



Research Paper

Evaluation of Seed Yield Stability of Lentil Genotypes Based on REML/BLUP and Multi-Trait Stability Index (MTSI)

Payam Pezeshkpour¹, Reza Amiri², Iraj Karami³ and Amir Mirzaei⁴

1- Assistant Professor, Crop and Horticultural Science Research Department, Lorestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Khorramabad, Iran,
(Corresponding author: Papezeshkpour@yahoo.com)

2- Assistant Professor, Crop and Horticultural Science Research Department, Lorestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Khorramabad, Iran

3- Dryland Agricultural Research Institute, Sararoud Branch, Agricultural Research, Education and Extension (AREEO), Kermanshah, Iran

4- Assistant Professor, Ilam Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Ilam, Iran

Received: 13 November, 2023

Revised: 21 January, 2024

Accepted: 28 January, 2024

Available Online: 6 May, 2024

Extended Abstract

Background: Lentil is a popular legume crop in the Mediterranean region, widely grown for its nutritious seeds and improving soil fertility. Interest in legumes is increasing as a protein source to replace meat in the future. Identification of high-yield genotypes with adaptation to a wide range of environments is one of the major goals in crop and lentil breeding programs. Combining the best linear unbiased predictions (BLUP), additive main effects, and multiplicative interaction (AMMI) methods in multi-environment experiments and multi-trait stability selection (MTSI) helps to better evaluate plant genotypes and achieve more accurate results. Additive main effect and multiplicative interaction (AMMI) and BLUP are two methods for analyzing multi-environment trials. The linear mixed effects model (LMM) and the restricted maximum likelihood (REML) estimator methods are among the important methods that have been proposed to analyze the data of multi-environmental experiments. In this regard, the BLUPs obtained from the interaction of genotype and environment are performed with principal component analysis or single value analysis on the matrix. This method uses the stability index of the weighted average of absolute scores of the best unbiased linear forecasts (WAASB), the weighted average of the stability index of WAASB, and the dependent variable (WAASBY). Researchers have also proposed an MTSI based on factor analysis, in which grain yield, other traits, and the stability of each are simultaneously used to identify stable genotypes. This research aimed to identify stable and high-yielding lentil genotypes in autumn cultivation.

Methods: To evaluate the seed yield stability of 12 lentil genotypes along with three check genotypes, including Kimia, Bileh Sawar, and local landrace, an experiment was conducted as a randomized complete block design with three replications at Agricultural Research Stations of Khorramabad (Lorestan), Zanjireh (Ilam), and Sararoud (Kermanshah) in three cropping years (2019-2022). Each plot consisted of four lines with a length of 4 m and a distance of 25 cm from each other. In addition to the usual crop care such as weeding and pest control, the desired traits and characteristics, such as the number of days to 50% flowering, plant height, and number of days to maturity, were measured during the growing season. Hundred-seed weights and the yield of each plot were measured after the maturity and harvesting of experiments. Combined analysis of variance (ANOVA) was performed using SAS software, and the average traits of the treatments were compared using the LSD test. For statistical analyses, the Metan Ver.1.9.0 (multi-environment trial analysis) package was used in the R software environment. To estimate stability quantities, singular value decomposition (SVD) was applied to the matrix of BLUPs obtained from genotype-by-environment interactions with an LMM. Variance components were estimated by the REML method. After analyzing the variance of the data, the stability parameters of WAASB and WAASBY (for simultaneous selection based on average performance and stability) were estimated using the eigenvalues obtained from the AMMI analysis on BLUP, and the best genotypes were selected with these two indicators. Genotypic stability values were obtained from the Harmonic Average of the Genotypic Values (HMGV) index. The compatibility of genotypes



was evaluated based on the relative performance index of genotypic values (RPGV). The harmonic mean index and relative performance of genotypic value (HMRPGV) were used to simultaneously evaluate stability, compatibility, and seed yield.

Results: The effect of environment, genotype, and genotype \times environment interaction were significant on seed yield, plant height, days to flowering, days to maturity, seed filling period, seed filling ratio, seed yield formation rate, rainfall efficiency, and single seed weight. The genotype effect was significant on all traits, except for the seed-filling period. Based on the biplot analysis, genotypes 4, 6, 7, 9, and 10 had higher yield stability in addition to the highest seed yield. The Scree test showed that the first three principal components explained 45.41, 19.13, and 14.34% of the genotype \times environment interaction variation obtained from BLUP for grain yield, respectively; in total, they justified 78.87% of the variation. Based on a weighted average of absolute scores of WAASB, genotypes 6, 10, and 12 were high-yielding and stable. Genotypes 1 and 10 were superior based on the (MTSI). The harmonic mean and HMRPGV introduced genotypes 10, 9, 4, and 12 as the genotypes that had high stability and compatibility in addition to high seed yields.

Conclusion: Based on all the analyses, genotype 10 was the most stable genotype, which, in addition to seed yield, was superior to other genotypes in terms of the other measured traits and can be a candidate for introduction as a new cultivar.

Keywords: Adaptability, BLUP, Genetic values, LRT, REML

How to Cite This Article: Pezeshkpour, 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). *J Crop Breed*, 16(2), 42-52. DOI: 10.61186/jcb.16.2.42



مقاله پژوهشی

ارزیابی پایداری عملکرد دانه ژنوتیپ‌های عدس بر پایه REML/BLUP و شاخص پایداری چند صفتی (MTSI)

پیام پزشکیپور^{1D}، رضا امیری^۲، ایرج کرمی^۳ و امیر میرزایی^۴

۱- 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، (نویسنده مسؤل: Papezeshkpour@yahoo.com)

۲- 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

۳- کارشناس، مؤسسه تحقیقات کشاورزی دیم کشور، معاونت سرارود، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرمانشاه، ایران

۴- استادیار پژوهش، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی ایلام، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ایلام، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۸/۲۲ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۱/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۰۸ تاریخ انتشار آنلاین: ۱۴۰۳/۰۲/۱۷

صفحه: ۴۴ تا ۵۲

چکیده مبسوط

مقدمه و هدف: عدس یکی از حیوانات مهم در مناطق مدیترانه‌ای است که به‌خاطر ارزش تغذیه‌ای و نقش آن در بهبود حاصلخیزی خاک، به‌طور گسترده‌ای کشت می‌گردد. علاقه به حیوانات، به‌عنوان یک منبع پروتئینی جایگزین گوشت در آینده، در حال افزایش هست. شناسایی ژنوتیپ‌های با عملکرد بالا و سازگار به دامنه گسترده‌ای از محیط‌ها، یکی از هدف‌های عمده در برنامه‌های به‌زادگی گیاهان زراعی از جمله عدس می‌باشد. ترکیب دو روش ارزیابی پایداری بهترین پیش‌بینی نارایب خطی (BLUP) و اثرات اصلی جمع‌پذیر و برهمکنش‌های ضرب‌پذیر (AMMI) در آزمایش‌های ناحیه‌ای و گزینش پایداری چندصفتی (MTSI)، به ارزیابی بهتر ژنوتیپ‌های گیاهی و دستیابی به نتایج دقیق‌تر کمک می‌کند. مدل‌های اثرات اصلی جمع‌پذیر و برهمکنش ضرب‌پذیر (AMMI) و بهترین پیش‌بینی نارایب خطی (BLUP)، از جمله روش‌های چند متغیره کاربردی در ارزیابی آزمایش‌های چند محیطی هستند. مدل اثرهای مختلط خطی (LMM) و روش برآوردگر حداکثر درست‌نمایی محدود شده (REML)، از روش‌های مهمی هستند که برای تجزیه داده‌های آزمایش‌های چند محیطی پیشنهاد شده‌اند. در این راستا، با تجزیه به مؤلفه‌های اصلی یا تجزیه ارزش منفرد بر روی ماتریس، بهترین پیش‌بینی‌های نارایب خطی (BLUP) با بدست آمده از برهمکنش ژنوتیپ و محیط انجام می‌شود. در این روش از شاخص پایداری میانگین وزنی نمرات مطلق بهترین پیش‌بینی‌های نارایب خطی (WAASB)، میانگین وزنی شاخص پایداری WAASB و متغیر وابسته (WAASBY) استفاده می‌شود. محققان شاخص پایداری چند صفتی (MTSI) بر مبنای تجزیه عاملی را نیز پیشنهاد کرده‌اند که در آن، عملکرد دانه و صفات دیگر و پایداری هر کدام از آن‌ها به‌طور همزمان برای شناسایی ژنوتیپ‌های پایدار استفاده می‌شود. این پژوهش برای شناسایی ژنوتیپ‌های پایدار و پر محصول عدس در کشت پایتزه انجام شد.

مواد و روش‌ها: برای ارزیابی پایداری عملکرد دانه ۱۲ ژنوتیپ عدس به همراه سه شاهد کیمیا، بیله سوار و توده محلی، آزمایشی در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار در ایستگاه‌های تحقیقات کشاورزی خرم‌آباد (لرستان)، زنجیره (ایلام) و سرارود (کرمانشاه) به‌مدت سه سال زراعی (۴۰۱-۱۳۹۸) اجرا گردید. هر کرت شامل چهار خط کاشت به‌طول چهار متر و با فاصله ۲۵ سانتی‌متر از یکدیگر بود. در طول فصل رشد، علاوه بر مراقبت‌های معمول زراعی نظیر وجین علف‌های هرز و مبارزه با آفات، از صفات و خصوصیات موردنظر مانند تعداد روز تا رسیدگی بوته و تعداد روز تا رسیدگی یادداشت‌برداری به‌عمل آمد. پس از رسیدگی و برداشت آزمایش، وزن صد دانه و عملکرد هر کرت اندازه‌گیری گردید. تجزیه واریانس مرکب با استفاده از نرم‌افزار SAS انجام و میانگین صفات تیمارها به‌روش LSD مورد مقایسه قرار گرفت. برای تجزیه‌های آماری، بسته تجزیه آزمایش‌های چند محیطی با نام Metan Ver.1.9.0 در محیط نرم‌افزار R به‌کار گرفته شد. برای برآورد کمیت‌های پایداری، تجزیه مقادیر منفرد (SVD) بر روی ماتریس بهترین پیش‌بینی‌های نارایب خطی (BLUPها) به‌دست آمده از برهمکنش‌های ژنوتیپ در محیط با یک مدل اثر مختلط خطی (LMM) به‌کار برده شد. اجزای واریانس با روش حداکثر درست‌نمایی محدود شده (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. از شاخص میانگین هارمونیک ارزش‌های ژنوتیپی (HMGV)، مقادیر پایداری ژنوتیپی به‌دست آمد. سازگاری ژنوتیپ‌ها بر پایه شاخص عملکرد نسبی ارزش‌های ژنوتیپی (RPGV) ارزیابی شد. شاخص میانگین هارمونیک و عملکرد نسبی ارزش ژنوتیپی (HMRPGV) برای ارزیابی همزمان پایداری، سازگاری و عملکرد دانه استفاده شد.

یافته‌ها: اثر محیط، ژنوتیپ و برهمکنش ژنوتیپ در محیط بر صفات عملکرد دانه، ارتفاع بوته، تعداد روز تا گلدهی، تعداد روز تا رسیدگی، دوره پر شدن دانه، سرعت پر شدن دانه، سرعت تشکیل عملکرد دانه، بهره‌وری از بارش و متوسط وزن تک دانه، معنی‌دار بود. اثر ژنوتیپ بر همه صفات به‌جز دوره پر شدن دانه معنی‌دار بود. بر پایه تجزیه بای پلات، ژنوتیپ‌های ۴، ۶، ۷، ۹ و ۱۰ علاوه بر داشتن بیشترین عملکرد دانه، از پایداری عملکرد بیشتری هم برخوردار بودند. آزمون اسکری نشان داد سه مؤلفه اصلی اول، به‌ترتیب ۴۱/۴۵، ۱۳/۱۹ و ۳۴/۱۴ درصد از تغییرات برهمکنش ژنوتیپ × محیط به‌دست آمده از BLUP را برای عملکرد دانه و روی هم ۸۷/۷۸ درصد از تغییرات را توجیه کردند. بر اساس شاخص پایداری میانگین وزنی نمرات مطلق بهترین پیش‌بینی نارایب خطی (WAASB) ژنوتیپ‌های ۶، ۱۰ و ۱۲ پر محصول و پایدار بودند. ژنوتیپ‌های ۱ و ۱۰ از نظر شاخص گزینش چند صفتی (MTSI)، ژنوتیپ‌های برتر بودند. شاخص میانگین هارمونیک و عملکرد نسبی ارزش ژنوتیپی (HMRPGV)، ژنوتیپ‌های ۱۰، ۹، ۴ و ۱۲ را به‌عنوان ژنوتیپ‌هایی معرفی کرد که علاوه بر عملکرد دانه، از پایداری و سازگاری بالایی نیز برخوردار بودند.

نتیجه‌گیری: در مجموع و بر اساس تمام تجزیه‌ها، ژنوتیپ ۱۰ پایدارترین ژنوتیپ بود که علاوه بر عملکرد دانه، از نظر سایر صفات اندازه‌گیری شده نیز بر ژنوتیپ‌های دیگر برتری داشت و می‌تواند نامزد معرفی به‌عنوان رقم جدید باشد.

واژه‌های کلیدی: آزمون نسبت درست‌نمایی، ارزش‌های ژنتیکی، بهترین پیش‌بینی نارایب خطی، حداکثر درست‌نمایی محدود شده، سازگاری

مقدمه

و دیپلوئید ($2n=2x=14$) است که عمدتاً در شبه قاره هند، منطقه مدیترانه و آمریکای شمالی کشت و زرع می‌گردد. به‌علت وجود باکتری‌های تثبیت کننده نیتروژن در ریشه، این گیاه موجب تثبیت بیولوژیکی نیتروژن گردیده و علاوه بر تأمین

امروزه علاقه به حیوانات دانه‌ای از جمله عدس که منبع اصلی جایگزین گوشت در آینده می‌باشند، در حال افزایش است (Sellami et al., 2021). عدس یک لگوم خوراکی، خودگشن

صفت استفاده می‌کند. این شاخص مبتنی بر تحلیل عاملی می‌باشد که نمرات عامل‌های هر ایدئوتیپ با توجه به فاکتورهای مطلوب و نامطلوب طراحی شده است. 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).

ارقام جدید گیاهان زراعی علاوه بر اینکه باید کارایی بالایی برای عملکرد و سایر صفات از خود نشان دهند، برتری آن‌ها بایستی در دامنه وسیعی از شرایط محیطی محرز گردد (Lin and Binns, 1991). اثر متقابل ژنوتیپ \times محیط معنی‌دار، ناشی از تغییر در میزان اختلاف بین ژنوتیپ‌ها در محیط‌های متفاوت و یا تغییر در رتبه‌بندی نسبی ژنوتیپ‌ها می‌باشد. تغییرات کم در ژنوتیپ‌ها در مکان‌ها و سال‌های مختلف به‌عنوان پایداری ذکر می‌گردد (Fernandez, 1991). برهمکنش‌های ژنوتیپ و محیط، پاسخ‌های متفاوت ژنوتیپ‌ها را در محیط‌های مختلف نشان می‌دهد و تغییر در رتبه ژنوتیپ‌ها در محیط‌های مختلف، به برهمکنش معنی‌دار ژنوتیپ در محیط می‌انجامد (Holland, 2006). بنابراین، یکی از جنبه‌های مهم در ارزیابی ژنوتیپ‌های پیشرفته و امیدبخش، افزون بر عملکرد و ویژگی‌های دیگری همچون مقاومت به آفات و بیماری‌ها، پایداری صفات بررسی شده در آزمایش‌های چند محیطی است که بیانگر نوسان اندک عملکرد در مکان‌ها یا سال‌های مختلف است (Yan and Kang, 2002). تجزیه پایداری برای شناسایی ژنوتیپ‌هایی به‌کار می‌رود که کمتر تحت تأثیر تغییرات محیطی قرار بگیرند و برای طیف وسیعی از محیط‌ها توصیه شوند (Yan and Kang, 2002). روش‌های زیادی برای تجزیه پایداری پیشنهاد شده است که روش‌های پارامتری (تک متغیره یا چند متغیره) و ناپارامتری را در بر می‌گیرند. مدل اثرهای مختلط خطی (LMM)^۲ و روش برآوردگر حداکثر درست‌نمایی محدود شده (REML)^۳، از روش‌های مهمی هستند که برای تجزیه داده‌های آزمایش‌های چند محیطی 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) استفاده می‌شود (Olivoto et al., 2019b). محققان شاخص پایداری چند صفتی (MTSI)^۶ بر مبنای تجزیه عاملی را نیز پیشنهاد کرده‌اند که در آن، عملکرد دانه و صفات دیگر و پایداری هر کدام از آن‌ها به‌طور همزمان برای شناسایی ژنوتیپ‌های پایدار استفاده می‌شود. از این روش در عدس (Pezeshkpour and Karimizadeh, 2023) و جو (Pour-Aboughadareh et al., 2023) نیز استفاده شده است. در مطالعه‌ای با ارزیابی ۳۰ ژنوتیپ عدس در دو سال زراعی و در چهار منطقه، از روش

نیترژن مورد نیاز گیاه، سالانه با توجه به شرایط آب و هوایی، وضعیت خاک و نوع رقم، مقداری نیترژن خالص به خاک می‌افزاید. بنابراین موجب حاصلخیزی خاک مخصوصاً در مناطق دیم می‌گردد و از این حیث یک تناوب مناسب برای غلات دیم محسوب می‌شود (Kochaki and Banayan, 1993). عدس دارای عناصر غذایی بالایی است. درصد پروتئین دانه عدس می‌تواند تا ۳۰ درصد برسد. وجود ویتامین‌ها نیز به‌ویژه در گروه B در دانه عدس قابل توجه است. آهن در دانه عدس به‌میزان بیشتری نسبت به دانه گندم و برنج وجود دارد (Sellami et al., 2019).

عملکرد دانه عدس مانند محصولات زراعی دیگر به شدت تحت تأثیر تنش‌های زیستی و غیرزیستی قرار می‌گیرد (Sellami et al., 2019). عوامل مختلفی در پایین بودن عملکرد گیاه عدس مؤثر هستند که از آن جمله می‌توان به پتانسیل پایین عملکرد توده‌های محلی و پایداری ضعیف آن‌ها به شرایط مختلف محیطی اشاره نمود (Sabaghpour et al., 2004).

اهداف اصلی اصلاح ژنتیکی عدس ثبات تولید، کیفیت بذر و راندمان تثبیت نیترژن بالاتر است (Zaccardelli et al., 2010). اخیراً یک فعالیت انتخاب ژنتیکی دقیق برای انتخاب گونه‌های عدس غنی از پروتئین و مناسب برای مکانیزاسیون توسعه یافته است (Zaccardelli et al., 2010). بهره ژنتیکی جزو مهمی در اصلاح نباتات است که نقش مهمی در توسعه برنامه‌های اصلاحی ایفا می‌کند. در عین حال، انتخاب بر اساس یک صفت، مناسب‌ترین روش نیست، زیرا هیچ اطمینانی از دستاوردهای ژنتیکی در سایر صفات مهم وجود ندارد (Jahufer and Casler, 2015). پروژه‌های اصلاحی بر پایه انتخاب ژنوتیپ‌های برتر عدس با استفاده از عملکرد و صفات مختلف به‌طور همزمان در نظر گرفته شده است (Sellami et al., 2021). با این حال، این برنامه‌های اصلاح عدس با استفاده از این روش، با محدودیت‌هایی مانند انتخاب ژرم‌پلاسما، ژنتیک و روابط ژنتیکی بین صفات تحت انتخاب، مواجهه می‌باشد (Sellami et al., 2021; Olivoto and Nardino, 2021).

شاخص‌های انتخاب جدید بر پایه انتخاب ژنوتیپ‌های برتر با استفاده از عملکرد و صفات مختلف به‌طور همزمان، مانند شاخص فاصله ژنوتیپ-ایدئوتیپ چندصفتی (Olivoto and Nardino, 2021)، شاخص چندصفتی بر اساس طرح ایدئوتیپ (Rocha et al., 2018) و شاخص پایداری چندصفتی (MTSI) (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)^۱ را بر مبنای عاملی معرفی کردند که در آن عملکرد دانه و همه صفات اندازه‌گیری شده دیگر و پایداری هر کدام از آن‌ها به‌طور هم زمان ارزیابی می‌شوند (Olivoto et al., 2019a).

شاخص پایداری چندصفتی (MTSI)، یک شاخص انتخاب است که از میانگین عملکرد و پایداری ژنوتیپ با انتخاب چند

1- Multi – trait stability index

2- Linear mixed-effects models

3- Restricted estimator maximum likelihood

4- Best linear unbiased predictors

5- Weighted average of absolute scores of best linear

6- Weighted average of WAASB and response variable

درصد گلدهی، تعداد روز تا رسیدگی، دوره پر شدن دانه (KFP) و سرعت پر شدن دانه (KFR) در سال‌های مختلف برای هر ژنوتیپ اندازه‌گیری شد. ارتفاع بوته از میانگین پنج بوته در هر کرت اندازه‌گیری شده است. تعداد روز تا رسیدگی، از تاریخ کاشت تا ۹۵٪ رسیدگی دانه محاسبه شد. فاصله زمانی بین ۵۰ درصد گلدهی تا رسیدن فیزیولوژیک به‌عنوان طول دوره پر شدن دانه در نظر گرفته شد. از تقسیم وزن دانه به تعداد دانه، متوسط وزن تک دانه در گیاه به‌دست آمد. از حاصل تقسیم میانگین وزن تک دانه بر طول دوره پر شدن دانه، میانگین سرعت پر شدن دانه به میلی‌گرم دانه در روز به‌دست آمد. برای تجزیه‌های آماری، بسته تجزیه آزمایش‌های چند محیطی با نام Metan Ver. 1.9.0 (Multi environment trial analysis) در محیط نرم‌افزار R به‌کار گرفته شد. یکنواختی خط‌های 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 مکان با روش حداکثر درست‌نمایی محدود شده (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 نارایب خطی (BLUPها) به‌دست آمده از برهمکنش‌های ژنوتیپ در محیط با یک مدل اثر مختلط خطی (LMM) به‌کار برده شد. اجزای واریانس با روش حداکثر درست‌نمایی محدود شده (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 چند صفتی (MTSI) نیز از رابطه ۳ برآورد شد (Olivoto et al., 2019b).

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

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

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

در روابط ۱ و ۲، WAASBi، میانگین وزنی قدر مطلق امتیازات ژنوتیپ نام، IPCA_{ik}، نمره ژنوتیپ نام در Kامین محور مؤلفه اصلی برهمکنش (IPCA) و EP_k، مقدار واریانس توجیه شده توسط Kامین IPCA است. ژنوتیپ با کمترین مقدار WAASB پایدار در نظر گرفته می‌شود (Olivoto et al., 2019a). WAASBYi میانگین وزنی WAASB و عملکرد دانه (GY) برای ژنوتیپ نام، WY وزن داده‌شده به متغیر پاسخ (در این مورد، عملکرد دانه)، GYi میانگین عملکرد دانه ژنوتیپ نام با توجه به تمام محیط‌ها، GY_{max} بالاترین متوسط عملکرد دانه مشاهده شده، Ws وزن نسبت داده‌شده به شاخص پایداری (در این مورد، شاخص WAASB) و WAASB_{min}، کمترین مقدار WAASB مشاهده‌شده در بین ژنوتیپ‌ها است.

REML برای ارزیابی معنی‌داری اثر ژنوتیپ، محیط و برهمکنش ژنوتیپ در محیط استفاده شد (Bhattacharya et al., 2022). علاوه بر روش بالا، روش میانگین هارمونیک و عملکرد نسبی ارزش ژنوتیپی (HMRPGV)^۱ 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 باقلا (Sharifi et al., 2022) و گندم (Coan et al., 2018) بهره گرفته‌اند. پژوهشگران با استفاده از روش‌های تک متغیره پارامتری و ناپارامتری، ژنوتیپ‌های پایدار عدس را شناسایی کرده‌اند (Namdari et al., 2022; Sabaghnia et al., 2006). پژوهشگران از روش‌های چند متغیره همچون AMMI (از جمله شاخص ASV) و GGE- biplot نیز برای شناسایی ژنوتیپ‌های پایدار عدس بهره گرفته‌اند (Jeberson et al., 2023; Ghaffar et al., 2019). 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 برای دستیابی به ارقام پرمحصول و سازگار با شرایط آب و هوایی مناطق دیم گرمسیری و نیمه‌گرمسیری کشور انجام شد. دوازده ژنوتیپ پیشرفته عدس که از آزمایشات مقایسه عملکرد ژنوتیپ‌های پیشرفته عدس در سال زراعی ۱۳۹۷-۹۸ انتخاب شده بودند (جدول ۱)، به‌همراه سه رقم شاهد کیمیا، بیله‌سوار و توده محلی در ایستگاه‌های تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی سراب چنگائی خرم‌آباد (لرستان)، زنجیره (ایلام) و سرارود (کرمانشاه) (جدول ۲) در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار و به‌مدت سه سال زراعی (۴۰۱-۱۳۹۸)، مورد ارزیابی قرار گرفتند. هر کرت شامل چهار خط چهار متری به فاصله ۲۵ سانتی‌متر از یکدیگر بود. پس از شخم و آماده‌سازی زمین که شامل دیسک و لولر و ایجاد شیار در پاییز بود، با مساعد شدن شرایط اقلیمی منطقه، کشت آزمایشات در ۲۵ آذر صورت پذیرفت. مقدار کود لازم پس از آزمایش خاک طبق توصیه‌های بخش خاک و آب مورد استفاده قرار گرفت. در طول فصل رشد، علاوه بر مراقبت‌های معمول زراعی نظیر وجین علف‌های هرز و مبارزه با آفات، از صفات و خصوصیات مورد نظر مانند تعداد روز تا ۵۰٪ گلدهی، ارتفاع بوته و تعداد روز تا رسیدگی یادداشت‌برداری به‌عمل آمد. پس از رسیدگی و برداشت آزمایش، وزن صد دانه و عملکرد هر کرت اندازه‌گیری گردید و تجزیه مرکب با استفاده از نرم افزار SAS انجام و میانگین صفات تیمارها به‌روش LSD مورد مقایسه قرار گرفت. عملکرد دانه، وزن صد دانه، ارتفاع بوته، تعداد روز تا ۵۰

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

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

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

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

در رابطه ۳، MTSI: شاخص پایداری چند صفتی برای ژنوتیپ i ام، F_{ij} : نمره z ام ژنوتیپ i ام، و F_j : نمره z ام ژنوتیپ ایده‌ال است. از شاخص میانگین هارمونیک ارزشهای ژنوتیپی (HMGV)، مقادیر پایداری ژنوتیپی به دست آمد (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- اسامی ارقام و ژنوتیپهای امیدبخش عدس مورد استفاده در آزمایش

Table 1. Names of promising lentil cultivars and genotypes used in the experiment

نام ژنوتیپ Name	کد ژنوتیپ Code	نام ژنوتیپ Name	کد ژنوتیپ Code	نام ژنوتیپ Name	کد ژنوتیپ Code	نام ژنوتیپ Name	کد ژنوتیپ Code
Local	G13	09S182109-16	G9	010S96105-1	G5	010S96146-5	G1
Kymia	G14	09S96510-13	G10	ILL2261	G6	2009S96575-1	G2
Bileh Savar	G15	09S83191-05	G11	010S961130-2	G7	Ibia-1	G3
		ILL1325	G12	010S916122-3	G8	09S83227-04	G4

جدول ۲- ویژگیهای جغرافیایی و هواشناسی مکانهای آزمایشی

Table 2. Geographical and metrological characteristics of the experimental locations

Location	مکان	ارتفاع از سطح دریا Altitude (m)	طول جغرافیایی Longitude	عرض جغرافیایی latitude	میانگین دمای سالیانه Average annual temperature (°C)	میانگین بارندگی سالیانه Average annual rainfall (mm)
Khorramabad first year	خرم‌آباد سال اول				15.44	533.6
Khorramabad second year	خرم‌آباد سال دوم	1125	48°28' E	33°39' N	16.5	304.9
Khorramabad third year	خرم‌آباد سال سوم				14.6	307
Sararood first year	سرارود سال اول				15.6	518.9
Sararood second year	سرارود سال دوم	1351	47°20' E	34°20' N	13.1	312
Sararood third year	سرارود سال سوم				15	261
Ilam first year	ایلام سال اول				15.05	603.6
Ilam second year	ایلام سال دوم	975	46°36' E	33°47' N	17.5	302
Ilam third year	ایلام سال سوم				15.9	223.6

نتایج و بحث

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

آزمون اسکری^۲ نشان داد سه مؤلفه اصلی اول، به ترتیب ۴۱/۴۵، ۱۲۸/۱۹ و ۳۴/۱۴ درصد از تغییرات برهمکنش ژنوتیپ × محیط به دست آمده از BLUP را برای عملکرد دانه و روی هم ۸۷/۷۸ درصد از تغییرات را توجیه کردند. اثر هفت مؤلفه اصلی اول در برهمکنش ژنوتیپ × محیط معنی‌دار بود (نتایج ارائه نشده است). 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 به‌گونه‌ای 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 عدس را گزارش کردند (Jeberson et al., 2019). با توجه به تصادفی بودن اثر محیط و برهمکنش ژنوتیپ × محیط، از آزمون نسبت درستمایی (LRT)^۴ برای ارزیابی آن‌ها استفاده شد که نتایج نشان داد، اثر محیط و برهمکنش ژنوتیپ در محیط بر عملکرد دانه، ارتفاع بوته، تعداد روز تا گلدهی، تعداد

روز تا رسیدگی، دوره پر شدن دانه، سرعت پر شدن دانه، سرعت تشکیل عملکرد دانه، بهره‌وری از بارش و وزن تک دانه معنی‌دار بود. با توجه به ثابت بودن اثر ژنوتیپ، برای ارزیابی آن از روش کمترین میانگین مربعات استفاده شد که نتایج نشان داد، اثر ژنوتیپ بر همه صفات به‌جز دوره پر شدن دانه معنی‌دار بود (جدول ۳). نسبت اجزای واریانس برآورد شده با روش حداکثر درستمایی محدود شده (REML) به واریانس فنوتیپی نشان داد که ۶۷/۵۸ درصد از واریانس فنوتیپی عملکرد دانه به‌وسیله واریانس برهمکنش ژنوتیپ در محیط توجیه شد (جدول ۴). اثر ژنوتیپ، تنها توجیه کننده ۰۲/۱۲ درصد از واریانس برآورد شده بود و ۳۱/۲۹ درصد واریانس نیز توسط اثر باقیمانده توجیه گردید (جدول ۴). اثر باقیمانده عمدتاً به اثر محیط مربوط می‌شود که با توجه به تفاوت‌های زیاد بین محیطهای آزمایشی از نظر ویژگیهای خاک، مقدار و پراکنش بارندگی و سایر عوامل قابل توجیه است. نتایج تحقیقات محققان روی عدس نیز نشان داده است که بخش عمده واریانس توسط اثر محیط توجیه می‌شود (Abo-Hegazy et al., 2013; Barrios et al., 2016; Yadav et al., 2016). پژوهشگران دیگری نیز برهمکنش معنی‌دار ژنوتیپ × محیط را بر عملکرد دانه عدس با تجزیه واریانس به روش کمترین مربعات (Akinci et al., 2018; Dehghani et al., 2008; Karimizadeh et al., 2013) و روش درستمایی محدود شده (Bhattacharya et al., 2022) را گزارش کردند. برهمکنش معنی‌دار ژنوتیپ در محیط بیانگر این است که عملکرد ژنوتیپها از محیطی به

پایین WAASB، پایدار بودند. محیط‌های ۵ (ایلام، سال اول)، ۶ (ایلام، سال دوم)، ۸ (سرارود، سال دوم) و ۹ (سرارود، سال سوم) در این ناحیه علاوه بر عملکرد کم، از توانایی جداکنندگی پایین‌تری نیز برخوردار بودند. ژنوتیپ‌های ۴، ۶، ۷، ۹ و ۱۰ در چارک چهارم، دارای عملکرد بیشتر از متوسط عملکرد ژنوتیپ‌ها و پایداری بیشتری نسبت به ژنوتیپ‌های دیگر بودند. محیط‌ها در این بای‌پلات، به روشنی به چهار محیط بزرگ تقسیم شدند که شامل محیط‌های ۵ (ایلام، سال اول)، ۶ (ایلام، سال دوم)، ۸ (سرارود، سال دوم) و ۹ (سرارود، سال سوم) با عملکرد و توانایی جداکنندگی پایین، محیط ۳ (لرستان، سال سوم) با کمترین عملکرد و توانایی جداکنندگی متوسط، و محیط‌های ۱، ۴ و ۲ به ترتیب لرستان در سال اول، ایلام در سال اول و لرستان در سال دوم با عملکرد و توانایی جداکنندگی بالا و محیط ۷ با عملکرد بالا و توانایی جداکنندگی بالا بودند. از آنجاکه این نمودار (شکل ۱) بر اساس شاخص WAASB ترسیم شده است که در محاسبه آن از تمامی مؤلفه‌های اصلی معنی دار استفاده شده است، پایداری ژنوتیپ‌ها و همچنین توانایی نمایندگی و جداکنندگی محیط‌ها را به خوبی نشان می‌دهد و ژنوتیپ‌های برگزیده با آن، دارای پایداری بهتری هستند (Olivoto *et al.*, 2019a).

محیط دیگر دارای نوسان است، بنابراین برآورد بهترین پیش‌بینی‌های ناریب خطی (BLUPها) 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 (WAASB)، برای ارزیابی همزمان ژنوتیپ‌ها از نظر میانگین عملکرد دانه و پایداری با شاخص WAASB به کار گرفته شد (شکل ۱). در چارک اول این نمودار، ژنوتیپ ۱۳ دارای عملکرد کمتر از متوسط و همچنین ناپایدار از نظر شاخص WAASB بودند. این ژنوتیپ مناسب محیط ۳ (لرستان سال سوم) بود. ژنوتیپ‌های ۲ و ۱۲ در چارک دوم، با آن که دارای عملکرد بالاتر از میانگین عملکرد کل بودند، اما به دلیل مقدار بالای WAASB، ناپایدار بودند. ژنوتیپ ۱۲ در این ناحیه در نزدیک مبدأ بای‌پلات، ژنوتیپی با پایداری عمومی بالا بود.

محیط ۱ (لرستان، سال اول) با توجه به سهم بالا در برهمکنش ژنوتیپ در محیط، محیطی با توانایی شناسایی بالا بود و بهتر می‌تواند ژنوتیپ‌های پایدار را از یکدیگر جدا کند (Yan and Kang, 2002). ژنوتیپ‌های ۳، ۸، ۱۴ و ۱۵ در چارک سوم با وجود عملکرد کمتر از میانگین کل، به دلیل مقادیر

جدول ۳- ارزیابی معنی‌داری فاکتورها در مدل مختلط برای اثرهای تصادفی با آزمون نسبت درستنمایی و برای اثر ثابت ژنوتیپ با تجزیه واریانس Table 3. Significance of factors evaluation for random effects by LRT(χ^2) and for fixed effects by ANOV

منابع تغییرات	عملکرد دانه	وزن صد دانه	ارتفاع بوته	تعداد روز تا رسیدگی	تعداد روز تا گلدهی						
SOV	Seed yield	100 seed weight	Plant height	Days to maturity	Days to flowering						
			میانگین مربعات ژنوتیپ (MSG)								
ژنوتیپ	44012**	1.742**	8.741**	5.610*	5.145**						
Gen			LRT (χ^2) Likelihood ratio test								
	کای	مقدار احتمال	کای	مقدار احتمال	کای	مقدار احتمال	کای	مقدار احتمال	کای	مقدار احتمال	
	χ^2	p-Value	χ^2	p-Value	χ^2	p-Value	χ^2	p-Value	χ^2	p-Value	
ژنوتیپ	19.315	1.108e-05	36.225	1.758e-09	4.968	0.02582	4.129	0.04216	6.468	0.01098	
Gen											
محیط	60.540	7.21e-15	3.650	0.05608	40.233	2.254e-10	104.647	< 2.2e-16	118.97	< 2.2e-16	
Env.											
ژنوتیپ × محیط	44.832	2.147e-11	164.275	2.2e-16	93.039	< 2e-16	103.076	< 2e-16	104.935	< 2e-16	
Env×Gen											
ژنوتیپ	0.131	0.7173	14.907	0.0001129	6.915	0.008547	8.605	0.003353	36.222	1.761e-09	
Gen											
محیط	42.290	7.868e-11	32.620	1.121e-08	55.774	8.131e-14	46.856	7.64e-12	3.672	0.05532	
Env.											
ژنوتیپ × محیط	103.759	< 2.2e-16	137.109	< 2.2e-16	147.841	< 2.2e-16	129.631	< 2.2e-16	163.453	< 2.2e-16	
Env×Gen											

جدول ۴- برآورد اجزای واریانس با روش حداکثر درست‌نمایی محدود شده برای صفات مطالعه شده

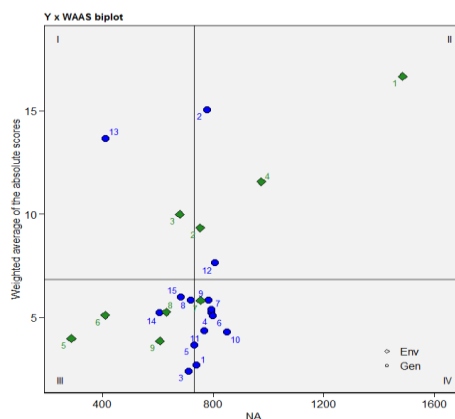
Table 4. Estimation of variance components by REML for Studied traits

اجزای واریانس برآورده					پارامترهای برآورد شده به روش حداکثر درست‌نمایی محدود شده	
Variance components Estimates (%)					REML	
تعداد روز تا گلدهی	تعداد روز تا رسیدگی	ارتفاع بوته	وزن صد دانه	عملکرد دانه		
Days to flowering	Days to maturity	Plant height	100 seed weight	Seed yield		
0.5409 (10.38)	0.5100 (7.878)	0.7783 (8.616)	0.3894 (33.66)	6993 (12.02)	واریانس ژنوتیپی (σ^2_g)	Genotypic variance
2.597 (49.83)	3.290 (50.81)	4.352 (48.17)	0.5133 (44.38)	34142 (58.67)	واریانس ژنوتیپ در محیط (σ^2_{gei})	Variance of Genotype \times Environment
2.074 (39.80)	2.674 (41.31)	3.904 (43.21)	44.38 (21.96)	17057 (29.31)	واریانس باقیمانده (σ^2_e)	Variance of residual value
5.212	6.474	0.034	1.157	58193	واریانس فنوتیپی (σ^2_p)	Phenotypic variance
0.1038	0.07878	0.08616	0.3366	0.1202	وراثت پذیری عمومی (h^2)	General heritability
0.4983	0.5081	0.4817	0.4438	0.5867	ضریب تشخیص اثرهای ژنوتیپ در محیط (R^2_{gei})	Detection coefficient of GEI effects
0.5968	0.5233	0.5534	0.8542	0.6124	میانگین وراثت پذیری ژنوتیپی (h^2_{mg})	Average genotypic heritability
0.7725	0.7234	0.7439	0.9242	0.7826	دقت انتخاب ژنوتیپ (As)	Genotype selection accuracy
0.5559	0.5516	0.5271	0.6690	0.6668	همبستگی بین مقادیر ژنوتیپی در میان محیطها (r_{ge})	Correlation between genotypic values among environments
0.5729	0.4404	2.698	13.14	11.44	ضریب تغییرات ژنوتیپی (%)	Genotypic coefficient of variation (CV _g)
1.122	1.008	6.042	10.61	17.86	ضریب تغییرات مقادیر باقیمانده (%)	Residual coefficient of variation (CV _r)
0.5106	0.4367	0.4465	1.238	0.6403	نرخ ضریب تغییرات ژنوتیپی بر ضریب تغییرات مقادیر باقیمانده	CV _g /CV _r ratio
22.35	24.26	6.82	1.11	402.99	انحراف معیار باقیمانده	Standard deviation
1.11	1.21	0.34	0.06	20.05	خطای استاندارد	Standard error
38.93 (33.64)	0.05512 (12.92)	0.2696 (11.58)	0.03582 (18.47)	0.02803 (15.45)	واریانس ژنوتیپی (σ^2_g)	Genotypic variance
51.29 (44.31)	0.2260 (52.97)	1.319 (56.69)	0.09845 (50.76)	0.05671 (31.26)	واریانس ژنوتیپ در محیط (σ^2_{gei})	Variance of Genotype \times Environment
25.52 (22.05)	0.1455 (34.11)	0.7383 (31.72)	0.05968 (30.77)	0.09669 (53.29)	واریانس باقیمانده (σ^2_e)	Variance of residual value
115.7	0.4266	2.327	0.1940	0.1814	واریانس فنوتیپی (σ^2_p)	Phenotypic variance
0.3364	0.1292	0.1158	0.1847	0.1545	وراثت پذیری عمومی (h^2)	General heritability
0.4431	0.5297	0.5669	0.5076	0.3126	ضریب تشخیص اثرهای ژنوتیپ در محیط (R^2_{gei})	Detection coefficient of GEI effects
0.8542	0.6438	0.6078	0.7315	0.8152	میانگین وراثت پذیری ژنوتیپی (h^2_{mg})	Average genotypic heritability
0.9242	0.8024	0.7796	0.8552	0.9029	دقت انتخاب ژنوتیپ (As)	Genotype selection accuracy
0.6677	0.6083	0.6412	0.6226	0.3697	همبستگی بین مقادیر ژنوتیپی در میان محیطها (r_{ge})	Correlation between genotypic values among environments
13.14	11.78	11.30	12.78	6.260	ضریب تغییرات ژنوتیپی (%)	Genotypic coefficient of variation (CV _g)
10.64	19.14	18.71	16.50	11.63	ضریب تغییرات مقادیر باقیمانده (%)	Residual coefficient of variation (CV _r)
1.235	0.6155	0.6043	0.7747	0.5384	نرخ ضریب تغییرات ژنوتیپی بر ضریب تغییرات مقادیر باقیمانده	CV _g /CV _r ratio
11.13	0.89	0.12	0.54	0.92	انحراف معیار باقیمانده	Standard deviation
0.55	0.04	2.48	0.03	0.05	خطای استاندارد	Standard error

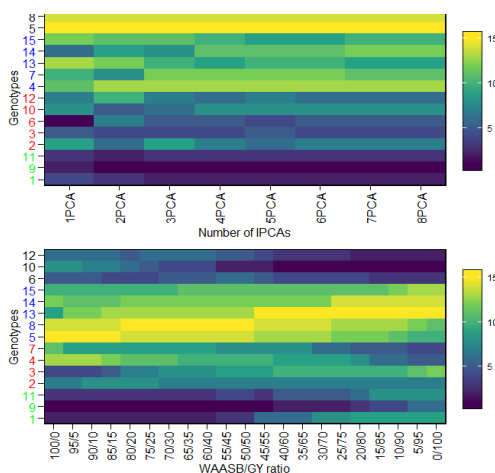
مختلف بر پایه هر کدام از دو شاخص پایداری دانه، می‌توان ژنوتیپ‌های برتر را شناسایی کرد. بر اساس وزن ۵۰:۵۰ برای دو شاخص پایداری عملکرد و عملکرد دانه (WAASBY)، ژنوتیپ‌های ۱، ۹، ۶، ۱۰، ۱۱ و ۱۲ نسبت به ژنوتیپ‌های دیگر برتر بودند. در سمت چپ این نمودار، ژنوتیپ‌ها بر پایه نمود عملکرد و پایداری به چهار خوشه تقسیم شدند، در خوشه اول، ژنوتیپ‌های ۱، ۹ و ۱۲ (سبز رنگ) دارای عملکرد پایین و پایدار بودند. ژنوتیپ‌های ۲، ۳، ۴ و ۷ در خوشه دوم (قرمز رنگ) پر محصول و ناپایدار، ژنوتیپ‌های ۵، ۸، ۱۳، ۱۴ و ۱۵ در خوشه سوم (آبی رنگ) کم محصول و ناپایدار بودند. در خوشه چهارم، ژنوتیپ‌های ۶، ۱۰ و ۱۲ (مشکی رنگ) پر محصول و پایدار بودند.

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

در ستون‌های مختلف شکل ۲، وزن‌های متفاوتی به متغیر وابسته و شاخص پایداری داده شده است، به طوری که در اولین ستون سمت چپ و بر اساس وزن دهی ۱۰۰ برای شاخص پایداری WAASB، ژنوتیپ‌های ۱، ۹، ۱۱ و ۳ (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) به میزان پنج درصد کاسته شد، به طوری که در آخرین ستون سمت راست، رتبه‌بندی ژنوتیپ‌ها فقط بر اساس عملکرد دانه بود. بر این اساس، ژنوتیپ‌های ۶، ۱۲، ۱۰ و ۷، عملکرد بیشتری در مقایسه با ژنوتیپ‌های دیگر داشتند. در این نمودار با توجه به وزن‌های



شکل ۱- بای‌پلات عملکرد دانه در مقابل WAASB، دایره آبی در گوشه سمت راست، یک ژنوتیپ فرضی بسیار پر محصول 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. Biplot of the seed yield vs WAASB. Blue circle in the right corner and horizontal and vertical blue arrows in the left corner indicates a hypothetical highly productive and broadly adapted and the direction of the increase in yield and stability, respectively



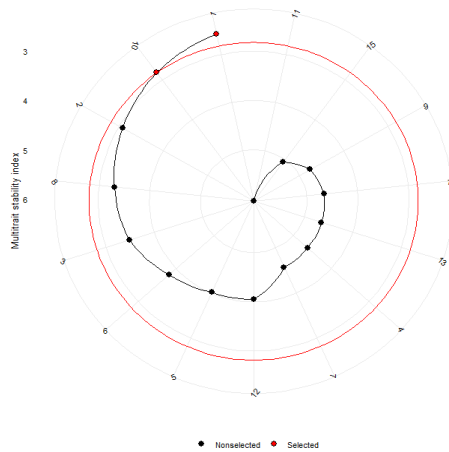
شکل ۲- رتبه‌بندی ژنوتیپ‌های عدس بر اساس وزن‌دهی مختلف برای پایداری و عملکرد دانه
 Figure 2. Lentil genotypes ranking based on different weights for stability and yielding

۷۸۹، ۷۷۷ و ۷۶۸ کیلوگرم در هکتار بود. با فرض انتخاب این چهار ژنوتیپ با رتبه‌بندی برتر برای عملکرد دانه، انتظار افزایش ۱۰/۴ درصدی نسبت به میانگین کل (۷۳۱ کیلوگرم در هکتار) وجود دارد. از آنجا که این شاخص، هم پایداری و هم سازگاری را بیان می‌کند، نشان‌دهنده ظرفیت پاسخ ژنوتیپی مثبت به بهبود شرایط محیطی و پایداری ژنوتیپ‌ها است. پایداری ژنوتیپ‌های ۱۰، ۹، ۴ و ۱۲ با مقادیر شاخص HMRPGV برابر با ۱/۱۴، ۱/۰۸، ۱/۰۶ و ۱/۰۵ بود که به ترتیب افزایش ۱۶/۲، ۶/۹، ۸/۳ و ۱۰/۳ درصدی را نسبت به میانگین کلی عملکرد دانه نشان داد. اهمیت سازگاری در اصلاح نباتات، توجه تلاش به‌زادگر برای شناسایی رفتار مطلوب در رقم تازه معرفی شده است (Ceccarelli, 1989). روش HMRPGV مشابه روش لین و بینز (Lin and Binns, 1991) است، با این حال، برخلاف این روش که بر نتایج فوتیپی استوار است، روش HMRPGV همزمان داده‌های عملکرد دانه، سازگاری و پایداری را در یک زمینه ژنوتیپی پردازش می‌کند (de Resende, 2007).

شاخص پایداری چند صفتی (MTSI) و انتخاب ژنوتیپ نزدیک به ایده‌آل

رتبه‌بندی ژنوتیپ‌ها در نمودارهای بالا فقط بر اساس عملکرد و پایداری عملکرد دانه انجام شده است، حال آن که در شکل ۳، و بر اساس شاخص پایداری چند صفتی (MTSI)، ژنوتیپ‌های ۱ و ۱۰ به‌عنوان ژنوتیپ برگزیده از ژنوتیپ‌های 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، بنابراین، این شاخص یک فرآیند گزینش منحصر به فرد و آسان است (Olivoto *et al.*, 2019b).

بر اساس تجزیه پایداری ژنوتیپ‌ها با استفاده از میانگین هارمونیک و عملکرد نسبی ارزش ژنوتیپی بر اساس نتایج شاخص HMGV (جدول ۵)، ژنوتیپ‌های ۱۰، ۹، ۴ و ۱۲ عملکرد بهتری نسبت به ارقام شاهد کیمیا، بیله‌سوار و توده محلی داشتند. حاصلضرب شاخص HMRPGV و میانگین کلی (HMRPGV* μ) برای این چهار ژنوتیپ به ترتیب ۸۳۳،



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

جدول ۵- رتبه‌بندی ژنوتیپ‌ها بر پایه پارامترهای سازگاری ارزش‌های ژنوتیپی برای عملکرد دانه ژنوتیپ‌های عدس
Table 5. Lentil genotypes ranking based on the adaptability parameters of genotypic values for seed yield of lentil genotypes

genotypes	HMRPGV_R	HMRPGV_Y	HMRPGV	RPGV_R	RPGV_Y	RPGV	HMGV orde	HMGV	Y	GE
8	734	1	8	746	1.02	8	608	739	G1	
12	669	0.915	10	739	1.01	13	517	778	G2	
9	711	0.972	11	727	0.994	10	600	711	G3	
3	777	1.06	5	793	1.08	3	641	792	G4	
11	694	0.949	12	715	0.978	12	552	731	G5	
4	774	1.06	4	793	1.09	6	628	799	G6	
5	772	1.06	6	780	1.07	5	632	792	G7	
10	710	0.971	9	745	1.02	7	617	717	G8	
2	789	1.08	3	808	1.11	2	666	782	G9	
1	833	1.14	1	837	1.14	1	684	850	G10	
7	738	1.01	7	753	1.03	9	607	768	G11	
6	768	1.05	2	811	1.11	4	636	807	G12	
15	376	0.514	15	441	0.603	15	297	410	G13	
14	535	0.731	14	587	0.803	14	401	606	G14	
13	664	0.908	13	693	0.947	11	557	683	G15	

نیز برخوردار بودند. در مجموع و بر اساس تمام تجزیه‌ها، ژنوتیپ ۱، ۱۰، ۶ و ۱۲ پایدارترین ژنوتیپ‌ها بودند که علاوه بر عملکرد دانه، از نظر سایر صفات اندازه‌گیری شده نیز بر ژنوتیپ‌های دیگر برتری داشت و می‌تواند نامزد معرفی به‌عنوان ارقام جدید باشند.

تشکر و قدردانی

این تحقیق منتج از پروژه مصوب مؤسسه تحقیقات کشاورزی دیم به شماره ۹۸۰۹۹۸-۹۸-۰۳۷-۱۵-۱۵-۰ می‌باشد که بدین وسیله سپاسگزاری می‌شود.

نتیجه‌گیری کلی

بر پایه بای‌پلات نوع سوم، ژنوتیپ‌های ۴، ۶، ۷، ۹ و ۱۰ دارای عملکرد دانه بیشتر از متوسط عملکرد ژنوتیپ‌ها و پایداری بیشتری نسبت به ژنوتیپ‌های دیگر بودند. رتبه‌بندی ژنوتیپ‌ها بر پایه وزن‌های متفاوت برای متغیر وابسته و شاخص پایداری (WAASB) نشان داد که ژنوتیپ‌های ۶، ۱۰ و ۱۲ بر محصول و سازگار بودند. شاخص گزینش چندصفتی (MTSI) بر پایه تجزیه عاملی، ژنوتیپ‌های ۱ و ۱۰ را به‌عنوان ژنوتیپ برتر گزینش نمود. بر پایه شاخص HMRPGV، ژنوتیپ‌های ۱۰، ۹، ۴ و ۱۲ علاوه بر عملکرد بالا، از پایداری و سازگاری بالایی

References

Abo-Hegazy, S. R. E., Selim, T., & Ashrie, A. A. M. (2013). Genotype × environment interaction and stability analysis for yield and its components in lentil. *Journal of Plant Breeding and Crop Science*, 5(5), 85-90. <https://doi.org/10.5897/JPBCS12.066>

Akinci, C., Bicer, B. T., Kizilgeci, F., Albayrak, Ö., & Yildirim, M. (2018). Stability parameters in lentil genotypes. *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, 5(2), 287-291. <https://doi.org/10.31202/ecjse.403995>

Barrios, A., Aparicio, T., Rodríguez, M. J., de la Vega, M. P., & Caminero, C. (2016). Winter sowing of adapted lines as a potential yield increase strategy in lentil (*Lens culinaris* Medik.). *Spanish Journal of Agricultural Research*, 14(2), e0702. <https://doi.org/10.5424/sjar/2016142-8092>

Bhattacharya, S., Das, A., Banerjee, J., Mandal, S. N., Kumar, S., & Gupta, S. (2022). Elucidating genetic variability and genotype× environment interactions for grain iron and zinc content among diverse genotypes of lentils (*Lens culinaris*). *Plant Breeding*, 141(6), 786-800. <https://hdl.handle.net/20.500.11766/68227>

Ceccarelli, S. (1989). Wide adaptation: How wide? *Euphytica*, 40, 197-205. <https://doi.org/10.1007/BF00024512>

Dehghani, H., Sabaghpour, S. H., & Sabaghnia, N. (2008). Genotype x environment interaction for grain yield of some lentil genotypes and relationship among univariate stability statistics. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 3(3), 385-394. <https://doi.org/10.5424/sjar/2008063-5292>

Coan, M. M. D., Marchioro, V. S., Franco, F. D. A., Pinto, R. J. B., Scapim, C. A., & Baldissera, J. N. C. (2018). Determination of genotypic stability and adaptability in wheat genotypes using mixed statistical models. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 20(7), 1525-1540.

- Fernandez, G. C. (1991). Analysis of genotype \times environment interaction by stability estimates. *HortScience*, 26(8), 947-950.
- Ghaffar, M., Asghar, M. J., Shahid, M., & Hussain, J. (2023). Estimation of G \times E Interaction of Lentil Genotypes for yield using AMMI and GGE Biplot in Pakistan. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 23, 2316-2330. <https://doi.org/10.1007/s42729-023-01182-x>
- Holland, J. B. (2006). Estimating genotypic correlations and their standard errors using multivariate restricted maximum likelihood estimation with SAS Proc MIXED. *Crop Science*, 46(2), 642-654. <https://doi.org/10.2135/cropsci2005.0191>
- Jahufer, M. Z. Z., & Casler, M. D. (2015). Application of the Smith-Hazel selection index for improving biomass yield and quality of switchgrass. *Crop Science*, 55(3), 1212-1222. <https://doi.org/10.2135/cropsci2014.08.0575>
- Jeberson, M. S., Shashidhar, K. S., Wani, S. H., Singh, A. K., & Dar, S. A. (2019). Identification of stable lentil (*Lens culinaris* Medik) genotypes through GGE biplot and AMMI analysis for North Hill Zone of India. *Legume Research-An International Journal*, 42(4), 467-472. <https://doi.org/10.18805/LR-3901>
- Karimizadeh, R., Mohammadi, M., & Sabaghnia, N. (2013). Site regression biplot analysis for matching new improved lentil genotypes into target environments. *Journal of Plant Physiology and Breeding*, 3(2), 51-65.
- Kochaki, A., & Banayan aval, M. (1993). Pulse crops. Mashhad University of Jihad Press. 236 pp.
- Lin, C. S., & Binns, M. R. (1991). Genetic properties of four types of stability parameter. *Theoretical and Applied Genetics*, 82, 505-509. <https://doi.org/10.1007/BF00588606>
- Namdari, A., Pezeshkpour, P., Mehraban, A., Naseri, A., Vaezi, B., & Nazarli, H. (2022). Evaluation the grain yield stability of promising rainfed lentil genotypes using parametric and non-parametric statistics. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 53(3), 153-167 (In Persian).
- 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>
- Pezeshkpour, P., & Karimizadeh, R. (2023). Evaluation of the mean performance and stability of chickpea genotypes by integration AMMI and BLUP models and selection based on Multi-Trait Stability Index (MTSI). *Journal of Crop Breeding*, 15(46), 73-83 (In Persian).
- Pour-Aboughadareh, A., Ghazvini, H., Barati, A., Koohkan, S., & Arazmjoo, E. (2023). Selection of promising genotypes of barley using the best linear unbiased predictor model (BLUP). *Journal of Crop Breeding*, 15(46), 1-10 (In Persian).
- de Resende, M. D. V. (2007). *Matemática e estatística na análise de experimentos e no melhoramento genético*. Colombo: Embrapa Florestas, 2007.
- Rocha, J. R. D. A. S. D. C., 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>
- Sabaghpour, S. H., Safikhni, M., Sarker, A., Ghaffri, A., & Ketata, H. (2004, June). Present status and future prospects of lentil cultivation in Iran. In Proc 5th European Conference on Grain Legumes (pp. 7-11).
- Sabaghnia, N., Dehghani, H., & Sabaghpour, S. H. (2006). Nonparametric methods for interpreting genotype \times environment interaction of lentil genotypes. *Crop Science*, 46(3), 1100-1106. <https://doi.org/10.2135/cropsci2005.06-0122>
- Sellami, M. H., Pulvento, C., Aria, M., Stellacci, A. M., & Lavini, A. (2019). A systematic review of field trials to synthesize existing knowledge and agronomic practices on protein crops in Europe. *Agronomy*, 9(6), 292. <https://doi.org/10.3390/agronomy9060292>
- Sellami, M. H., Pulvento, C., & Lavini, A. (2021). Selection of suitable genotypes of lentil (*Lens culinaris* Medik.) under rainfed conditions in south Italy using multi-trait stability index (MTSI). *Agronomy*, 11(9), 1807. <https://doi.org/10.3390/agronomy11091807>
- Sharifi, P. 2020. *Application of Multivariate Analysis Methods in Agricultural Sciences*. Rasht Branch, Islamic Azad University Press, IR., 288 pp (In Persian).
- Sharifi, P., Sheikh, F., Miri, K., Sekhvat, R., & Asteraki, H. (2022). Evaluation of seed yield stability of faba bean genotypes by linear mixed-effects models (LMM). *Iranian Journal of Field Crop Science*, 53(2), 97-107 (In Persian).
- Yadav, N. K., Ghimire, S. K., Sah, B. P., Sarker, A., Shrestha, S. M., & Sah, S. K. (2016). Genotype \times environment interaction and stability analysis in lentil (*Lens culinaris* Medik.). *International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology*, 1(3), 238539.
- Yan, W., & Kang, M. S. (2002). *GGE biplot analysis: A graphical tool for breeders, geneticists, and agronomists*. CRC press.
- Zaccardelli, M., Sonnante, G., Lupo, F., Branca, F., & de Falco, E. (2010). *Leguminose Minori (Cece, Lenticchia, Cicerchia, Fava)*; Consiglio per Ricerca Sperimentazione Agricoltura: Rome, Italy, 73 pp ISBN 978-88-97081-00-5.