

Research Paper

Evaluation of the Genotype $\times$ Environment (Planting Date) Interaction and Stability of Sesame Genotypes by Linear Mixed-Effects Models (LMM) and the Multi-trait Stability Index (MTSI)

Sara Mokhtarifar¹, Mohsen Zavareh², Elmira Mohammadvand³ , and Payam Pezeshkpour⁴

- 1- Ph.D. Student, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran
2- Associate Professor, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran
3- Assistant Professor, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran, (Corresponding author: mohammadvand@guilan.ac.ir)
4- Assistant Professor, Department of Crop and Horticultural Science Research, Lorestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Khorramabad, Iran

Received: 14 February, 2025

Revised: 17 April, 2025

Accepted: 21 June, 2025

Extended Abstract

Background: The identification of high- yield cultivars and genotypes with adaptation to a wide range of environments (planting date) is one of the major goals in crop breeding programs. Combining the best linear unbiased predictions (BLUP) and additive main effects and multiplicative interaction (AMMI) methods in multi-environment experiments and multi-trait stability selection (MTSI) helps to better evaluate cultivars and plant genotypes and achieve more accurate results. The present study aims to identify high-yielding cultivars and genotypes that are stable in terms of grain yield and desirable in terms of other traits using the linear mixed effects model (LMM) and multi-trait stability index (MTSI) indices.

Methods: To determine the most appropriate planting date and stable genotype in sesame cultivars and genotypes using the LMM and MTSI, evaluate the genotype $\times$ planting date interaction on grain yield, and determine the grain yield stability of four sesame genotypes and cultivars using the AMMI and BLUP models, this experiment was conducted at the Borujerd Agricultural Research Station during two years (2019-2020). This experiment was conducted as a two-factorial in a randomized complete block design with three replications. The experimental factors included four planting dates (June 13, July 11, July 30, and August 15), and four genotypes (Darab1, Oltan, Halil, and JL16). Each environment was a combination of the year and planting date. Ten plants per plot were used to measure plant height, the number of capsules per plant, and the number of seeds per capsule, which were selected from each plot after physiological maturity. The mean of the ten plant data was used in the analysis of variance of the data. For statistical analyses, the multi-environmental experiments analysis package, called Metan Ver.1.9.0, was used in the R software environment. The uniformity of experimental errors across environments was tested using the Bartlett method, and then the combined analysis of variance of the data was performed using the restricted maximum likelihood (REML) method, assuming a fixed genotype effect and a random year and location effect. The significance of random effects was tested by the likelihood ratio test (LRT) and fixed effects by the least squares method. To estimate stability quantities, singular value decomposition (SVD) was applied to the matrix of best linear unbiased predictions (BLUPs) obtained from genotype-by-environment interactions with an LMM. Variance components were estimated using the REML method. After analysis of variance for the data, the characteristic roots obtained from the AMMI analysis on BLUP were used to estimate the stability parameters WAASB and WAASBY (for simultaneous selection based on average yield and stability), and the best genotypes were selected with these two indices. The MTSI was estimated as well. Genotypic stability values were obtained from the harmonic mean index of genotypic values (HMGV). Genotypic compatibility was assessed based on the relative yield index of genotypic values (RPGV), and the harmonic mean index and relative yield of genotypic values (HMRPGV) were used to simultaneously assess stability, compatibility, and grain yield.

Results: The effects of the environment (planting date), genotype, and genotype-environment interaction were significant on biomass yield, the number of seeds per capsule, and oil percentage. Based on the biplot analysis, genotype 2, in addition to having the highest grain yield, gained

greater yield stability. Based on different values for the grain yield and stability index, WAASB scores, cultivars darab 1 and Ultan were high-yielding and stable, and the superior cultivars in terms of the MTSI were genotype JL16 and the Ultan cultivar. The HMRPGV index identified Darab1 and Ultan as cultivars that, in addition to grain yield, showed high stability and adaptability.

Conclusion: The results showed that the genotype by environment (planting date) interaction was significant on seed yield, plant height, biomass yield, the number of capsules per plant, the number of seeds per capsule, oil percentage, and oil yield. Based on the heat map, the Ultan cultivar can be considered stable. Based on the MTSI, the JL16 genotype and Ultan cultivar were selected as superior genotypes.

Keywords: Heatmap, Planting date, Single value decomposition, Simultaneous selection, Weighted average of absolute scores

How to Cite This Article: Mokhtarifar, S., Zavareh, M., Mohammadvand, E., & Pezeshkpour, P. (2025). Evaluation of the Genotype $\times$ Environment (Planting Date) Interaction and Stability of Sesame Genotypes by Linear Mixed-Effects Models (LMM) and the Multi-trait Stability Index (MTSI). *J Crop Breed*, 17(3), 135-146. DOI: 10.61882/jcb.2024.1604



مقاله پژوهشی

ارزیابی برهمکنش ژنوتیپ × محیط (تاریخ کاشت) و پایداری ژنوتیپ‌های کنجد با مدل اثرهای مختلط خطی (LMM) و شاخص پایداری چندصفتی (MTSI)

سارا مختاری فر^۱، محسن زواره^۲، المیرا محمدوند^۳ و پیام پزشکیپور^۴

۱- دانشجوی دکتری گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

۲- دانشیار، گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

۳- استادیار، گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران، (نویسنده مسؤل: mohammadvand@guilan.ac.ir)

۴- استادیار پژوهش، بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی لرستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، خرم‌آباد، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۳۱

تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۱/۲۸
صفحه: ۱۳۵ تا ۱۴۶

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۲۶

چکیده مبسوط

مقدمه و هدف: شناسایی ارقام و ژنوتیپ‌هایی با عملکرد بالا و سازگاری به دامنه گسترده‌ای از محیط‌ها (تاریخ کاشت) یکی از هدف‌های عمده در برنامه‌های به‌نژادی گیاهان زراعی است. ترکیب دو روش ارزیابی پایداری بهترین پیش‌بینی ناریب خطی (BLUP) و اثرات اصلی جمع‌پذیر و برهمکنش‌های ضرب پذیر (AMMI) در آزمایش‌های چندمحیطی و گزینش پایداری چندصفتی (MTSI) به ارزیابی بهتر ارقام و ژنوتیپ‌های گیاهی و دستیابی به نتایج دقیق‌تر کمک می‌کند. مدل‌های اثرات اصلی جمع‌پذیر و برهمکنش ضرب‌پذیر (AMMI) و بهترین پیش‌بینی ناریب خطی (BLUP)، از جمله روش‌های چند متغیره کاربردی در ارزیابی آزمایش‌های چندمحیطی هستند. هدف از پژوهش حاضر، شناسایی ارقام و ژنوتیپ‌های کنجد با عملکرد بالا، پایدار از نظر عملکرد دانه و مطلوب از نظر سایر صفات با بهره‌گیری از شاخص‌های مدل اثرهای مختلط خطی (LMM) و شاخص پایداری چندصفتی (MTSI) است.

مواد و روش‌ها: به‌منظور تعیین مناسب‌ترین تاریخ کاشت و ژنوتیپ پایدار در ارقام و ژنوتیپ‌های کنجد با استفاده از مدل اثرهای مختلط خطی (LMM) و شاخص پایداری چندصفتی (MTSI) و ارزیابی برهمکنش ژنوتیپ × تاریخ کاشت بر عملکرد دانه و تعیین پایداری عملکرد دانه چهار ژنوتیپ و رقم کنجد با استفاده از مدل‌های AMMI و BLUP، این آزمایش طی دو سال زراعی (۱۳۹۸-۴۰۰) در ایستگاه تحقیقات کشاورزی بروجرد اجرا شد. این آزمایش به‌صورت فاکتوریل دو عاملی در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار انجام شد. عامل‌های آزمایش شامل چهار تاریخ کاشت (۲۳ خرداد، ۱۱ تیر، ۳۰ تیر و ۲۴ مرداد)، و چهار ژنوتیپ (داراب ۱، اولتان، هلیل و JL16) بودند. هر محیط ترکیبی از سال و تاریخ کاشت بود. برای اندازه‌گیری ارتفاع بوته، تعداد کپسول در بوته و تعداد دانه در هر کپسول، از ده بوته در هر کرت استفاده شد که پس از رسیدگی فیزیولوژیک، از هر کرت انتخاب شده بودند. میانگین داده‌های ده بوته در تجزیه واریانس داده‌ها استفاده شد. برای تجزیه‌های آماری، بسته تجزیه آزمایش‌های چندمحیطی با نام Metan Ver.1.9.0، در محیط نرم‌افزار R به‌کار گرفته شد. یکنواختی خطاهای آزمایشی در محیط‌ها با روش بارتلت آزموده شد و سپس تجزیه واریانس مرکب داده‌ها با فرض ثابت بودن اثر ژنوتیپ و تصادفی بودن اثر سال و تاریخ کاشت با روش حداکثر درست‌نمایی محدودشده (REML) انجام شد. معنی‌داری اثرهای تصادفی با آزمون نسبت درست‌نمایی (LRT) و اثرهای ثابت با روش کمترین مربعات آزموده شد. برای برآورد کمیت‌های پایداری، تجزیه مقادیر منفرد (SVD) بر روی ماتریس بهترین پیش‌بینی‌های ناریب خطی (BLUP) به‌دست آمده از برهمکنش‌های ژنوتیپ × محیط با یک مدل اثر مختلط خطی (LMM) به‌کار برده شد. اجزای واریانس با روش حداکثر درست‌نمایی محدودشده (REML) برآورد شدند. پس از تجزیه واریانس داده‌ها، برای برآورد پارامترهای پایداری WAASB و WAASBY (برای انتخاب همزمان بر اساس میانگین عملکرد و پایداری) ریشه‌های مشخصه حاصل از تجزیه AMMI بر روی BLUP، به‌کار برده شدند و بهترین ژنوتیپ‌ها با این دو شاخص گزینش شدند. شاخص پایداری چندصفتی (MTSI) نیز برآورد شد. از شاخص میانگین هارمونیک ارزش‌های ژنوتیپی (HMGV)، مقادیر پایداری ژنوتیپی به‌دست آمد. سازگاری ژنوتیپ‌ها بر پایه شاخص عملکرد نسبی ارزش‌های ژنوتیپی (RPGV) ارزیابی شد و شاخص میانگین هارمونیک و عملکرد نسبی ارزش ژنوتیپی (HMRPGV) برای ارزیابی همزمان پایداری، سازگاری و عملکرد دانه استفاده شد.

یافته‌ها: اثرات محیط (تاریخ کاشت)، ژنوتیپ و برهمکنش ژنوتیپ در محیط بر صفات عملکرد زیست‌توده، تعداد دانه در کپسول و درصد روغن معنی‌دار بودند. بر پایه تجزیه بای‌پلات، رقم اولتان علاوه بر داشتن بیشترین عملکرد دانه، از پایداری عملکرد بیشتری هم برخوردار بود. بر پایه مقادیر متفاوت برای عملکرد دانه و شاخص پایداری میانگین وزنی نمرات مطلق بهترین پیش‌بینی ناریب خطی (WAASB)، ارقام داراب ۱ و اولتان پرمحصول و پایدار بودند و ژنوتیپ‌های برتر از نظر شاخص گزینش چندصفتی (MTSI)، ژنوتیپ JL16 و رقم اولتان بودند. شاخص میانگین هارمونیک و عملکرد نسبی ارزش ژنوتیپی (HMRPGV)، ارقام داراب ۱ و اولتان را به‌عنوان ارقامی معرفی کرد که علاوه بر عملکرد دانه، از پایداری و سازگاری بالایی نیز برخوردار بودند.

نتیجه‌گیری: نتایج نشان دادند که برهمکنش ژنوتیپ در محیط (تاریخ کاشت) بر عملکرد دانه، ارتفاع بوته، عملکرد زیست‌توده، تعداد کپسول در بوته، تعداد دانه در کپسول، درصد روغن و عملکرد روغن معنی‌دار بود. بر اساس نمودار گرمایی، رقم اولتان را می‌توان پایدار در نظر گرفت. بر اساس شاخص گزینش چندصفتی (MTSI)، ژنوتیپ JL16 و رقم اولتان نیز به‌عنوان ژنوتیپ‌های برتر انتخاب شدند.

واژه‌های کلیدی: تاریخ کاشت، تجزیه مقادیر منفرد، گزینش همزمان، میانگین وزنی نمرات مطلق، نمودار گرمایی

مقدمه

بالای اسیدهای چرب غیراشباع به‌ویژه اسید لینولئیک، از کیفیت بالایی برای تغذیه انسان برخوردار است (Weiss, 2000). دانه کنجد علاوه بر روغن و پروتئین، از نظر کلسیم و فسفر نیز غنی و منبع بسیار خوبی از ویتامین‌ها است. هم‌اکنون، نزدیک به ۹۰ درصد نیاز ایران به روغن، از خارج و با واردات تأمین می‌شود (Al-Nabi Amlishi, 2015).

کنجد (*Sesamum indicum* L.) گیاهی یکساله و از قدیمی‌ترین گیاهان دانه روغنی است که سازگاری بسیار خوبی به نواحی گرم و نیمه‌گرم دارد (Weiss, 2000) و دانه‌های آن درصد بالایی روغن (۴۵ درصد) و پروتئین (۱۹ تا ۲۵ درصد) دارند که بسته به نوع ژنوتیپ و شرایط محیطی می‌تواند تغییر کند (SajadiNik et al., 2011). روغن کنجد به‌دلیل فراوانی

که نمرات عامل‌های هر ایدئوتیپ با توجه به فاکتورهای مطلوب و نامطلوب طراحی شده‌اند. سپس، بر اساس فاصله ژنوتیپ-ایدئوتیپ، یک احتمال فضایی محاسبه می‌شود که رتبه‌بندی ژنوتیپ را ممکن می‌سازد. از این رو، ژنوتیپ دارای کمترین مقدار MTSI به ایدئوتیپ نزدیک‌تر است و میانگین عملکرد و ثبات بیشتری را در همه متغیرهای تحلیل شده نشان می‌دهد (Olivoto et al., 2019b).

روش‌های زیادی برای تجزیه پایداری پیشنهاد شده‌اند که روش‌های پارامتری (تک‌متغیره یا چندمتغیره) و ناپارامتری را در بر می‌گیرند. مدل اثرهای مختلط خطی (LMM)^۲ و روش برآوردگر حداکثر درست‌نمایی محدودشده (REML)^۳ از روش‌های مهمی هستند که برای تجزیه داده‌های آزمایش‌های چندمحیطی پیشنهاد شده‌اند (Olivoto et al., 2019a). در این راستا، با تجزیه به مؤلفه‌های اصلی یا تجزیه ارزش منفرد بر روی ماتریس، بهترین پیش‌بینی‌های ناریب خطی (BLUP)^۴ به‌دست آمده از برهمکنش ژنوتیپ و محیط انجام می‌شود (Olivoto et al., 2019a). در این روش، از شاخص پایداری میانگین وزنی نمرات مطلق بهترین پیش‌بینی‌های ناریب خطی (WAASB)^۵ و میانگین وزنی شاخص پایداری WAASB و متغیر وابسته (WAASBY)^۶ استفاده می‌شود (Olivoto et al., 2019b). در مطالعه‌ای، با ارزیابی ۱۴ ژنوتیپ کنجد در دو سال زراعی از روش REML برای ارزیابی معنی‌داری اثر ژنوتیپ، محیط و برهمکنش ژنوتیپ در محیط استفاده شد (Zeinalzadeh-Tabrizi et al., 2024). علاوه بر روش بالا، روش میانگین هارمونیک و عملکرد نسبی ارزش ژنوتیپی (HMRPGV)^۷ نیز برای ارزیابی پایداری ژنوتیپ‌ها بر پایه REML/BLUP پیشنهاد شده است (de Resende, 2007). روش HMRPGV اطلاعات مربوط به سازگاری، پایداری و عملکرد را در واحد اندازه‌گیری شده و در همان مقیاس صفت ارزیابی شده ارائه می‌دهد. هرچه انحراف معیار رفتار ژنوتیپی در محیط‌ها کمتر باشد، میانگین هارمونیک ارزش‌های ژنوتیپی آن‌ها در محیط‌های مختلف بیشتر خواهد بود (de Resende, 2007). بنابراین، انتخاب برای بالاترین مقادیر HMRPGV امکان انتخاب همزمان برای عملکرد و پایداری را فراهم می‌کند. از این روش، پژوهشگران برای ارزیابی پایداری پنبه (Faris et al., 2016) و گندم (Nascimento et al., 2022) بهره گرفته‌اند. هدف از پژوهش حاضر، شناسایی ژنوتیپ‌های با عملکرد بالا، پایدار از نظر عملکرد دانه و مطلوب از نظر سایر صفات با بهره‌گیری از شاخص‌های مدل اثرهای مختلط محیطی (LMM) است.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در مزرعه آزمایشی در ایستگاه تحقیقات کشاورزی بروجرد با عرض جغرافیایی ۳۳ درجه و ۴۴ دقیقه و طول جغرافیایی ۴۸ درجه و ۵۵ دقیقه با ارتفاع ۱۴۷۶ متر از سطح دریا با اقلیم سرد و خشک و میانگین بارندگی بلندمدت

سطح زیر کشت کنجد جهان در سال ۱۴۰۲، ۱۳۰۵۲۰۳۸ هکتار با میانگین عملکرد دانه ۵۲۰/۱ کیلوگرم در هکتار و با تولید ۶۷۸۸۸۸۱/۰۷ تن گزارش شده است. میزان سطح زیر کشت کنجد در سال میلادی ۲۰۲۳ در ایران ۴۲۰۰۰ هکتار و میانگین عملکرد ۶۹۰۵ کیلوگرم در هکتار و کل تولید کنجد در ایران ۲۹۰۰۰ تن گزارش شده است (FAO, 2023). کنجد یک محصول مهم دانه روغنی است که عمدتاً دانه‌های خوراکی آن برای تهیه کیک، آرد، سس، شیرینی‌سازی و روغن کشت می‌شود (Gharby et al., 2015; Moris, 2002). این دانه حاوی ۵۰ تا ۶۰ درصد روغن است که منبع خوبی از آنتی‌اکسیدان‌هایی مانند سزامولین، سزامول و توکوفرول است. دانه روغنی همچنین دارای کاربردهای آرایشی، دارویی و غذایی است (Pathak et al., 2014). کنجد به دلیل اهمیت ارزش غذایی، خاصیت دارویی، صنعتی و اقتصادی که دارد با افزایش حجم تولید در سراسر جهان به‌طور گسترده کشت می‌شود و به‌دنبال آن رقابت بالایی در بازار بین کشورهای تولیدکننده برای تجارت داخلی و بین‌المللی وجود دارد (Myint et al., 2020).

بهره‌برداری از پتانسیل تولید کنجد، مستلزم در دسترس بودن ارقام با کارایی کارایی بالا در محیط‌های مختلف است (Gauch et al., 2008). تحلیل کنجد از لحاظ اجتماعی-اقتصادی و تجزیه و تحلیل تنوع ژنتیکی کنجد باعث گسترش تولید کنجد در مناطق مختلف و به افزایش تولید آن کمک کند (Jean-Baptiste, 2017).

عملکرد محصول کنجد و سایر صفات کمی که تحت تأثیر عوامل محیطی قرار می‌گیرند، چالشی برای ارتقاء سطح تولید کنجد است. علاوه بر این، تغییر عملکرد در بین ارقام تحت شرایط یکسان یا متفاوت به تأثیر برهمکنش ژنوتیپ در محیط نسبت داده می‌شود (Kim et al., 2014).

شاخص‌های انتخاب جدید بر پایه انتخاب ژنوتیپ‌های برتر با استفاده از عملکرد و صفات مختلف به طور همزمان، مانند شاخص فاصله ژنوتیپ-ایدئوتیپ چندصفتی (Olivoto & Nardino, 2021)، شاخص چندصفتی بر اساس طرح ایدئوتیپ (Rocha et al., 2018) و شاخص پایداری چندصفتی (MTSI)^۱ (Olivoto et al., 2019b) معرفی شده‌اند.

برای معرفی یک رقم جدید زراعی، علاوه بر عملکرد دانه، ویژگی‌های زیاد دیگری نیز در نظر گرفته می‌شوند که بیشتر آن‌ها با یکدیگر و با عملکرد دانه همبستگی بالایی دارند. برای استفاده از چنین ویژگی‌هایی، شاخصی با نام شاخص پایداری چندصفتی (MTSI) را بر مبنای عاملی معرفی کردند که در آن عملکرد دانه و همه صفات اندازه‌گیری شده دیگر و پایداری هر کدام از آن‌ها به طور همزمان ارزیابی می‌شوند (Olivoto et al., 2019a).

شاخص پایداری چندصفتی (MTSI) یک شاخص انتخاب است که از میانگین عملکرد و پایداری ژنوتیپ با انتخاب چند صفت استفاده می‌کند. این شاخص مبتنی بر تحلیل عاملی است

^۵- Weighted average of absolute scores of best linear

^۶- Weighted average of WAASB and response variable

^۷- Harmonic mean and of the relative performance of genotypic values

^۱- Multi – trait stability index

^۲- Linear mixed-effects models

^۳- Restricted estimator maximum likelihood

^۴- Best linear unbiased predictors

داس قطع و جمع آوری گردید (Zavareh *et al.*, 2012). بوته‌های برداشت‌شده به‌صورت دسته‌بندی شده (باقته) مرتب شدند و چندین روز به‌صورت ایستاده نگه داشته شدند تا رطوبت آنها کاسته شود، سپس دسته‌ها به‌صورت وارونه روی پلاستیکی تکان داده شدند. این عملیات دو تا سه روز بعد دوباره تکرار شد تا کپسول‌های باز نشده طی این مدت باز شوند. دانه‌ها با استفاده از الک از کاه و کلش، کاملاً جدا و تمیز شدند. دانه‌های برداشت‌شده جداگانه با ترازوی دیجیتالی مدل GE2101 به‌طور دقیق توزین شدند.

برای تجزیه‌های آماری، بسته تجزیه آزمایش‌های چندمحیطی با نام Multi (Metan Ver.1.9.0) (environment trial analysis) (Olivoto *et al.*, 2019b)، در محیط نرم‌افزار R به‌کار گرفته شد. یکنواختی خطاهای آزمایشی در محیط‌ها با روش بارتلت آزموده شد و سپس تجزیه واریانس مرکب داده‌ها با فرض ثابت بودن اثر ژنوتیپ و تصادفی بودن اثر سال با روش حداکثر درستنمایی محدودشده (REML) انجام شد. معنی‌داری اثرهای تصادفی با آزمون نسبت درستنمایی (LRT) و اثرهای ثابت با روش کمترین مربعات آزموده شدند (Olivoto *et al.*, 2019a). برای برآورد کمیت‌های پایداری، تجزیه مقادیر منفرد (SVD) بر روی ماتریس بهترین پیش‌بینی‌های ناریب خطی (BLUP) به‌دست آمده از برهمکنش‌های ژنوتیپ در محیط با یک مدل اثر مختلط خطی (LMM) به‌کار برده شد. اجزای واریانس با روش حداکثر درستنمایی محدودشده (REML) برآورد شدند. پس از تجزیه واریانس داده‌ها، برای برآورد پارامترهای پایداری WAASB و WAASBY (برای انتخاب همزمان بر اساس میانگین عملکرد و پایداری) ریشه‌های مشخصه حاصل از تجزیه AMMI بر روی BLUP به‌کار برده شدند (روابط ۱ و ۲) و بهترین ژنوتیپ‌ها با این دو شاخص گزینش شدند (Olivoto *et al.*, 2019a). شاخص پایداری چندصفتی (MTSI) نیز از رابطه ۳ برآورد شد (Olivoto *et al.*, 2019b).

$$WAASB_i = \frac{\sum_{k=1}^p |IPCA_{ik} \times EP_k|}{\sum_{k=1}^p EP_k} \quad (\text{رابطه ۱})$$

$$WAASBY_i = \left\{ W_Y \times \left[\left(\frac{GY_i}{GY_{max}} \right) \times 100 \right] \right\} + \left[W_S \times \left(100 - \frac{WAASB_i}{WAASB_{min}} \right) \right] \quad (\text{رابطه ۲})$$

$$MTST_i = \left[\sum_{j=1}^f (F_{ij} - F_j) \right]^{0.5} \quad (\text{رابطه ۳})$$

در روابط ۱ و ۲، $WAASB_i$ ، میانگین وزنی قدرمطلق امتیازات ژنوتیپ نام، $IPCA_{ik}$ ، نمره ژنوتیپ نام در K امین محور مؤلفه اصلی برهمکنش (IPCA) و EP_k ، مقدار واریانس توجیه شده توسط K امین IPCA هستند. ژنوتیپ با کمترین مقدار $WAASB$ پایدار در نظر گرفته می‌شود (Olivoto *et al.*, 2019a). $WAASBY_i$ میانگین وزنی $WAASB$ و عملکرد دانه (GY) برای ژنوتیپ نام، W_Y وزن داده‌شده به متغیر پاسخ (در این مورد، عملکرد دانه)، GY_i میانگین عملکرد دانه ژنوتیپ نام با توجه به تمام محیط‌ها، GY_{max} بالاترین متوسط عملکرد دانه مشاهده‌شده، W_S وزن نسبت داده‌شده به شاخص پایداری (در این مورد، شاخص $WAASB$) و $WAASB_{min}$ ، کمترین مقدار $WAASB$ مشاهده‌شده در بین

۳۷۹/۸ میلی‌متر به‌مدت دو سال زراعی ۹۹-۱۳۹۸ و ۱۳۹۹-۴۰۰ انجام شد. این آزمایش به‌صورت فاکتوریل دو عاملی در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار انجام شد. عامل‌های آزمایش شامل چهار تاریخ کاشت (۲۳ خرداد، ۱۱ تیر، ۳۰ تیر و ۲۴ مرداد)، و چهار رقم و ژنوتیپ (داراب ۱، اولتان، هلیل و JL16) (جدول ۱) بودند.

آماده‌سازی زمین آزمایش در فروردین سال ۱۳۹۸ انجام شد. در مرحله آماده‌سازی زمین و پیش از کاشت، نمونه‌های مرکب از خاک مزرعه از عمق ۰-۳۰ سانتی‌متری به‌صورت تصادفی تهیه و ویژگی‌های فیزیکی شیمیایی آن در آزمایشگاه تعیین شدند. بر پایه نتایج آزمون خاک (۹/۲ میلی‌گرم در کیلوگرم فسفر قابل جذب و ۲۴۵ میلی‌گرم در کیلوگرم پتاسیم قابل جذب)، ۵۰ کیلوگرم در هکتار پتاسیم از منبع سولفات پتاسیم و ۵۰ کیلوگرم در هکتار فسفر از منبع سوپر فسفات تربیل به زمین داده شد. سولفات پتاسیم پیش از کاشت به زمین داده شد و با شن کش سبک با خاک مخلوط شد. کود فسفره پیش از کاشت و بعد از آماده‌سازی زمین به‌صورت نواری به فاصله ۵ سانتی‌متر پایین‌تر از محل کاشت بذور قرار گرفت. ۶۰ کیلوگرم در هکتار کود نیتروژن از منبع کود اوره (۴۶ درصد نیتروژن خالص) در سه نوبت (یک‌سوم همزمان با آبیاری دوم، یک‌سوم بلافاصله بعد از تنک و یک‌سوم در مرحله ۵۰ درصد گلدهی) مصرف شد. وجین علف‌های هرز به‌صورت دستی و از هفته سوم تا هنگام بسته‌شدن سایه‌انداز گیاهی انجام شد.

هر کرت آزمایشی شامل چهار ردیف پنج‌متری با فاصله ۵۰ سانتیمتر بود. فاصله بوته‌های روی هر ردیف ۱۰ سانتیمتر در نظر گرفته شد. آبیاری اول بلافاصله پس از کاشت به‌صورت سیستم نشتی انجام شد. آبیاری در مراحل رشد اولیه هر هفته یک بار و در مراحل انتهایی رشد گیاه هر ۱۰ تا ۱۴ روز یکبار بر اساس وضعیت ظاهری گیاه و خاک و میزان آب مشخص و به‌طور یکسان برای هر کرت انجام شد. برای اندازه‌گیری ارتفاع بوته، ارتفاع اولین کپسول از سطح خاک، تعداد کپسول در بوته و تعداد دانه در هر کپسول، از ده بوته هر کرت استفاده شد که پس از رسیدگی فیزیولوژیک، به‌طور تصادفی از هر کرت انتخاب شده بودند. میانگین داده‌های ده بوته در تجزیه واریانس داده‌ها استفاده شد. برای اندازه‌گیری وزن هزار دانه پس از برداشت بوته‌ها، خرمکوبی و بوجاری، دو نمونه ۵۰۰ تایی از بذر هر کرت به‌طور تصادفی انتخاب و میانگین وزن آنها به‌عنوان وزن هزاردانه انتخاب شد. برای به‌دست آوردن عملکرد دانه، بوته‌های یک مترمربع از ردیف‌های میانی پس از حذف اثر حاشیه‌ای برداشت، خرمکوبی و بوجاری شدند. وزن دانه این بوته‌ها به‌عنوان عملکرد در واحد یک متر مربع از زمین در نظر گرفته شد. درصد روغن دانه با استفاده از دستگاه سوکسله و استفاده از حلال تعیین شد. پس از رسیدگی فیزیولوژیک، همه بوته‌های دو متر مربع از دو ردیف وسط (هر کرت پس از حذف نیم متر از ابتدا و انتهای ردیف‌ها به‌عنوان حاشیه) برداشت و محصول (کلید یا مرحله رشدی ۳/۰۹ مراحل رشدی ثانویه) کنجد که حداقل تعداد دو کپسول از ساقه اصلی در قسمت میانی ساقه دارای نوک تیره یا خط تیره) از محل طوقه توسط

$$HMGV = \frac{I}{\sum_{i=1}^I \frac{1}{GV_{ij}}} \quad (\text{رابطه ۴})$$

$$RPGV = \frac{1}{I} \left[\frac{\sum_{i=1}^I GV_{ij}}{\mu_j} \right] \quad (\text{رابطه ۵})$$

$$HMRPGV = \frac{I}{\sum_{i=1}^I RPGV_{ij}} \quad (\text{رابطه ۶})$$

در این روابط، μ_j میانگین کلی برای هر محیط j ، و $I =$ تعداد محیط‌ها هستند. در رابطه $U_j + g_i + ge_{ij}$: GV_{ij} : ارزش ژنوتیپی i امین ژنوتیپ و محیط خاص j ، U_j : میانگین محیط i ، و g_i و ge_{ij} : به ترتیب ارزش‌های BLUP ژنوتیپ i و برهمکنش بین ژنوتیپ j و محیط i هستند.

ژنوتیپ‌ها هستند. در رابطه ۳، MTSI شاخص پایداری چندصفحتی برای ژنوتیپ i ام، F_{ij} ، نمره i ام ژنوتیپ j ام، و F_j ، نمره j ام ژنوتیپ ایده‌آل هستند. از شاخص میانگین هارمونیک ارزش‌های ژنوتیپی (HMGV)^۱، مقادیر پایداری ژنوتیپی به دست آمدند (رابطه ۴). سازگاری ژنوتیپ‌ها بر پایه شاخص عملکرد نسبی ارزش‌های ژنوتیپی (RPGV)^۲ (رابطه ۵) ارزیابی شد و شاخص میانگین هارمونیک و عملکرد نسبی ارزش ژنوتیپی (HMRPGV) (رابطه ۶)، برای ارزیابی همزمان پایداری، سازگاری و عملکرد دانه استفاده شد (de Resende, 2007).

جدول ۱- نام و کد ژنوتیپ‌های کنجد مورد مطالعه

Table 1. Name, origin, and code of sesame genotypes

نام ژنوتیپ (Genotype name)	کد (Code)	نام ژنوتیپ (Genotype name)	کد (Code)
داراب ۱	G1	هلیل	G3
اولتان	G2	JL16	G4

نتایج و بحث

ارزیابی فاکتورهای تصادفی و ثابت، برآورد اجزای واریانس و تخمین میانگین‌های پیش‌بینی شده

آزمون اسکری^۳ نشان داد که سه مؤلفه اصلی اول، به ترتیب ۷۲/۷، ۲۴/۵ و ۲/۷ درصد از تغییرات برهمکنش ژنوتیپ × محیط (تاریخ کاشت) به دست آمده از BILUP را برای عملکرد دانه و روی هم صد درصد از تغییرات را توجیه کردند. اثر سه مؤلفه اصلی اول در برهمکنش ژنوتیپ × محیط معنی‌دار بود (نتایج ارائه نشده‌اند). بزرگی درصد توجیه واریانس کل توسط هریک از مؤلفه‌ها در تفکیک بهتر ژنوتیپ‌ها و اعتبار روابط مشاهده شده مؤثر است. در روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی، ترکیب خطی متغیرها برای تبیین بیش‌ترین مقدار واریانس آن‌ها به گونه‌ای برآورد می‌شود که اولین مؤلفه، بیشترین واریانس متغیرها را تبیین کند و مؤلفه دوم، بیشترین مقدار واریانس باقیمانده را بعد از مؤلفه اول توضیح می‌دهد که توسط مؤلفه اول بیان نشده است (Sharifi, 2020).

همانند نتیجه پژوهش حاضر، محققان دیگر نیز سهم نسبتاً بالای مؤلفه‌های اصلی اول در توجیه برهمکنش ژنوتیپ × محیط در کنجد را گزارش کردند (Kindeya et al., 2020; Bakhshi et al., 2021). با توجه به تصادفی بودن اثر محیط و برهمکنش ژنوتیپ × محیط، از آزمون نسبت درستمایی (LRT)^۴ برای ارزیابی آن‌ها استفاده شد. نتایج نشان دادند که اثرات محیط (تاریخ کاشت) و برهمکنش ژنوتیپ در محیط بر عملکرد زیست‌توده، تعداد دانه در کپسول و درصد روغن معنی‌دار بودند. با توجه به ثابت بودن اثر ژنوتیپ، برای ارزیابی آن از روش کمترین میانگین مربعات استفاده شد. نتایج نشان دادند که اثر ژنوتیپ بر همه صفات عملکرد زیست‌توده، تعداد دانه در کپسول و درصد روغن معنی‌دار بود (جدول ۲). نسبت اجزای واریانس برآورد شده با روش حداکثر درستمایی محدود شده (REML) به واریانس فنوتیپی نشان داد که ۸۴/۰۳ درصد از واریانس فنوتیپی عملکرد دانه به وسیله واریانس برهمکنش ژنوتیپ در محیط توجیه شد (جدول ۳). اثر ژنوتیپ،

تنها توجیه کننده ۲۳/۶ درصد از واریانس برآورد شده بود و ۹/۷۳ درصد واریانس نیز توسط اثر باقیمانده توجیه گردید (جدول ۳). اثر باقیمانده عمدتاً به اثر محیط مربوط می‌شود که با توجه به تفاوت‌های زیاد بین محیط‌های آزمایشی از نظر ویژگی‌های حرارتی، مقدار و پراکنش بارندگی و سایر عوامل قابل توجیه است. نتایج تحقیقات محققان روی کنجد نیز نشان دادند که بخش عمده واریانس توسط اثر محیط توجیه شد (Hamza & Abd El-Salam, 2015; Azon et al., 2023). پژوهشگران دیگری نیز برهمکنش معنی‌دار ژنوتیپ × محیط را بر عملکرد دانه کنجد با تجزیه واریانس به روش کمترین مربعات (Azon et al., 2023; Daba et al., 2014) و روش درست‌نمایی محدود شده (Zeinalzadeh-Tabrizi et al., 2024) گزارش کردند. برهمکنش معنی‌دار ژنوتیپ در محیط بیانگر این است که عملکرد ژنوتیپ‌ها از محیطی به محیط دیگر دارای نوسان است، بنا بر این برآورد بهترین پیش‌بینی‌های ناریب خطی (BLUP ها) و انجام تجزیه AMMI بر روی آن‌ها می‌تواند به شناسایی پایدارترین ژنوتیپ‌ها کمک کند (Olivoto et al., 2019a).

تفسیر بای‌پلات

بای‌پلات نوع سوم (عملکرد دانه در برابر میانگین وزنی نمرات مطلق یا WAASB) به چهار بخش یا چارک تقسیم شد (شکل ۱) که در آن ژنوتیپ‌ها از نظر پایداری با شاخص WAASB و میانگین عملکرد دانه به طور همزمان ارزیابی می‌شوند. در چارک اول (ربع I)، رقم هلیل با توجه به سهم زیاد در برهمکنش ژنوتیپ × محیط، ژنوتیپ ناپایدار و دارای عملکرد کمتر از متوسط کل بود (Olivoto et al., 2019 b). در چارک دوم (ربع II)، رقم داراب ۱ و ژنوتیپ JL16 با وجود داشتن عملکرد بالاتر از میانگین کل، به دلیل مقدار بالای WAASB، ناپایدار هستند. محیط‌های واقع در این ناحیه (به ویژه محیط دو) به دلیل داشتن مقادیر بالای متغیر پاسخ و همچنین توانایی تشخیص خوب می‌توانند به صورت ویژه مورد توجه واقع شوند. محیط‌های ناحیه سوم، محیط‌های با قابلیت تشخیص پایین و

¹- Harmonic mean of genotypic values, HMGV

²- Relative Performance of Genotypic Values, RPGV

³- Sreect test

⁴- Likelihood ratio tests

ژنوتیپ‌های سازگار برای محیط‌های ویژه کاربرد بیشتری دارند. مهم‌ترین مزیت این بای‌پلات نسبت به دو بای‌پلات AMMI، بهره‌گیری از همه مخورهای مؤلفه‌های اصلی در محاسبه آن است که از آن بخشی از برهمکنش ژنوتیپ × محیط که در مؤلفه‌های اصلی اول و دوم بروز پیدا نکرده است را نیز در رتبه‌بندی ژنوتیپ‌ها به‌کار می‌برد (Olivoto *et al.*, 2019 a). به‌علاوه، در رسم این نمودار بای‌پلات (شکل ۱) رویکرد مدل مختلط به‌کار برده می‌شود که امکان تخمین پارامترهای مهم در ژنتیک کمی همچون واریانس‌های ژنوتیپی، برهمکنش ژنوتیپ × محیط (تاریخ کاشت)، وراثت‌پذیری عمومی، وراثت‌پذیری براساس میانگین و همبستگی‌های ژنتیکی واریانس را هم فراهم می‌کند (Olivoto *et al.*, 2019 b).

دارای عملکرد پایین بودند. ژنوتیپ‌های واقع در چارک چهارم (ربع IV) به‌دلیل بزرگی متغیر پاسخ (دارا بودن عملکرد بالا) و پایداری عملکرد بالا (مقادیر پایین WAASB)، بسیار پرمحصول و دارای پایداری عملکرد بیشتری هستند که شامل رقم اولتان بود. با توجه به این که در محاسبه شاخص WAASB، کلیه مؤلفه‌های اصلی به‌کار گرفته شدند، پایداری عملکرد را به‌شکل بهتری نشان می‌دهند و ژنوتیپ‌های برگزیده با این شاخص از پایداری مطمئن‌تری برخوردار هستند. بای‌پلات $WAASB \times GY$ (شکل ۲) که تفسیر همزمان پایداری و عملکرد را انجام می‌دهد، می‌تواند برای شناسایی ژنوتیپ‌های پایدار برای همه محیط‌ها به‌کار رود، حال آنکه نمودارهای بای‌پلات AMMI1 و AMMI2 برای شناسایی

جدول ۲- ارزیابی معنی‌داری فاکتورها در مدل مختلط برای اثرهای تصادفی با آزمون نسبت درستنمایی و برای اثر ثابت ژنوتیپ با تجزیه واریانس
Table 2. Evaluating the significance of factors for random effects by LRT(χ^2) and for fixed effects by ANOVA

منابع تغییرات SOV	عملکرد دانه Seed yield	وزن هزار دانه 1000-seed weight	ارتفاع بوته Plant height	عملکرد زیست‌توده Biological yield	تعداد کپسول در بوته Number of capsules per plant
ژنوتیپ Gen	0.584 ns	0.99 ns	3.670 ns	2.452 *	2.061 ns
LRT (χ^2) Likelihood ratio test					
ژنوتیپ Gen	کای اسکوتر χ^2	کای اسکوتر χ^2	کای اسکوتر χ^2	کای اسکوتر χ^2	کای اسکوتر χ^2
ژنوتیپ Gen	0.300 ns	0.0001 ns	3.012 ns	1.3122 ns	0.8197 ns
محیط Env.	16.495 **	42.963 **	36.328 **	27.857 **	32.607 **
ژنوتیپ × محیط Env × Gen	81.571 **	2.4331 ns	73.58 **	5.5150 *	4.9548 *

**, * و ns: به‌ترتیب اختلافات معنی‌دار در سطوح احتمال ۰/۰۱ و ۰/۰۵ و عدم معنی‌داری.
**, * and ns: significant differences at the probability levels of 0.01 and 0.05 and non-significance, respectively.

ادامه جدول ۲- ارزیابی معنی‌داری فاکتورها در مدل مختلط برای اثرهای تصادفی با آزمون نسبت درستنمایی و برای اثر ثابت ژنوتیپ با تجزیه واریانس

Table 2 (Continued). Evaluating the significance of factors for random effects by LRT(χ^2) and for fixed effects by ANOVA

منابع تغییرات SOV	تعداد دانه در کپسول Number of seeds in the capsule	تعداد شاخه در بوته Number of branches	درصد روغن Oil percentage	عملکرد روغن Oil yield	عملکرد کاه Straw yield
ژنوتیپ Gen	2.450 *	1.620 ns	10.36 **	2.212 ns	0.6396 ns
LRT (χ^2) Likelihood ratio test					
ژنوتیپ Gen	کای اسکوتر χ^2	کای اسکوتر χ^2	کای اسکوتر χ^2	کای اسکوتر χ^2	کای اسکوتر χ^2
ژنوتیپ Gen	1.309 ns	0.388 ns	11.580 **	1.003 ns	0.0001 ns
محیط Env.	25.531 **	10.92 **	67.053 **	20.04 **	21.0017 **
ژنوتیپ × محیط Env × Gen	0.2526 **	0.001 ns	35.925 **	41.74 **	1.2606 ns

**, * و ns: به‌ترتیب اختلافات معنی‌دار در سطوح احتمال ۰/۰۱ و ۰/۰۵ و عدم معنی‌داری.
**, * and ns: significant differences at the probability levels of 0.01 and 0.05 and non-significance, respectively.

جدول ۳- برآورد اجزای واریانس با روش حداکثر درست‌نمایی محدودشده برای صفات مطالعه‌شده

Table 3. Estimation of variance components by REML for the studied traits

پارامترهای برآوردشده به روش حداکثر درست‌نمایی محدودشده REML	اجزای واریانس برآورده Estimates of variance components (%)	عملکرد دانه Seed yield	وزن هزار دانه 1000-seed weight	ارتفاع بوته Plant height	عملکرد زیست‌توده Biological yield	تعداد کپسول در بوته Number of capsules per plant
Genotypic variance	واریانس ژنوتیپی σ^2_g (درصد از واریانس)	541.5 (6.235)	1.641e-11 (1.33)	53.01 (23.45)	2004 (8.850)	5.997 (6.505)
variance of Genotype × Environment	واریانس ژنوتیپ در محیط σ^2_{gei} (درصد از واریانس)	7297 (84.03)	0.02471 (18.77)	151.7 (67.09)	6242 (27.57)	24.71 (26.80)
Variance of residual value	واریانس باقیمانده σ^2_e (درصد از واریانس)	845.2 (9.733)	0.09878 (80.23)	21.41 (9.469)	14397 (63.58)	61.49 (66.70)
Phenotypic variance	واریانس فنوتیپی σ^2_p	8684	0.1814	226.1	22643	92.20
General heritability	وراثت‌پذیری عمومی h^2_g	0.06235	0.1545	0.2345	0.08850	0.06505
Detection coefficient of GEI effects	ضریب تشخیص اثرهای R^2_{gei}	0.8403	0.3126	0.6709	0.2757	0.2680
Average genotypic heritability	وراثت‌پذیری میانگین ژنوتیپی h^2_{mg}	0.3637	0.8152	0.7275	0.5922	0.5149
F value for environment effects	مقدار F برای اثرات محیطی (E/F)	9.387**	52.5 **	30.18**	19.9**	15.56 **
Genotype selection accuracy	دقت انتخاب ژنوتیپ As	0.6031	0.9029	0.8530	0.7695	0.7175
Correlation between genotypic values among environments	همبستگی بین مقادیر ژنوتیپی در میان محیط‌ها rge	0.8962	0.3697	0.8763	0.3024	0.2866
Genotypic coefficient of variation (CVg)	ضریب تغییرات ژنوتیپی CVg (%)	14.42	6.260	15.17	8.942	8.839
Residual coefficient of variation (CVr)	ضریب تغییرات مقادیر باقیمانده CVr (%)	18.01	11.63	9.639	23.97	28.30
CVg/CVr ratio	نرخ ضریب تغییرات ژنوتیپی بر ضریب تغییرات مقادیر باقیمانده CVg/CVe ratio	0.8004	0.5384	1.573	0.3731	0.3123
Standard deviation (SD)	انحراف معیار	154.25	0.05	35.82	362.41	21.24
Standard error (SE)	خطای استاندارد	15.83	0.92	3.67	37.18	2.18

** : اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۱.

** : A significant difference at the probability level of 0.01.

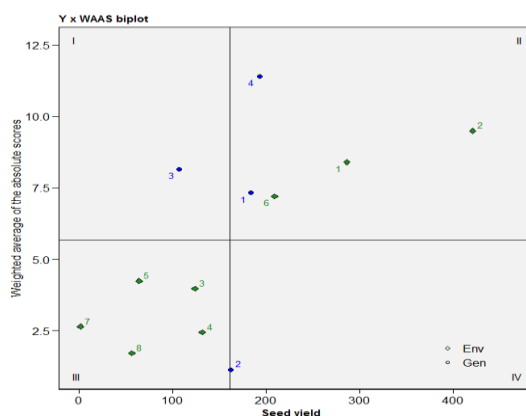
ادامه جدول ۳- برآورد اجزای واریانس با روش حداکثر درست‌نمایی محدودشده برای صفات مطالعه شده

Table 3 (Continued). Estimation of variance components by REML for the studied traits

پارامترهای برآوردشده به روش حداکثر درست‌نمایی محدودشده REML	اجزای واریانس برآورده Estimates of variance components (%)	تعداد دانه در کپسول Number of seeds in the capsule	تعداد شاخه در بوته Number of branches	درصد روغن Oil percentage	عملکرد روغن Oil yield	عملکرد کاه Straw yield
Genotypic variance	واریانس ژنوتیپی σ^2_g (درصد از واریانس)	2.349 (11.55)	0.009964 (2.517)	13.88 (48.48)	258.8 (11.07)	0.1 (0.2)
variance of Genotype × Environment	واریانس ژنوتیپ در محیط σ^2_{gei} (درصد از واریانس)	10.45 (51.35)	0.01 (0.02)	10.42 (36.39)	1524 (65.17)	1870 (13.70)
Variance of residual value	واریانس باقیمانده σ^2_e (درصد از واریانس)	7.549 (37.11)	0.3859 (97.46)	4.336 (15.14)	555.7 (23.76)	11780 (86.30)
Phenotypic variance	واریانس فنوتیپی σ^2_p	20.34	0.3958	28.64	2339	13651
General heritability	وراثت‌پذیری عمومی h^2_g	0.1155	0.02517	0.4848	0.1107	0.01
Detection coefficient of GEI effects	ضریب تشخیص اثرهای R^2_{gei}	0.5135	0.01	0.3639	0.6517	0.1370
Average genotypic heritability	وراثت‌پذیری میانگین ژنوتیپی h^2_{mg}	0.5918	0.3826	0.9035	0.5478	0.01
F value for environment effects	مقدار F برای اثرات محیطی (E/F)	102**	4.801**	89.87**	11.07**	10.76**
Genotype selection accuracy	دقت انتخاب ژنوتیپ As	0.7693	0.6186	0.9505	0.7401	0.02
Correlation between genotypic values among environments	همبستگی بین مقادیر ژنوتیپی در میان محیط‌ها rge	0.5805	0.02	0.7062	0.7328	0.1370
Genotypic coefficient of variation (CVg)	ضریب تغییرات ژنوتیپی CVg (%)	3.371	3.132	8.601	19.39	0.001
Residual coefficient of variation (CVr)	ضریب تغییرات مقادیر باقیمانده CVr (%)	6.043	19.49	4.806	28.41	31.99
CVg/CVr ratio	نرخ ضریب تغییرات ژنوتیپی بر ضریب تغییرات مقادیر باقیمانده CVg/CVe ratio	0.5578	0.1607	1.789	0.6825	0.01
Standard deviation (SD)	انحراف معیار	18.93	0.88	17.66	81.77	238.97
Standard error (SE)	خطای استاندارد	1.94	0.09	1.81	8.39	24.52

** : اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۱.

** : A significant difference at the probability level of 0.01.



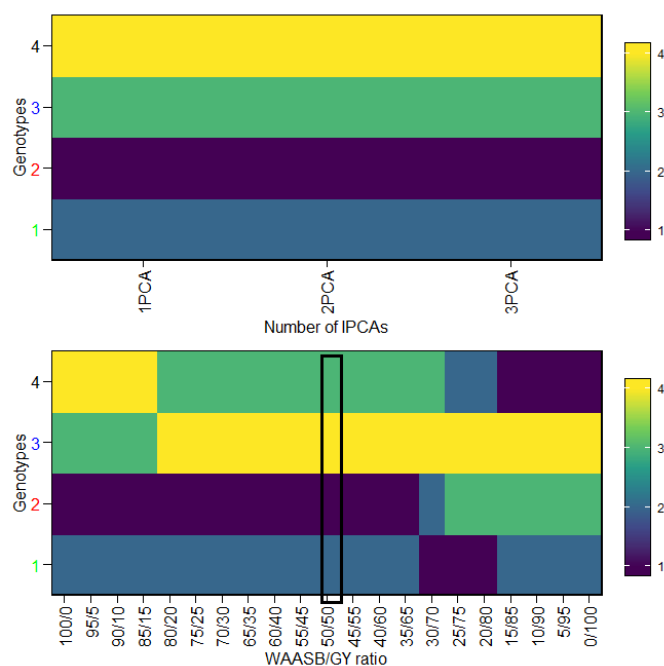
شکل ۱- بای پلات عملکرد دانه در مقابل WAASB، دایره در گوشه سمت راست، یک ژنوتیپ فرضی بسیار پرمحصول و کاملاً پایدار و پیکان‌های افقی و عمودی آبی در گوشه سمت چپ، به ترتیب جهت افزایش عملکرد و پایداری را نشان می‌دهند.

Figure 1. The biplot of the seed yield vs WAASB. The circle in the right corner and horizontal and vertical blue arrows in the left corner indicate a hypothetical highly productive and broadly adapted genotype and the direction of the increase in yield and stability, respectively.

دیگر داشتند. در این نمودار، با توجه به وزن‌های مختلف بر پایه هر کدام از دو شاخص پایداری دانه، می‌توان ژنوتیپ‌های برتر را شناسایی کرد. بر اساس وزن ۵۰: ۵۰ برای دو شاخص پایداری عملکرد و عملکرد دانه (WAASBY)، ارقام داراب ۱ و اولتان نسبت به ارقام و ژنوتیپ‌های دیگر برتر بودند. در سمت چپ این نمودار، ارقام و ژنوتیپ‌ها بر پایه نمود عملکرد و پایداری به چهار خوشه تقسیم شدند، در خوشه اول، رقم داراب ۱ (سبز رنگ) دارای عملکرد بالا و پایدار بودند. رقم اولتان در خوشه دوم (قرمز رنگ) کم‌محصول و پایدار، رقم کم‌محصول و ناپایدار در خوشه سوم (آبی رنگ) بودند. در خوشه چهارم، ژنوتیپ‌ها پرمحصول (مشکی رنگ) و ناپایدار بودند.

رتبه‌بندی ژنوتیپ‌ها با توجه به وزن‌دهی شاخص پایداری و متغیر وابسته (عملکرد دانه)

در ستون‌های مختلف شکل ۲، وزن‌های متفاوتی به متغیر وابسته و شاخص پایداری داده شده است، به‌طوری‌که در اولین ستون سمت چپ و براساس وزن‌دهی ۱۰۰ برای شاخص پایداری WAASB، ارقام داراب ۱ و اولتان (با توجه به رنگ و راهنمای نمودار) پایدارترین ژنوتیپ‌ها بودند. در هر ستون از چپ به راست، بر وزن متغیر پاسخ به اندازه پنج درصد افزوده و از وزن شاخص پایداری (WAASB) به‌میزان پنج درصد کاسته شد، به‌طوری‌که در آخرین ستون سمت راست، رتبه‌بندی ژنوتیپ‌ها فقط بر اساس عملکرد دانه بود. بر این اساس، رقم داراب ۱ و ژنوتیپ JL16 عملکرد بیشتری در مقایسه با ارقام



شکل ۲- رتبه‌بندی ژنوتیپ‌های کنجد بر اساس وزن‌دهی‌های مختلف برای پایداری و عملکرد دانه

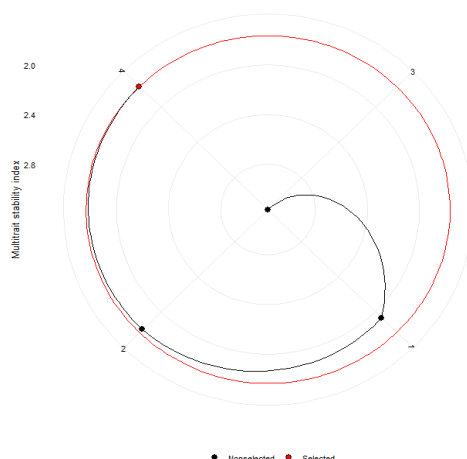
Figure 2. Ranking sesame genotypes based on different weights for stability and seed yield

این دو ژنوتیپ به ترتیب ۱۴۴ و ۱۲۰ گرم در مترمربع بودند. با فرض انتخاب این دو ژنوتیپ با رتبه‌بندی برتر برای عملکرد دانه، انتظار افزایش ۱۶/۶ درصدی نسبت به میانگین کل (۱۶۱/۴ گرم در متر مربع) وجود دارد. از آنجاکه این شاخص، هم پایداری و هم سازگاری را بیان می‌کند، نشان‌دهنده ظرفیت پاسخ ژنوتیپی مثبت به بهبود شرایط محیطی و پایداری ژنوتیپ‌ها و ارقام است. پایداری رقم داراب ۱ و ژنوتیپ JL16 با مقادیر شاخص HMRPGV برابر با ۰/۸۹۵ و ۰/۷۴ بود که رقم داراب ۱، ۱۳/۶ درصد را نسبت به میانگین کلی عملکرد دانه نشان داد. اهمیت سازگاری در اصلاح نباتات، توجه تلاش به‌نژادگر برای شناسایی رفتار مطلوب در رقم تازه معرفی شده است (Ceccarelli, 1989). روش HMRPGV مشابه روش لین و بینز (Lin & Binns, 1991) است. با این حال، بر خلاف این روش که بر نتایج فنوتیپی استوار است، روش HMRPGV همزمان داده‌های عملکرد دانه، سازگاری و پایداری را در یک زمینه ژنوتیپی پردازش می‌کند (de Resende, 2007).

شاخص پایداری چندصفتی (MTSI) و انتخاب ژنوتیپ نزدیک به ایده‌آل

رتبه‌بندی ژنوتیپ‌ها در نمودارهای بالا فقط بر اساس عملکرد و پایداری عملکرد دانه انجام شده است، حال آن‌که در شکل ۳ و بر اساس شاخص پایداری چندصفتی (MTSI)، ژنوتیپ JL16 و رقم اولتان به‌عنوان رقم و ژنوتیپ برگزیده از ارقام دیگر جدا شدند. دایره قرمز، نقطه برش را نشان می‌دهد. در گزینش ژنوتیپ با شاخص MTSI، علاوه بر نمود هر صفت، به پایداری آن نیز توجه شده است، بنا بر این، این شاخص یک فرآیند گزینش منحصر به فرد و آسان است (Olivoto *et al.*, 2019b; Pezeshkpour *et al.*, 2024).

طبق تجزیه پایداری ژنوتیپ‌ها با استفاده از میانگین هارمونیک و عملکرد نسبی ارزش ژنوتیپی بر اساس نتایج شاخص HMGV (جدول ۴)، رقم داراب ۱ و ژنوتیپ JL16 عملکرد بهتری نسبت به بقیه ارقام داشتند. حاصلضرب شاخص HMRPGV و میانگین کلی ($HMRPGV * \mu$) برای



شکل ۳- رتبه‌بندی ژنوتیپ‌ها بر پایه شاخص پایداری چندصفتی (MTSI)
Figure 3. Genotype ranking based on the multi-trait stability index (MTSI)

جدول ۴- رتبه‌بندی ژنوتیپ‌ها بر پایه پارامترهای سازگاری ارزش‌های ژنوتیپی برای عملکرد دانه ژنوتیپ‌های کنجد
Table 4. Ranking sesame genotypes based on the adaptability parameters of genotypic values for the seed yield of sesame genotypes

sesame genotypes									
رتبه	عملکرد تصحیح شده بر مبنای HMRPGV	میانگین هارمونیک عملکرد نسبی ارزش ژنوتیپی	رتبه	تصحیح شده بر مبنای RPGV	نسبی ارزش های ژنوتیپی	رتبه	هارمونیک ارزش های ژنوتیپی	عملکرد دانه	ژنوتیپ
	HMRPGV_Y	HMRPGV		RPGV_Y	RPGV		HMGV	GY	GE
	144	0.895	1	170	1.06	3	3	183.6	G1
	139	0.861	4	156	0.966	4	4	162.3	G2
	106	0.654	3	158	0.979	1	1	106.8	G3
	120	0.74	2	161	0.999	2	2	192.9	G4

در رتبه دوم گزینش نمود. بر پایه شاخص HMRPGV، ژنوتیپ‌های یک و چهار علاوه بر عملکرد بالا، از پایداری و سازگاری بالایی نیز برخوردار بودند. در مجموع و بر اساس تمام تجزیه‌ها، ژنوتیپ JL16 و رقم اولتان پایدارترین ژنوتیپ‌ها بودند که علاوه بر عملکرد دانه، از نظر سایر صفات اندازه‌گیری-شده نیز بر ارقام دیگر برتری داشتند و می‌توانند نامزد معرفی به‌عنوان ارقام جدید باشند. ژنوتیپ شماره چهار (JL16)، جدیداً به‌عنوان رقم زراعی مینا معرفی و ثبت گردیده است.

نتیجه‌گیری کلی

بر پایه بای‌پلات نوع سوم، رقم اولتان دارای عملکرد دانه بیشتر از متوسط عملکرد ژنوتیپ‌ها و پایداری بیشتری نسبت به ژنوتیپ‌های دیگر بود. رتبه‌بندی ژنوتیپ‌ها بر پایه وزن‌های متفاوت برای متغیر وابسته و شاخص پایداری (WAASB) نشان داد که ژنوتیپ‌های یک و دو پرمحصول و سازگار بودند. شاخص گزینش چندصفتی (MTSI) بر پایه تجزیه عاملی، ژنوتیپ چهار در رتبه اول و رقم اولتان را به‌عنوان ژنوتیپ برتر

References

- Al-Nabi Amlishi, S. S. (2015). Analysis of import and export trends of basic agricultural products and its role in self-sufficiency coefficient. Ministry of Agriculture, Publications of the Institute for Planning Research, *Agricultural Economics and Rural Development*. 77 pp.
- Azon, C.F., Hotegni, V.N.F., Sogbohossou, D.E.O., Gnanglè, L.S., Bodjrenou, G., Adjé, C.O., Dossa, K., Agbangla, C., Quenum, F.J. & Achigan-Dako, E.G. (2023). Genotype× environment interaction and stability analysis for seed yield and yield components in sesame (*Sesamum indicum* L.) in Benin Republic using AMMI, GGE biplot and MTSI. *Heliyon*, 9(11) <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e21656>
- Bakhshi, B., Ghodrati, G., & Keshtgar Khajedad, M. (2021). Compatibility assessment of the sesame promising lines in the Sistan region using multivariate analysis methods. *Journal of Crop Breeding*, 13(39), 87-97. <https://doi.org/10.52547/jcb.13.39.87>. [In Persian]
- Ceccarelli, S. (1989). Wide adaptation: How wide? *Euphytica*, 40, 197-205. <https://doi.org/10.1007/BF00024512>
- Daba, C., Ayana, A., Zeleke, H., & Wakjira, A. (2014). Association of stability parameters and yield stability of sesame (*Sesamum indicum* L.) genotypes in Western Ethiopia. *East African Journal of Sciences*, 8(2), 125-134.
- Farias, F. J., de carvalho, L. P., da Silva Filho, J. L., & Teodoro, P. E. (2016). Usefulness of the HMRPGV method for simultaneous selection of upland cotton genotypes with greater fiber length and high yield stability. *Genetics and Molecular Research*, 15(3), 1-7. <http://dx.doi.org/10.4238/gmr.15038439>
- FAO. (2023). Agricultural Data: agriculture and food trade. In Food and Agriculture Organization of the United Statistics Division (<http://faostat.fao.org>).
- Gauch Jr, H. G., Piepho, H. P., & Annicchiarico, P. (2008). Statistical analysis of yield trials by AMMI and GGE: Further considerations. *Crop Science*, 48(3), 866-889. <https://doi.org/10.2135/cropsci2007.09.0513>
- Gharby, S., Harhar, H., Bouzoubaa, Z., Asdadi, A., El Yadini, A., & Charrouf, Z. (2017). Chemical characterization and oxidative stability of seeds and oil of sesame grown in Morocco. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 16(2), 105-111. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2015.03.004>
- Hamza, M., & Abd El-Salam, R. M. (2015). Optimum planting date for three sesame cultivars growing under sandy soil conditions in Egypt. *American-Eurasian Journal of Agriculture and Environmental Science*, 15(5), 868-877. <https://doi.org/10.5829/idosi.aejas.2015.15.5.12655>
- Kim, J., Lee, T., Lee, H. J., & Kim, H. (2014). Genotype-environment interactions for quantitative traits in Korea Associated Resource (KARE) cohorts. *BMC Genetics*, 15, 1-9. <https://doi.org/10.1186/1471-2156-15-18>
- Kindeya, Y. B., Mekbib, F., & Alle, E. A. (2020). Genotype x environment interaction and AMMI analysis of oil yield sesame (*Sesamum indicum* L.) Genotypes in northern Ethiopia. *American Journal of Life Sciences*, 5, 165-171. <https://doi.org/10.11648/j.ajls.20200805.22>
- Nascimento, M. R., Daher, R. F., Santos, P. R. D., & Souza, A. G. D. (2022). Adaptability and stability of black and purple bean genotypes. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 52, e71631. <https://doi.org/10.1590/1983-40632022v5271631>
- Morris, J. B. (2002). Food, industrial, nutraceutical, and pharmaceutical uses of sesame genetic resources, Book chapter; Conference paper: Trends in new crops and new uses Proceedings of the Fifth National Symposium, Atlanta, Georgia, USA, 10-13 November, 153-156. ASHS Press.
- Myint, D., Gilani, S. A., Kawase, M., & Watanabe, K. N. (2020). Sustainable sesame (*Sesamum indicum* L.) production through improved technology: An overview of production, challenges, and opportunities in Myanmar. *Sustainability*, 12(9), 3515. <https://doi.org/10.3390/su12093515>
- Olivoto, T., Lúcio, A. D., da Silva, J. A., Marchioro, V. S., de Souza, V. Q., & Jost, E. (2019a). Mean performance and stability in multi-environment trials I: combining features of AMMI and BLUP techniques. *Agronomy Journal*, 111(6), 2949-2960. <https://doi.org/10.2134/agronj2019.03.0220>
- Olivoto, T., Lúcio, A. D., da Silva, J. A., Sari, B. G., & Diel, M. I. (2019b). Mean performance and stability in multi-environment trials II: Selection based on multiple traits. *Agronomy Journal*, 111(6), 2961-2969. <https://doi.org/10.2134/agronj2019.03.0221>
- Olivoto, T., & Nardino, M. (2021). MGIDI: Toward an effective multivariate selection in biological experiments. *Bioinformatics*, 37(10), 1383-1389. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btaa981>
- Patel, M. K., Tiwari, D., Sharma, V., & Singh, D. (2024). Assessment of Genotype X Environment Interaction and Seed Yield Stability in Sesame (*Sesamum indicum* L.) Using AMMI Analysis. *Journal of Scientific Research and Reports*, 30(1), 63-70.
- Pathak, N., Rai, A. K., Kumari, R., & Bhat, K. V. (2014). Value addition in sesame: A perspective on bioactive components for enhancing utility and profitability. *Pharmacognosy Reviews*, 8(16), 147. <https://doi.org/10.4103/0973-7847.134249>
- Pezechkpour, P., Amiri, R., Karami, I., & Mirzaei, A. (2024). Evaluation of Seed Yield Stability of Lentil Genotypes Based on REML/BLUP and Multi-Trait Stability Index (MTSI). *Journal of Crop Breeding*, 16(2), 42-52. <https://doi.org/10.61186/jcb.16.2.42>. [In Persian]

- Jean-Baptiste, Y. Q. (2017). Analysis of a Mini Core of Sesame (*Sesamum indicum* L.) Accessions Based on Seed Morphometric Data. *Journal of Agricultural Studies*, 5(4), 2166-0379.
- de Resende, M. D. V. (2007). Matemática e estatística na análise de experimentos e no melhoramento genético. Colombo: Embrapa Florestas, 2007.
- Rocha, J. R., Machado, J. C., & Carneiro, P. C. S. (2018). Multitrait index based on factor analysis and ideotype-design: Proposal and application on elephant grass breeding for bioenergy. *GCB Bioenergy*, 10(1), 52-60. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12443>
- SajadiNik, R., A. Yadavi., & H. Faraji. (2011). Evaluation of the effect of urea, organic and biologic fertilizer on quality and quantity of sesame. *Journal of Sustainable Agricultural Sciences*, 2(2), 87-101. [In Persian]
- Sharifi, P. (2020). Application of Multivariate Analysis Methods in Agricultural Sciences. Rasht Branch, Islamic Azad University Press, IR, 288 pp. [In Persian]
- Weiss, E. A. (2000). Oilseed Crops. Second Edition, Blackwell Science, Oxford. DOI: 10.1017/S0021859699227840
- Zeinalzadeh-Tabrizi, H. (2024). Assessment of heriability and genetic efficiency in advanced sesame lines. *Journal of Animal & Plant Sciences*, 34(2), 515-523. <https://doi.org/10.36899/JAPS.2024.2.0737>.
- Zavareh, M., Hoogenboom, G., Rahimian Mashhadi, H., & Arab, A. (2012). A decimal code to describe the growth stages of sesame (*Sesamum orientale* L.). *International Journal of Plant Production*, 2(3), 193-206.