شماره ۳۰، ۱۴، ۴ و ۱۳ در منطقه بیرجند از عملکرد اسانس بالاتری برخوردار بوده و مناسب این مناطق هستند (جدول ۴). ژنوتیپ‌های شماره ۳۰، ۱۴ و ۴ در دو مکان جیرفت و بیرجند عملکرد اسانس بالاتری داشتند. بنابراین می‌توان عنوان نمود این ژنوتیپ‌ها از پایداری بهتری نیز برخوردار هستند.

براساس نمودار حاصل از روش GGE بای‌پلات برای صفت عملکرد اسانس، مؤلفه اول ۳۸/۷۳ درصد و مؤلفه دوم ۲۹/۶۶ درصد از کل تغییرات اثرمتقابل را تبیین کردند. کارایی ژنوتیپ‌های مختلف و اثرات متقابل آنها با چندین محیط با استفاده از تجزیه GGE بای‌پلات از طریق مؤلفه‌های اصلی اول و دوم گزارش شده است (Arshadi *et al.*, 2018; Qasemi



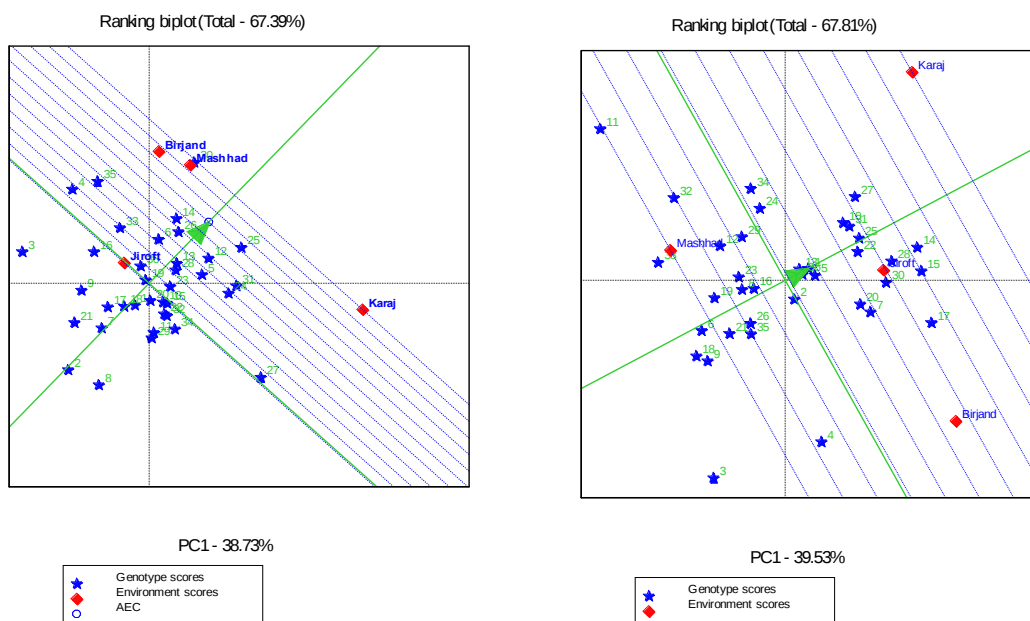
شکل ۱- نمایش گرافیکی GGE بای‌پلات جهت تعیین برتری کدام ژنوتیپ (ها) در کدام محیط (ها) برای درصد اسانس (شکل سمت راست) و عملکرد اسانس (شکل سمت چپ)

Figure 1- Graphical presentation of GGE biplot to determine the superiority of which Genotype(s) in which environment(s) for essential oil percentage (Right figure) and essential oil yield (Left figure)

محیطی که از مرکز بای پلات عبور می کند معیار محاسبه میانگین کارایی ژنوتیپ ها است. اگر ژنوتیپ ها در سمت راست این محور باشند، دارای مقادیر بالاتر از متوسط هستند و اگر در سمت چپ این محور قرار گرفته باشند، دارای مقادیر کمتر از متوسط می باشند (Alavi-*et al.*, 2022; Gholizadeh *et al.*, 2022). شکل ۲ نشان داد که از لحاظ درصد اسانس ژنوتیپ های شماره ۱۳، ۱۶، ۱، ۶، ۵، ۳۶، ۲۲ و ۲۵ به خط متوسط محیطی نزدیک می باشند و از لحاظ این صفت پایداری بالایی نشان می دهند. در تجزیه AMMI نیز مشخص شد، این ژنوتیپ ها از آماره پایداری پایین تری برخوردار بودند. از میان این ژنوتیپ ها، ژنوتیپ های شماره ۲۵ و ۲۲ در عین پایداری، درصد اسانس بالاتری نیز داشتند. بنابراین ژنوتیپ های برتر از لحاظ درصد اسانس به حساب می آیند. از لحاظ عملکرد اسانس ژنوتیپ های شماره ۲، ۷، ۱۸، ۱، ۱۹، ۲۸ و ۱۳ به خاطر این که نزدیک خط متوسط عملکرد محیطی قرار گرفتند، ژنوتیپ های پایدار محسوب می شوند (شکل ۲). این نمودار نشان داد، بیشترین عملکرد اسانس مربوط به ژنوتیپ شماره ۲۵ است ولی از خط متوسط عملکرد محیطی فاصله دارد که نشان می دهد پایداری کمی دارد. این ژنوتیپ سازگاری خصوصی بالایی با محیط کرج دارد.

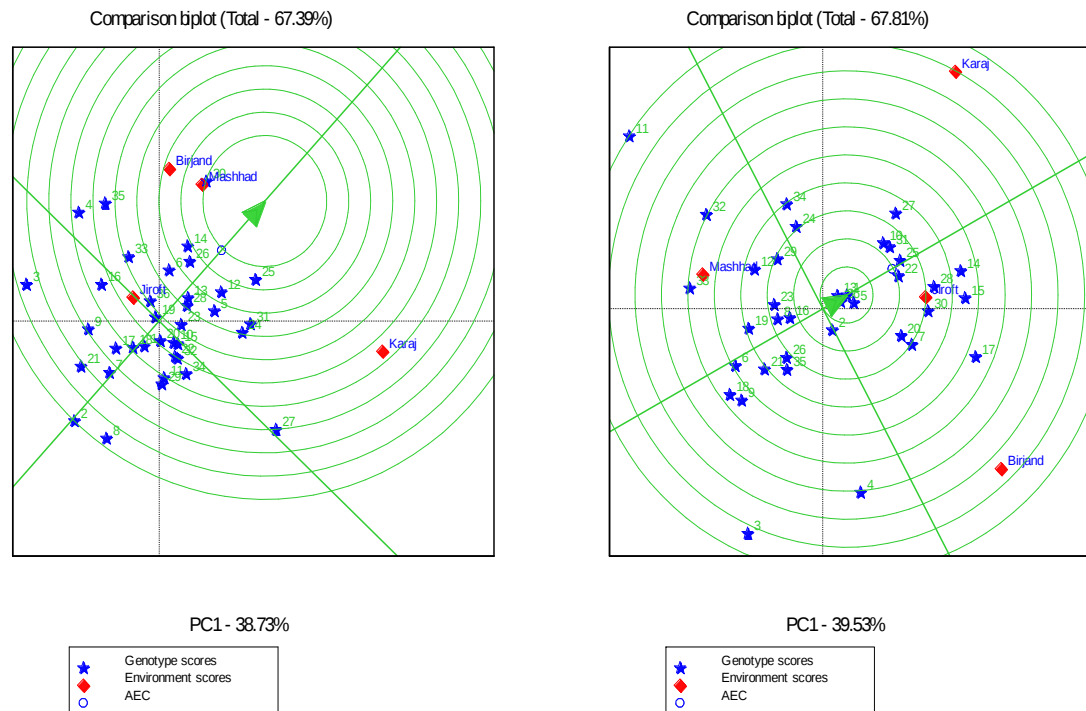
تجزیه GGE بای پلات برای صفت درصد اسانس نشان داد، دو مؤلفه اول به ترتیب ۳۹/۵۳ و ۲۸/۲۹ درصد از کل تغییرات اثر متقابل را شامل می شوند. نمودار چندضلعی برای صفت درصد اسانس نشان داد که مناطق بیرجند و جیرفت در یک ابر محیط قرار گرفته و ژنوتیپ شماره ۱۷ مناسب ترین ژنوتیپ برای این دو مکان می باشد. کرج و مشهد هر کدام به تنهایی در یک ابر محیط قرار گرفته و به ترتیب ژنوتیپ های ۲۷ و ۱۱ مناسب ترین ژنوتیپ ها برای این مکان ها بوده و سازگاری خصوصی بالایی با آن ها دارند.

خط مورب که از مرکز بای پلات و از نقطه ایده آل (که نماینده متوسط ضرایب دو مؤلفه اول اثر متقابل در مدل GGE بای پلات است) می گذرد، خط متوسط عملکرد محیطی (Average Environment Coordination) نامیده می شود. از این نمودار برای بررسی همزمان صفت مورد نظر و پایداری آن صفت برای ژنوتیپ ها استفاده می گردد. به طوری که ژنوتیپ های نزدیک به مرکز دایره موجود بر روی خط متوسط عملکرد محیطی، دارای مقادیر بالاتری از لحاظ صفت مورد نظر هستند. همچنین ژنوتیپ هایی که نزدیک به این خط باشند، دارای پایداری بیشتر و ژنوتیپ های دارای بیشترین فاصله، ناپایدارترین ژنوتیپ ها به حساب می آیند. خط عمود بر خط متوسط کارایی



شکل ۲- خط متوسط عملکرد محیطی در مقایسه ژنوتیپ های مورد بررسی براساس درصد اسانس (شکل سمت راست) و عملکرد اسانس (شکل سمت چپ) و پایداری در چهار محیط آزمایشی

Figure 2- The mean line of environmental yield in the comparison of the studied ecotypes based on essential oil percentage (Right figure) and essential oil yield (Left figure) and stability in four experimental environments.



شکل ۳- ارزیابی ژنوتیپ‌های مورد مطالعه نسبت به ژنوتیپ ایده‌آل در چهار محیط براساس درصد اسانس (شکل سمت راست) و عملکرد اسانس (شکل سمت چپ)

Figure 3- Evaluation of the studied ecotypes compared to the ideal ecotype in four environments based on essential oil percentage (Right figure) and essential oil yield (Left figure)

نتیجه‌گیری کلی

نتایج تجزیه AMMI نشان داد، اثرمتقابل ژنوتیپ در محیط برای هر دو صفت معنی‌دار و نسبت قابل توجهی از واریانس را به خود اختصاص داده است. از این رو تجزیه اثرمتقابل ژنوتیپ در محیط نشان داد که از لحاظ درصد اسانس ژنوتیپ شماره ۱۷ سازگاری خصوصی بالایی با محیط‌های بیرجند و جیرفت دارد و ژنوتیپ‌های شماره ۲۷ و ۱۱ به‌ترتیب سازگاری خصوصی بالایی با منطقه کرج و مشهد دارند، درحالی‌که برای عملکرد اسانس نیز ژنوتیپ شماره ۲۷ سازگاری خصوصی بالایی با منطقه کرج داشت ولی ژنوتیپ‌های شماره ۳ و ۴ برای منطقه جیرفت و ژنوتیپ شماره ۳۰ برای مناطق مشهد و بیرجند مناسب کشت بودند. در نهایت براساس تجزیه GGE بای پلات مشخص شد که ژنوتیپ‌های شماره ۲۲، ۲۵، ۳۱ و ۱۰ ژنوتیپ‌های ایده‌آل از لحاظ صفت درصد اسانس می‌باشند. از لحاظ عملکرد اسانس ژنوتیپ‌های شماره ۳۰ و ۲۵ نزدیک‌ترین ژنوتیپ‌ها به ژنوتیپ ایده‌آل بودند. گیاه زیره سبز به‌خاطر مصارف دارویی و ادویه‌ای لازم است درعین عملکرد بالا، درصد اسانس بالایی نیز داشته باشند که در این آزمایش مشخص شد ژنوتیپ‌های دارای

تجزیه GGE بای پلات دارای این قابلیت است که ژنوتیپ ایده‌آل را نمایش می‌دهد تا ژنوتیپ‌های مورد آزمایش را بتوان با آن مقایسه کرد. ژنوتیپ ایده‌آل دارای دو ویژگی عملکرد بالا و پایداری است. ژنوتیپ‌هایی که نزدیک به ژنوتیپ ایده‌آل باشند، ژنوتیپ مناسب برای گزینش به‌حساب می‌آیند (Jafari and Farshadfar, 2018; Gholizadeh et al., 2022; Alavi-Siney et al., 2024).

شکل ۳ نشان داد ژنوتیپ‌های شماره ۲۲، ۲۵، ۳۱ و ۱۰ دارای هر دو ویژگی اشاره شده بودند (مقدار بالا و پایداری) و ژنوتیپ‌های برتر و مناسب گزینش برای صفت درصد اسانس می‌باشند. بنابراین می‌توان از این ژنوتیپ‌ها برای برنامه‌های اصلاحی آتی استفاده کرد. از لحاظ عملکرد اسانس ژنوتیپ‌های شماره ۳۰ و ۲۵ نزدیک‌ترین ژنوتیپ‌ها به ژنوتیپ ایده‌آل محسوب می‌شوند و ژنوتیپ‌های شماره ۱۴، ۲۶ و ۱۲ نیز می‌توانند در گزینش‌ها مدنظر قرار گیرند. این ژنوتیپ‌ها را می‌توان به‌عنوان والد در برنامه‌های اصلاحی یا به‌عنوان رقم برتر برای استفاده کشاورزان معرفی کرد.

بالاترین عملکرد اسانس، از هر دو ویژگی برخوردارند بنابراین
 ژنوتیپ‌های شماره ۳۰ و ۲۵ ایده‌آل‌ترین ژنوتیپ‌ها به حساب
 می‌آیند. بنابراین می‌توان این ژنوتیپ‌ها را به عنوان ژنوتیپ‌های
 پایدار با درصد و عملکرد اسانس بالا به کشاورزان معرفی نمود و
 از پتانسیل آن‌ها در برنامه‌های به‌نژادی به عنوان والد بهره‌برداری
 کرد.

References

- Allahgholipour, M., 2016. Genotype $\times$ environment interaction effect in rice genotypes using GGE Biplot. *Cereal Research*. 6, pp.1-14. [In Persian]. <https://doi.org/10.22124/c.2016.3680>
- Alavi-Siney, S.M. and Fanaei, H.R., 2025. Evaluation and selection of superior cumin ecotypes through quantitative and qualitative traits via multivariate methods under Jiroft climatic conditions. *Crop Science Research in Arid Regions*, 6(4), pp.257-275. [In Persian]. <http://doi.org/10.22034/csrar.2024.430131.1387>
- Alavi-Siney, S.M., Yoneszadeh, R., Abasi, A., Aien, A. and Fanaei, H., 2024. The stability of seed yield in cumin ecotypes in different planting dates using multivariate methods. *Journal of Crop Breeding*, 16(2), pp.80-92. [In Persian]. <http://doi.org/10.61186/jcb.16.2.80>
- Alizadeh, A., Tavousi, M., Inanlou, M. and Nasiri, M.M., 2005. Effect of irrigation regimes on yield and yield components of cumin. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 2(3), pp.35-42. [In Persian].
- Annicchiarico, P., 1997. Joint regression vs AMMI analysis of genotype-environment interactions for cereals in Italy. *Euphytica*, 94, pp.53-62.
- Arshadi, A., Karami, A.E., Sartip, A., Zare, M. and Rezabakhsh, P., 2018. Genotype performance in relation to drought tolerance in barley using multi-environment trials. *Agronomy Research*, 16(1), pp.5-12. <https://doi.org/10.15159/ar.18.004>
- Bagheri, M., Hasanizadeh Khankahdani, H., Anafjeh, Z. and Arab-Salmani, K., 2021. Evaluation of stability and compatibility of yield in advanced lines of Iranian long eggplants. *Journal of Vegetables Sciences*, 5(9), pp.125-137. <http://doi.org/10.22034/iuvs.2021.531273.1163>
- Enyew, M., Feyissa, T., Geleta, M., Tesfaye, K., Hammenhag, C. and Carlsson, A.S., 2021. Genotype by environment interaction, correlation, AMMI, GGE biplot and cluster analysis for grain yield and other agronomic traits in sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench). *PLoS ONE*, 16(10), e0258211. <http://doi.org/10.1371/journal.pone.0258211>
- Esmailzadeh Moghadam, M., Dastfal, M., Tabib Ghaffary, S.M., Anderzian, S.B.A., Sayyahfar, M., Miri, K., Shirali Koohkan, Sh. and Askari Kalestani, A., 2024. Stability analysis of bread wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes by the genotype $\times$ genotype-environment biplot. *Journal of Crop Breeding*. 16(3), pp.13-24. [In Persian]. <http://doi.org/10.61186/jcb.16.3.13>
- Fanaei, H., Akbari Moghadam, H., Keigha, G., Ghaffarie, M. and Alli, E., 2006. Evaluation of agronomy and essential oil components of *Cuminum cyminum* L., *Foeniculum vulgare* Mill. and *Nigella sativa* L. in the condition of Sistan region. *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research*, 22(1), pp.34-41. [In Persian]. <http://doi.org/10.22092/ijmapr.2006.114998>

- Ghanbari, J., Khajoei-nejad, G.R. and Mohammadinejad, G., 2017. Study of ecotype and sowing date interaction in cumin (*Cuminum cyminum* L.) using different univariate stability parameters. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 15(1), pp.87-102. [In Persian]. <http://doi.org/10.22067/gsc.v15i1.43232>
- Ghodrati Niari, F. and Abdolshahi, R., 2015. Evaluation of yield stability of 40 bread wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes using additive main effects and multiplicative interaction (AMMI). *Iranian Journal of Crop Sciences*, 16(4), pp.322-333. [In Persian].
- Gholizadeh, A. and Khodadadi, M., 2023. Graphic analysis of genotype, environment and genotype $\times$ environment interaction for oil yield in coriander. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 16(2), pp.277-289. <http://doi.org/10.22077/escs.2022.4491.2029>
- Gholizadeh, A., Khodadadi, M. and Sharifi-Zagheh, A., 2022. Evaluation of genotype $\times$ environment interaction for essential oil yield of coriander genotypes under different irrigation conditions using GGE biplot method. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 15(1), pp.43-52. <http://doi.org/10.22077/escs.2020.3574.1878>
- Gondaliya, S.B., Khatrani, T.J., Soni, K.K. and 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, pp.908-913. <http://doi:10.1016/j.indcrop.2017.10.054>
- Hajlaoui, H., Mighri, H., Noumi, E., Snoussi, M., Trabelsi, N., Ksouri, R. and Bakhrouf, A., 2010. Chemical composition and biological activities of Tunisian *Cuminum cyminum* L. essential oil: A high effectiveness against *Vibrio* spp. Strains. *Food and Chemical Toxicology*, 48, pp.2186-2192. <http://doi:10.1016/j.fct.2010.05.044>
- Hashemian, N., Pirbalouti, A.G., Hashemi, M., Golparvar, A. and Hamed, B., 2013. Diversity in chemical composition and antibacterial activity of essential oils of cumin (*Cuminum cyminum* L.) Diverse from Northeast of Iran. *Australian Journal of Crop Science*, 7(11), pp.1752-1760.
- Hassani, M., HAMZE, H. and Mansouri, H., 2023. Compatibility and stability of new rhizomania-resistant multigerm hybrids in sugar beet (*Beta vulgaris* L.). *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 33(1), pp.113-128. [In Persian]. <http://doi.org/10.22034/saps.2022.49322.2787>
- Hemayati, S.S., Hamdi, F., Saremirad, A. and Hamze, H., 2024. Genotype by environment interaction and stability analysis for harvest date in sugar beet cultivars. *Scientific Reports*, 14, pp.1-12. <http://doi.org/10.1038/s41598-024-67272-7>
- Jafari, T. and Farshadfar, E., 2018. Stability analysis of bread wheat genotypes (*Triticum aestivum* L.) by GGE biplot. *Cereal Research*, 8, pp.199- 208. [In Persian]. <http://doi.org/10.22124/c.2018.6232.1243>
- Jat, M.L., Jat, R.K., Singh, P., Jat, S.L., Sidhu, H.S., Jat, H.S., Bijarniya, D., Parihar, C.M. and Gupta, R., 2017. Predicting yield and stability analysis of wheat under different crop management systems across agroecosystems in India. *American Journal of Plant Sciences*, 8, pp.1977-2012. <http://doi.org/10.4236/ajps.2017.88133>
- Ministry of Agricultural-Jihad (MAJ), 2023. Communications and Information Technology Center. Available at website <http://amar.maj.ir/>. [In Persian].

- Moghaddam, M. and Ghasemi Pirbalouti, A., 2017. Agro-morphological and phytochemical diversity of Iranian *Cuminum cyminum* accessions. *Industrial Crops and Products*, 99, pp.205-213. <http://doi:10.1016/j.indcrop.2017.02.003>
- Parthasarathy, V.A., Chempakam, B. and Zachariah, T.J., 2008. Chemistry of Spices. CABI, Oxford, UK. 464 PP.
- Qasemi, S.H., Mostafavi, K., Khosroshahli, M., Bihamta, M.R. and Ramshini, H., 2022. Genotype and environment interaction and stability of grain yield and oil content of rapeseed cultivars. *Food Science and Nutrition*, 10(12), pp.4308–4318. <http://doi.org/10.1002/fsn3.3023>
- Raiger, H.L. and Prabhakaran, V.T., 2001. A study on the performance of a few non-parametric stability measures using pearl-millet data. *Indian Journal of Genetics*, 61, pp.7-11.
- Sharif, I., Aleem, S., Junaid, J.A., Aleem, M., Jamshaid, K., Saleem, H., Rizwan, M., Chohan, S.M., Sohail, S., Akram, S. and Zeeshan, M., 2025. Evaluation of genotype $\times$ environment interaction and yield stability of cotton (*Gossypium hirsutum* L.) genotypes under heat stress conditions. *Journal of Crop Health*, 77(16), pp.1-12. <http://doi.org/10.1007/s10343-024-01079-4>
- Shiri, M.R. and Bahrapour, T., 2015. Genotype $\times$ environment interaction analysis using GGE biplot in grain maize (*Zea mays* L.) hybrids under different irrigation conditions. *Cereal Research*, 5, pp.83-94. [In Persian].
- Shiri, M., Moharramnejad, S., Estakhr, A., Fareghi, S., Najafinezhad, H., Khavari Khorasani, S., Afarinesh, A., Anvari, K., Eshraghi-Nejad, M. and Mohseni, M., 2024. Determining the stability of new maize hybrids with WAASBY and MTSI Indices. *Journal of Crop Breeding*, 16(2), pp.14-28. [In Persian]. <http://doi.org/10.61186/jcb.16.2.14>
- Sowbhagya, H., 2013. Chemistry, technology, and nutraceutical functions of cumin (*Cuminum cyminum* L.): An overview. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 53(1), pp.1-10. <http://doi.org/10.1080/10408398.2010.500223>
- Tahir, M., Aleem, S., Munawar, M., Parveen, N., Amin, E., Aslam, R., Saeed, A. and Najeebullah, M., 2020. GGE biplot: an effective tool to study genotype and genotype $\times$ environment interaction; a case study in onion (*Allium cepa* L.). *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*, 57, pp.1565–1571. <http://doi.org/10.21162/pakjas/20.9919>
- Torres Filho, J., Oliveira, C.N.G.S., Silveira, L.M., Nunes, G.H.S., Silva, A.J.R. and Silva, M.F.N., 2017. Genotype by environment interaction in green cowpea analyzed via mixed models. *Revista Caatinga*, 30, pp.687–697. <http://doi.org/10.1590/1983-21252017v3 0n317rc>
- Yan WeiKai, Y.W. and 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, W., Kang, M.S., Ma, B., Woods, S. and Cornelius, P.L., 2007. GGE biplot vs. AMMI analysis of genotype by environment data. *Crop Science*, 47(2), pp.643-653.