



Evaluation of Seed Yield Stability of Advanced Lentil (*Lens culinaris* Medik) Genotypes using the AMMI, BLUP, and MGIDI Indices

Payam Pezeshkpour^{1*}, Reza Amiri¹, Amir Mirzaei², Asghar Mehraban³, Amin Namdari⁴

Received: 05 February 2025

Revised: 21 July 2025

Accepted: 16 August 2025

Available Online: 16 August 2025

Cite this article:

Pezeshkpour, P., Amiri, R., Mirzaei, A., Mehraban, A., & Namdai, A. (2025). Evaluation of performance stability of lentil genotypes using AMMI, BLUP and MGIDI indexes. *Iranian Journal of Pulses Research*, 16(2), 227-248. (In Persian with English Abstract). <https://doi.org/10.22067/ijpr.2025.91978.1105>

Introduction

Lentil (*Lens culinaris* Medik) is considered one of the most important legumes due to its protein content and high nutritional value. Its yield, like that of other crops, is an important and challenging trait for genetic improvement, because it is influenced by various factors that have detrimental effects on seed yield and traits related to seed quality. One of the key aspects in plant breeding studies is the understanding of the interaction between genotypes and different environments. The existence of genotype-by-environment interaction (GEI) in field trials of many crop plants indicates that yield stability, along with high average yield, should be considered as an important aspect of yield comparison trials. The aim of the present study was to determine stable and high-yielding lentil genotypes across different environments using various stability indices.

Materials and Methods

In this study, fourteen advanced lentil genotypes along with two check cultivars (Gachsaran and Sepehr) were evaluated based on a randomized complete blocks design with three replications at Khorramabad, Gachsaran, and Ilam Agricultural Research Stations for two cropping seasons (2020-2022), and at the Mughan Station for one crop year (2020-2021). Seeds were sown with a Wintersteiger research seeder in four rows, each 4 m long, with 25 cm spacing between rows (plot area of 4 m²). Weed control was carried out using a hand cultivator in two stages during the vegetative growth period. Before harvesting, the two outer rows and 0.5 m from both ends of the two central rows were discarded, and the remaining area of each plot (1.5 m²) was harvested manually and grain yield was calculated. Grain yield, 100 seed weight, plant height, days to flowering, days to maturity, kernel filling period, kernel filling rate, rain water productivity, seed yield formation rate, and weight of single seed were measured in all seven environments for each genotype. All statistical analyses were performed using GGE and the multi-environmental analysis package “metan” in R software.

Results and Discussion

The mosaic diagram showed that the contribution of the sum of squares of genotype and the genotype-by-environment interaction (GEI) in the total sum of squares was 2.2 and 43.19%, respectively. The likelihood ratio test showed that the genotype by environment interaction was significant on grain yield, 100-grain weight, plant height, days to flowering, kernel filling rate, rain water productivity, and weight of single seed. The Scree test showed that the first two principal components had a significant contribution to the GEI matrix derived from BLUP, as the first and second principal components explained 44.4% and 32.2% of the GEI variation, respectively. The predicted grain yield means using BLUP method indicated that the highest predicted yield using BLUP method was for genotype 2, followed by genotypes 7, 14, 6, 10, 12, 1 and 4, all of which showed predicted yields higher than the overall mean. Genotypes 12, 1 and 4 had predicted

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

2- Crop and Horticultural Science Research Department, Ilam Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Ilam, Iran

3- Crop and Horticultural Science Research Department, Ardabil Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Mughan, Iran

4- Dryland Agricultural Research Institute, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Gachsaran, Iran

* Corresponding Author: p.pezeshkpour@areeo.ac.ir



Authors retain the copyright. This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

yield very close to the average, and the lowest predicted yield with a large distance from the total average was related to genotypes 15, 3 and 9 (Gachsaran). Factor analysis based on the traits measured in the studied genotypes showed that four main components remained in the model, and the cumulative variance of these four components was 91.85%. For grain yield, the genotype-by-environment interaction (GEI) coefficient of explanation and average genotypic heritability were 0.4319 and 0.2065, respectively. The accuracy of genotype selection and the correlation between genotype values across environments were 0.454 and 0.442, respectively. Also, the genotypic coefficient of variation, the residual coefficient of variation, and the ratio of these two coefficients of variation were 4.48%, 21.9%, and 0.204, respectively. The traits of grain yield formation rate, rain water productivity, and plant height showed the greatest contribution to seed yield.

Conclusions

In general, the results showed that the genotype-by-environment interaction was significant on grain yield, 100-seed weight, plant height, days to flowering, days to maturity, grain filling period, grain filling rate, grain yield formation rate, rain water productivity, and single grain weight. Overall, based on the results of all methods and simultaneous selection for grain yield stability and associated traits, genotypes 4, 2, 13, 14, 1, 7, and 10 were identified as stable and superior to the average of all genotypes. Notably, genotype 2 outperformed the others, with a grain yield of 969 kg ha^{-1} , plant height of 46.6 cm, seed yield formation rate of $63.6 \text{ kg ha}^{-1} \text{ day}^{-1}$, and rainwater productivity of 82.2 kg mm^{-1} , exceeding the average values across all measured traits in this study.

Acknowledgement

Financial support for this research (approved code: 00-59-15-018-001055) is from the Dryland Agriculture Research Institute (DARI), Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Iran. We would like to express our gratitude to the Agricultural Research, Education and Extension Organization.

Keywords: Heatmap plot, Mosaic plot, Multi-trait stability, Simultaneous selection, Single value decomposition



ارزیابی پایداری عملکرد دانه ژنوتیپ‌های پیشرفته عدس (*Lens culinaris Medik*) براساس شاخص‌های مبتنی بر مدل‌های AMMI، BLUP و MGIDI

پیام پزשکپور^{۱*}، رضا امیری^۱، امیر میرزایی^۲، اصغر مهربان^۳، امین نامداری^۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۲۵

چکیده

عدس (*Lens culinaris Medik*) به واسطه درصد پروتئین و ارزش تغذیه‌ای زیاد، یکی از حبوبات مهم محسوب می‌شود. این پژوهش برای شناسایی ژنوتیپ‌های پایدار و پرمحصول عدس اجرا گردید. در این پژوهش، ۱۴ ژنوتیپ پیشرفته عدس همراه با دو رقم شاهد گچساران و سپهر در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار، در ایستگاه‌های تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی سراب چنگائی خرم‌آباد، گچساران و ایلام به مدت دو سال زراعی (۱۴۰۰-۱۴۰۲)، و در ایستگاه مغان به مدت یک سال زراعی (۱۴۰۰-۱۴۰۱) مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج نمودار موزائیکی نشان داد که سهم مجموع مربعات ژنوتیپ و برهم‌کنش ژنوتیپ در محیط در مجموع مربعات کل به ترتیب ۲۰/۲ و ۱۹/۴ درصد بود. آزمون نسبت درست‌نمایی نشان داد که برهم‌کنش ژنوتیپ در محیط بر عملکرد دانه، وزن ۱۰۰ دانه، ارتفاع بوته، روز تا گل‌دهی، سرعت پُر شدن دانه، بهره‌وری از بارش و وزن تک دانه معنی‌دار بود. آزمون اسکری نشان داد که دو مؤلفه اصلی اولیه، سهم قابل توجهی در توجیه برهم‌کنش ماتریس ژنوتیپ در محیط داشتند، به‌طوری که مؤلفه اصلی اول و دوم به ترتیب ۴۴/۴ و ۳۲/۲ درصد از تغییرات برهم‌کنش ژنوتیپ در محیط را توجیه کردند. در مجموع، براساس نتایج کل روش‌ها و انتخاب همزمان براساس پایداری عملکرد دانه و همه صفات اندازه‌گیری‌شده، ژنوتیپ‌های شماره ۴، ۲، ۱۳، ۱۴، ۷ و ۱۰ ژنوتیپ‌هایی پایدار و برتر نسبت به میانگین کل ژنوتیپ‌ها بودند. صفات سرعت تشکیل عملکرد دانه، بهره‌وری از بارش و ارتفاع بوته بیشترین تأثیر را بر عملکرد دانه داشتند.

واژه‌های کلیدی: پایداری چندصفتی، تجزیه مقادیر منفرد، گزینش همزمان، نمودار گرمایی، نمودار موزائیکی

مقدمه

عدس (*Lens culinaris Medik*) یکی از حبوبات مهم و سرمدوست در منطقه مدیترانه است که به دلیل بهبود حاصلخیزی خاک و نیز دانه‌های مغذی و سرشار از مواد غذایی مفید برای انسان و دام، به‌طور گسترده کشت و مصرف می‌شود. عملکرد دانه عدس همانند سایر محصولات زراعی، یک صفت مهم و چالش‌برانگیز برای بهبود ژنتیکی آن است، زیرا تحت تأثیر عوامل مختلف ژنتیکی، محیطی، زراعی و مدیریتی است که اثرات مضر بر عملکرد دانه و صفات مرتبط با کیفیت بذر دارد (Sellami et al., 2021).

اثرات گرما و خشکی در تولید عدس با تغییرات آب‌وهوای جهانی در چند دهه اخیر بیشتر شده است. خشکی به دلیل بسته شدن روزنه‌ها، تأثیر قابل توجهی بر فتوسنتز دارد و جریان دی‌اکسیدکربن به بافت مزوفیل را کاهش می‌دهد (Chaves et al., 2003). خشکی همچنین کمبودهای متابولیک را تشدید می‌کند و باعث کاهش در

تجدید فعالیت آنزیم روبیسکو (Parry et al., 2002)، کاهش تولید ATP، فتوفسفریلاسیون و فسفر معدنی و همین‌طور کاهش سطح برگ به دلیل پیری بیشتر برگ می‌شود (De Souza et al., 1997). تنش خشکی همراه به دماهای بالا، با اثرگذاری بر اندازه و تولید دانه عدس (Sehgal et al., 2017) سبب کاهش عملکرد می‌شود (Kumar et al., 2016).

یکی از مطالعات مهم در اصلاح نباتات و بررسی‌های به‌نژادی، شناخت اثر متقابل بین ژنوتیپ‌ها با محیط‌های گوناگون است. وجود برهم‌کنش ژنوتیپ در محیط در آزمایش‌های ناحیه‌ای بسیاری از گیاهان زراعی نشان می‌دهد که پایداری عملکرد همراه با میانگین عملکرد بالا، باید به‌عنوان یک جنبه مهم آزمایش‌های مقایسه عملکرد در نظر گرفته شود، زیرا برهم‌کنش ژنوتیپ در محیط می‌تواند هرگونه پیشرفت ناشی از گزینش را کاهش دهد. پژوهشگران روش‌های زیادی برای تجزیه پایداری ارائه داده‌اند که به دو دسته کلی پارامتری

۱- بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان لرستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، خرم‌آباد، ایران

۲- بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان ایلام، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ایلام، ایران

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

۴- مؤسسه تحقیقات کشاورزی دیم کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، گچساران، ایران

(*)- نویسنده مسئول: p.pezeshkpour@areeo.ac.ir

(b). این روش، راهکاری برای توانایی پیش‌بینی بهتر است که در آن، بهترین پیش‌بینی نارایب خطی روی ماتریس برهم‌کنش ژنوتیپ در محیط تخمین زده می‌شود و تجزیه پایداری به‌روش AMMI روی این پیش‌بینی‌ها انجام می‌گردد (Olivoto et al., 2019 a). یکی از مزایای BLUP، تخمین میانگین‌ها با دقت بالا در مدل‌های مخلوط می‌باشد و زمانی که اثر مختلط خطی وجود داشته باشد، این روش پیش‌بینی دقیق‌تری از اثرات تصادفی را فراهم می‌کند (Smith et al., 2005).

با تلفیق روش‌های AMMI و BLUP، یک ماتریس اثر متقابل ژنوتیپ با محیط در قالب یک مدل مخلوط خطی مبتنی بر BLUP ایجاد می‌شود که با تجزیه این ماتریس، آماره‌ای تحت عنوان شاخص پایداری میانگین وزنی نمرات مطلق (WAASB^۳) به دست خواهد آمد که قادر به وزن‌دهی بین عملکرد دانه و پایداری آن است (Olivoto et al., 2019 b). از دیگر شاخص‌های به‌دست‌آمده از تلفیق مدل‌های AMMI و BLUP می‌توان به شاخص WAASBY^۴ اشاره نمود که هر دو معیار عملکرد دانه و پایداری را توأمان در نظر گرفته و باعث می‌شود که گزینش براساس آن با دقت و کارایی بالاتری صورت گیرد (Olivoto et al., 2019 a). در این شاخص، به‌نژادگر براساس هدف اصلاحی خود، به هر یک از دو معیار عملکرد دانه و پایداری، وزن‌های متفاوتی داده و می‌تواند ارزیابی ژنوتیپ‌ها را براساس آن انجام دهد. در نمودار WAASB از رویکرد مدل مخلوط استفاده می‌شود که با آن تخمین پارامترهای واریانس ژنوتیپی، برهم‌کنش ژنوتیپ × محیط، وراثت‌پذیری عمومی، وراثت‌پذیری براساس میانگین و همبستگی‌های ژنتیکی در نظر گرفته می‌شود. از دیگر مزایای این شاخص، استفاده از همه مؤلفه‌های اصلی است، بنابراین پایداری را به‌شکل بهتری نشان می‌دهد و ژنوتیپ‌های انتخابی از پایداری مطمئن‌تری برخوردار خواهند بود (Olivoto et al., 2019 b).

جنبه دیگری از تلفیق دو روش AMMI و BLUP، بهره‌گیری از ابزارهای گرافیکی تجزیه AMMI در شاخص‌های برآورد شده است؛ به‌طوری که برای کمک به تفسیر چشمی، گرافیک‌هایی برای نشان دادن میانگین متغیر پاسخ در برابر WAASB ایجاد شدند (Olivoto et al., 2019 a). این ابزارهای گرافیکی که در پدیدآوری آن‌ها از ابزارهای AMMI و بای‌پلات‌های GGE بهره گرفته می‌شوند، برای نشان دادن چشمی جایگاه ژنوتیپ‌ها از نظر پایداری و میزان عملکرد، بسیار کاربردی هستند.

(تک متغیره یا چند متغیره) و ناپارامتری تقسیم می‌شوند. در بین روش‌های چند متغیره می‌توان روش‌های اثرات اصلی جمع‌پذیر و اثر متقابل ضرب‌پذیر (AMMI) و GGE بای‌پلات را نام برد (Wright & Laffont, 2018).

علی‌رغم مزایای مدل AMMI و استفاده گسترده از آن، این مدل در تشریح ساختار مدل خطی اثر مخلوط خطی (LMM) کارایی ندارد. برای برطرف کردن این مشکل، استفاده از مدل بهترین پیش‌بینی‌های نارایب خطی (BLUP^۱) پیشنهاد شده است (Olivoto et al., 2019 a). این روش در صورت وجود اثرات LMM، پتانسیل بالایی در پیش‌بینی دقیق‌تر اثرات تصادفی دارد. در محیط‌های اخیر، روش بهترین پیش‌بینی‌های نارایب خطی (BLUP) که میانگین‌ها را با دقت بالا، به‌ویژه در مدل‌های مختلط تخمین می‌زند نیز برای ارزیابی داده‌های آزمایش‌های چندمحیطی به کار گرفته شده است (Olivoto et al., 2019 b). مدل آماری BLUP راهکاری برای توانایی پیش‌بینی بهتر است که در آن، بهترین پیش‌بینی‌های نارایب خطی بر روی ماتریس برهم‌کنش ژنوتیپ در محیط تخمین زده می‌شود و تجزیه پایداری به‌روش AMMI بر روی این پیش‌بینی‌ها انجام می‌شود (Olivoto et al., 2019 a). در هنگام وجود اثر مختلط خطی، این روش پتانسیل پیش‌بینی دقیق اثرات تصادفی را فراهم می‌کند (Smith, 1936). در روش ارائه‌شده توسط اولیوتو و همکاران (Olivoto et al., 2019 a) برای بهره‌گیری از مزایای دو روش AMMI و BLUP، با مدل اثرهای مختلط خطی، یک ماتریس برهم‌کنش ژنوتیپ در محیط به دست می‌آید و از تجزیه این ماتریس با روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی با تجزیه ارزش منفرد، یک معیار پایداری ژنوتیپی به‌نام شاخص پایداری میانگین وزنی نمرات مطلق بهترین پیش‌بینی‌های نارایب خطی معرفی شد که حاصل تلفیق دو روش AMMI و BLUP است (Olivoto et al., 2019 a).

روش حداکثر درست‌نمایی محدودشده (REML^۲) یکی از روش‌های مهم برای تجزیه داده‌های چند محیطی است. در این روش، محدودیت تجزیه واریانس به‌روش کمترین مربعات برای داده‌های نامتعادل و همچنین متجانس برطرف می‌شود (Holland, 2006). مدل‌های مختلط مانند REML روش‌هایی مناسب برای محاسبه اجزای واریانس و بهترین پیش‌بینی نارایب خطی (BLUP) است که برای پیش‌بینی مقادیر ژنتیکی و اجزای واریانس استفاده می‌شوند (Resende, 2016). تجزیه BLUP، روشی مناسب در زمان معنی‌دار بودن برهم‌کنش ژنوتیپ در محیط می‌باشد (Olivoto et al., 2019).

1- Best Linear Unbiased Predictions (BLUP)

2- Restricted maximum likelihood

3- Weighted average of absolute scores

4- Weighted average of WAASB

بسته به وضعیت بارندگی مؤثر در هر چهار مکان، از نیمه دوم آذر انجام شد. زمین مورد کشت تحت تناوب غلات-حبوبات دیم بود. برای تهیه زمین در هر مکان، از گاوآهن چپزل مرکب برای شخم زدن استفاده شد و سپس با دیسک زدن، کلوخ‌شکنی انجام گردید. اطلاعات هواشناسی و نتایج تجزیه فیزیکی و شیمیایی خاک در جدول ۲ ارائه شده است. براساس نتایج آزمون خاک، ۷۵ تا ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار فسفات آمونیوم و ۳۵ تا ۵۰ کیلوگرم در هکتار اوره، به هنگام عملیات تهیه زمین، به‌طور یکنواخت با خاک مخلوط گردید. بذره‌های ارقام و ژنوتیپ‌های آزمایش قبل از کاشت به‌منظور جلوگیری از بروز بیماری‌های قارچی، با قارچ‌کش کاربوسکسین تیرام به نسبت دو در هزار و به‌مقدار ۳۰ گرم برای هر آزمایش ضدعفونی شدند. میزان بذر مصرفی ۲۰۰ دلنه در مترمربع تعیین گردید (Shobeiri et al., 2019). کاشت بذرها با کارنده تحقیقاتی وینتراشتاگر در چهار خط به‌طول چهار متر و به‌فاصله ۲۵ سانتی‌متر بین خطوط (چهار مترمربع) انجام شد. مبارزه با علف‌های هرز با استفاده از کولتیواتور دستی در دو مرحله در طول دوره رشد رویشی صورت گرفت. قبل از برداشت، دو خط کناری و ۰/۵ متر از ابتدا و انتهای دو خط وسط حذف و مابقی هر کرت (۱/۵ مترمربع) به‌صورت دستی برداشت شد و صفت عملکرد دانه محاسبه گردید.

عملکرد دلنه، وزن ۱۰۰ دلنه، ارتفاع بوته، تعداد روز تا گل‌دهی، تعداد روز تا رسیدگی، دوره پُر شدن دانه، سرعت پُر شدن دانه، بهره‌وری از بارش، سرعت تشکیل عملکرد دانه و وزن تک دانه در محیط‌های مختلف برای هر ژنوتیپ اندازه‌گیری شد. تعداد روز تا رسیدگی، از تاریخ کاشت تا رسیدگی دانه با استفاده از دسکریپتور عدس ثبت گردید (IBPGR, 1993). فاصله زمانی بین گل‌دهی تا رسیدن فیزیولوژیک به‌عنوان طول دوره پُر شدن دانه در نظر گرفته شد (Mohammadi et al., 2006). در زمانی که ۹۰ درصد بوته‌های هر کرت به مرحله رسیدگی فیزیولوژیک رسیدند، به‌عنوان تعداد روز تا رسیدگی در نظر گرفته شد. از حاصل تقسیم میانگین وزن تک دانه بر طول دوره پُر شدن دانه، میانگین سرعت پُر شدن دانه به میلی‌گرم دانه در روز به دست آمد (Mohammadi et al., 2006). سرعت تشکیل عملکرد دانه از تقسیم عملکرد دانه بر تعداد روز تا رسیدگی و برحسب کیلوگرم در هکتار در روز) اندازه‌گیری شد (Forouzi et al., 2016). از تقسیم وزن دانه‌های یک بوته بر تعداد دانه‌ها، متوسط وزن تک دانه محاسبه گردید (Joudi & Ebadi, 2015). شاخص بهره‌وری از بارش^۲ از تقسیم عملکرد دانه برحسب کیلوگرم در هکتار بر میزان

از طرفی، عملکرد دانه صفت کمی پیچیده‌ای است که توسط تعداد زیادی ژن کنترل می‌گردد و به‌شدت تحت تأثیر محیط قرار دارد و همچنین صفات بسیاری به‌تنهایی یا با هم، بر آن اثر می‌گذارند. بنابراین، انتخاب ژنوتیپ‌های مطلوب تنها براساس عملکرد سودمند نیست و چنانچه انتخاب براساس سایر صفات تأثیرگذار بر آن انجام شود، بسیار مفید خواهد بود (Sharifi et al., 2017). به‌طور کلی، در برنامه‌های اصلاحی، گزینش براساس یک صفت، به‌عنوان یک راهبرد مناسب تلقی نمی‌گردد، زیرا هیچ اطمینانی از دستاوردهای ژنتیکی در سایر صفات مهم وجود ندارد (Jahufer & Casler, 2015). ازاین‌رو، به‌نژادگران اغلب تلاش دارند که صفات مطلوب مختلف را در یک ژنوتیپ جدید با عملکرد بالا جمع نمایند (Olivoto & Nardino, 2020). برای این منظور، چندین شاخص برای انتخاب ژنوتیپ‌های برتر پیشنهاد شده است که از آن جمله، می‌توان به شاخص فاصله ژنوتیپ-ایدئوتیپ چند صفتی (MGIDI^۱) اشاره کرد که براساس تجزیه و تحلیل عاملی و فاصله از ایدئوتیپ معرفی شده است (Olivoto & Nardino, 2020) که بر گزینش ژنوتیپ و توصیه‌های مبتنی بر اطلاعات چندین صفت تأکید دارد. این شاخص قادر است که بیش از یک صفت وابسته را ارزیابی نموده و نقاط قوت و ضعف ژنوتیپ‌های گزینش‌شده را مشخص نماید (Al-Ashkar et al., 2023). این شاخص عمدتاً برای گزینش ژنوتیپ‌ها در برنامه اصلاح گیاهان زراعی براساس چندین صفت طراحی شده است و به‌طور موفقیت‌آمیزی در گزینش ژنوتیپ‌های برتر در محصولات زراعی مختلف مورد استفاده قرار گرفته است (Shirzad et al., 2022; Rahmati et al., 2024; Dastfall et al., 2024).

هدف از پژوهش حاضر، تعیین ژنوتیپ یا ژنوتیپ‌های پایدار با عملکرد بالا و مطلوب از نظر صفات مهم مانند ارتفاع بوته برای برداشت مکانیزه، وزن ۱۰۰ دانه بالاتر، سرعت و دوره پُر شدن دانه بالاتر در ژنوتیپ‌های عدس با بهره‌گیری از شاخص‌های مبتنی بر مدل‌های AMMI، BLUP و MGIDI بود.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش، ۱۴ ژنوتیپ پیشرفته عدس (جدول ۱) همراه با دو شاهد (رقم‌های گچساران و سپهر) در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار، در ایستگاه‌های تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی سراب چنگائی خرم‌آباد، گچساران و ایلام به مدت دو سال زراعی (۱۴۰۰-۱۴۰۲) و در ایستگاه مغان به مدت یک سال زراعی (۱۴۰۰-۱۴۰۱) ارزیابی شدند (در مجموع، هفت محیط). تاریخ کاشت

1- Multi Trait Genotype Ideotype Distance Index (MGIDI)
2- Rain water productivity

بارندگی در طول دوره رشد گیاه برحسب میلی‌متر محاسبه گردید (Oweis & Hachum, 2003).

ساده‌ترین مدل خطی با برهم‌کنش ژنوتیپ در محیط برای تجزیه و تحلیل داده‌های آزمایش‌های چند محیطی مدل BLUP به شرح معادله ۱ است.

$$y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \tau_j + (\alpha\tau)_{ij} + \gamma_{jk} + \varepsilon_{ijk} \quad (۱)$$

که در آن، y_{ijk} : متغیر پاسخ (عملکرد دانه) مشاهده‌شده در بلوک K ام از ژنوتیپ i ام در محیط j ام ($k=1, 2, \dots, b$; $j=1, 2, \dots, g$ ، $i=1, 2, \dots, g$ ، μ : میانگین کل، α_i : اثر ژنوتیپ i ام، τ_j : اثر محیط j ام، $(\alpha\tau)_{ij}$: اثر برهم‌کنش ژنوتیپ i ام با محیط j ام، γ_{jk} : اثر بلوک K ام درون محیط j ام و ε_{ijk} : خطای تصادفی است. در مدل اثر مخلوط با فرض اینکه α_i و $(\alpha\tau)_{ij}$ اثرات تصادفی هستند، مدل بالا به صورت معادله ۲ نوشته می‌شود.

$$y = X\beta + Zu + \varepsilon \quad (۲)$$

که در آن، y : یک بردار متغیر پاسخ $n \times 1$ است $n = \sum(gb)$ است $y = [y_{111}, y_{112}, \dots, y_{geb}]'$ β : بردار اثر ثابت ناشناخته $(eb) \times 1$ است $\beta = [\gamma_{11}, \gamma_{12}, \dots, \gamma_{geb}]'$ u : یک بردار اثرات تصادفی $m \times 1$ است $m = [g + ge] \times 1$ است $u = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_g, (\alpha\tau)_{11}, (\alpha\tau)_{12}, \dots, (\alpha\tau)_{ge}]'$ X : یک ماتریس $n \times (eb)$ است که y را به β مرتبط می‌کند، Z : یک ماتریس $n \times m$ است که y را به u مرتبط می‌کند، ε : بردار خطاهای تصادفی $n \times 1$ است $\varepsilon = [\gamma_{11}, \gamma_{12}, \dots, \gamma_{geb}]$. بردارهای β و u با استفاده از معادله ۳ محاسبه می‌شوند (Henderson, 1975).

$$\begin{bmatrix} \beta \\ u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X1R - 1X & X1R - 1Z \\ Z1R - 1X & Z1R - 1 + G - 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} X1R - 1Y \\ Z1R - 1Y \end{bmatrix} \quad (۳)$$

به منظور تعیین پایداری ژنوتیپ‌ها، از تجزیه به مقادیر منفرد (SVD)، روی ماتریس BLUPهای برهم‌کنش‌های ژنوتیپ در محیط با یک مدل اثر مخلوط خطی با روش حداکثر درست‌نمایی محدود شده برآورد شدند. از کمیت‌های پایداری WAASB و WAASBY برای کمی‌سازی پایداری از معادله‌های ۴ و ۵ بهره گرفته شد.

$$WAASB_i = \frac{\sum_{k=1}^p |IPCA_{ik} \times EP_k|}{\sum_{k=1}^p EP_k} \quad (۴)$$

$$WAASBY_i = \frac{\{W_Y \times [(\frac{GY_i}{GY_{max}}) \times 100]\} + [W_S \times (100 - \frac{WAASB_i}{WAASB_{min}})]}{W_Y + W_S} \quad (۵)$$

که در آن، $WAASB_i$: میانگین وزنی نمرات مطلق ژنوتیپ i ام، $IPCA_{ik}$: نمره ژنوتیپ i ام در K امین محور مؤلفه اصلی برهم‌کنش $(IPCA)$ و EP_k : مقدار واریانس توجیه‌شده توسط K امین $IPCA$ است. ژنوتیپ با کمترین مقدار $WAASB$ ، پایدار در نظر گرفته می‌شود. انتخاب همزمان برای میانگین عملکرد و پایداری (MPE^1) با شاخص $WAASBY$ انجام شد که در آن به میانگین عملکرد (Y) و شاخص پایداری ($WAASB$) وزن داده می‌شود و $WAASBY_i$ ، میانگین وزنی $WAASB$ و عملکرد دانه (GY) برای ژنوتیپ i ام، WY ، وزن داده‌شده به متغیر پاسخ (در این مورد، عملکرد دانه)، GY_i ، میانگین عملکرد دانه ژنوتیپ i ام با توجه به تمام محیط‌ها، GY_{max} ، بالاترین متوسط عملکرد دانه مشاهده‌شده، W_S ، وزن نسبت داده‌شده به شاخص پایداری (در این مورد، شاخص $WAASB$)، $WAASB_i$ ، میانگین وزنی نمرات مطلق ژنوتیپ i ام و $WAASB_{min}$ ، کمترین مقدار $WAASB$ مشاهده‌شده در بین ژنوتیپ‌ها است. در شاخص $WAASBY_i$ ژنوتیپ‌هایی با بیشترین مقدار، ژنوتیپ‌های برتر از نظر پایداری و عملکرد دانه هستند.

تمام تجزیه‌های آماری با استفاده از بسته تجزیه آزمایش‌های چندمحیطی با نام $Metan^2$ (Olivoto & Lúcio, 2020) و GGE (Wright & Laffont, 2018) در نرم‌افزار R انجام شد. برای تعیین کمیت پایداری ژنوتیپی، از تجزیه مقادیر منفرد^۲، بر روی ماتریس بهترین پیش‌بینی‌های نااریب خطی (BLUP) برهم‌کنش‌های ژنوتیپ در محیط^۳ با یک مدل اثر مختلط خطی^۴ استفاده گردید. اجزای واریانس با روش حداکثر درست‌نمایی محدود شده (REML) برآورد شدند و برای ارزیابی معنی‌داری اثرهای تصادفی، آزمون نسبت درست‌نمایی^۵ (LRT) به کار گرفته شد. استفاده از مدل REML محدودیت تجزیه واریانس به روش کمترین مربعات را برای داده‌های نامتعادل و همچنین نامتعانسان برطرف می‌کند (Holland, 2006). از طرفی دیگر، چنین مدلی برای به دست آوردن اجزای واریانس و برآورد مقادیر ژنتیکی و اجزای ژنتیکی کارایی بهتری دارند (Resende, 2016)، لذا روش REML/BLUP به دلیل در نظر گرفتن مقادیر ژنوتیپی (نه فنوتیپی)، دقت بیشتری در روند برنامه‌های اصلاحی دارد و اجازه انتخاب بهترین ژنوتیپ‌ها را فراهم می‌کند.

مقادیر ویژه، واریانس نسبی، تجمعی و نیز ضرایب عاملی پس از چرخش وریماکس در تجزیه به عامل‌ها براساس تجزیه به مؤلفه‌های اصلی برای تعیین شاخص پایداری چند صفتی با استفاده از نرم‌افزار R

- 1- Mean performance and stability, MPE
- 2- Multi environment trial analysis
- 3- SVD
- 4- GEI
- 5- LMM
- 6- Likelihood Ratio Test

محاسبه گردید. رتبه‌بندی ژنوتیپ‌های آزمایشی به‌صورت صعودی براساس شاخص پایداری MTSI و نقاط قوت و ضعف ژنوتیپ‌های منتخب به‌عنوان نسبت هر عامل در شاخص پایداری MTSI مشخص گردید. علاوه بر این، پیش‌بینی دیفرانسیل‌گزینش و بازده گزینش برای صفات مؤثر براساس شاخص پایداری MTSI با استفاده از نرم‌افزار R محاسبه شد. برای رتبه‌بندی ژنوتیپ‌ها از شاخص MGIDI استفاده گردید. این شاخص براساس جمع‌آوری اطلاعات و داده‌های صفات مورد بررسی با استفاده از بسته "metan" در نرم‌افزار R

$$SG (\%) = \frac{(\bar{X}_S - \bar{X}_0) \times h_2}{X_0} \quad \text{معادله (۶)}$$

تحلیل عاملی برای محاسبه کاهش ابعاد داده‌ها و ساختار روابط انجام شد. با انجام تجزیه واریانس AMMI با استفاده از نرم‌افزار R، مقادیر مؤلفه‌های اصلی برای هر ژنوتیپ و محیط به دست آمد و با رسم بای‌پلات‌های آن‌ها، سازگاری عمومی و خصوصی ارقام تعیین شد. برای هر یک از ارقام، BLUP به‌صورت مجموع میانگین تمامی محیط‌ها و اثر ژنوتیپی پیش‌بینی گردید.

جدول ۱- اسامی ارقام و ژنوتیپ‌های پیشرفته عدس

Table 1- Names of advanced lentil cultivars and genotypes

کد	ژنوتیپ	منشأ	کد	ژنوتیپ	منشأ
Code	Genotype	Origin	Code	Genotype	Origin
G1	X02011S97-17	IRAN	G9	ILL7685	ICARDA
G2	X02011S-163-15	IRAN	G10	BARI MASUR-6XLIRL	ICARDA
G3	ILL4605	ICARDA	G11	ILL 10750× ILL1982	ICARDA
G4	X2011S-172-34	IRAN	G12	ILL10800 × 3310	ICARDA
G5	X2011S-183-16	IRAN	G13	ILL4605×ILL6024	ICARDA
G6	X2011S-119-26	IRAN	G14	ILL6002	ICARDA
G7	X2011S-192-45	IRAN	G15	Gachsaran	IRAN
G8	ILL4605×ILL5597	ICARDA	G16	Sepehr	IRAN

جدول ۲- ویژگی‌های جغرافیایی و بارندگی سالانه محیط‌های آزمایشی

Table 2- Geographical characteristics and annual rainfall of the experimental environments

مکان	ارتفاع از سطح دریا (متر)	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	بارندگی بلند مدت (میلی‌متر)	بارندگی در سال زراعی (میلی‌متر)	بارندگی در سال زراعی (میلی‌متر)	متوسط درجه حرارت در سال زراعی (درجه سانتی‌گراد)	متوسط درجه حرارت در سال زراعی (درجه سانتی‌گراد)
Location	Height above sea level (m)	Longitude	Latitude	Long-term rainfall (mm)	Rainfall in the crop year 2020-2021 (mm)	Rainfall in the crop year 2021-2022 (mm)	Average temperature in the crop year 2020-2021 (° C)	Average temperature in the crop year 2021-2022 (° C)
لرستان	1147	48°, 18' E	33°, 29' N	445	307 (E1)	463 (E2)	22.4	21.71
گچساران	710	55°, 50' E	30°, 17' N	450	332 (E3)	491 (E4)	18.8	18.27
ایلام	975	47°, 33' E	36°, 46' N	350	261 (E5)	313 (E6)	15.65	21.61
مغان	1650	48°, 18' E	33°, 29' N	445	170 (E7)	-	12.75	-
Mughan								

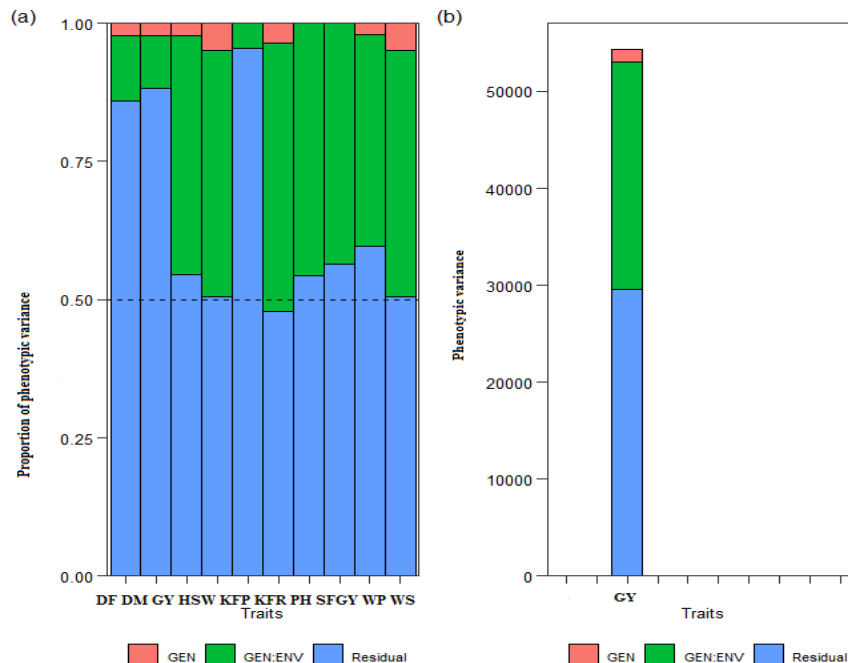
نتایج و بحث

واریانس فنوتیپی عملکرد دانه توسط برهم‌کنش ژنوتیپ × محیط توجیه شد. حال آنکه اثر ژنوتیپ، توجیه‌کننده تنها ۲/۲ درصد از واریانس برآوردشده بود. این موضوع حاکی از تأثیر پایین ژن‌ها در ایجاد تنوع میان ژنوتیپ‌ها بود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که ژنوتیپ‌ها از نظر عملکرد دانه، تحت تأثیر شرایط محیطی قرار گرفتند.

برای صفات اندازه‌گیری‌شده، واریانس‌های برآوردشده به سه جزء واریانس ژنوتیپی، برهم‌کنش ژنوتیپ در محیط و باقی‌مانده تفکیک شد (شکل ۱). براساس اطلاعات شکل ۱، ۵۴/۵۳ درصد از واریانس فنوتیپی توسط اثر باقی‌مانده توجیه گردید. همچنین ۴۳/۱۹ درصد از

نتایج تحقیقات در مورد گیاه عدس نیز نشان داده است که بخش عمده واریانس توسط اثر محیط توجیه می‌شود (Amin et al., 2024; Pezeshkpour et al., 2024 a; Sellami et al., 2021).

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 (جدول ۲).



شکل ۱- (a) نسبت مؤلفه‌های واریانس برای صفات مورد مطالعه در ژنوتیپ‌های عدس در آزمایش‌های چند محیطی (Gen: ژنوتیپ، Env: محیط) و (b) واریانس فنوتیپی برآوردشده برای عملکرد دانه

Figure 1- (a) Ratio of variance components for studied traits in lentil genotypes in multi-environment experiments (Gen: genotype, Env: environment) and (b) Estimated phenotypic variance for grain yield

GY: عملکرد دانه، HSW: وزن ۱۰۰ دانه، PH: ارتفاع بوته، DF: روز تا گل‌دهی، DM: روز تا رسیدگی، KFP: دوره پُر شدن دانه، KFR: سرعت پُر شدن دانه، WP: بهره‌وری از بارش، SYFR: سرعت تشکیل عملکرد دانه و WS: وزن تک دانه

GY: grain yield, HSW: 100 seed weight, PH: plant height, DF: days to flowering, DM: days to maturity, KFP: kernel filling period, KFR: kernel filling rate, WP: rain water productivity, SYFR: seed yield formation rate, and WS: weight of single seed

مطالعه‌شده نشان‌دهنده تفاوت ژنوتیپ‌های مختلف از نظر عملکرد دانه در یک محیط و همچنین تفاوت میانگین آن‌ها از محیطی به محیط دیگر است که نشان می‌دهد گزینش ژنوتیپ‌ها فقط برپایه عملکرد دانه در یک مکان (محیط)، از اعتبار بالایی برخوردار نیست و باید برای به دست آوردن یک نتیجه درست، ژنوتیپ‌ها در محیط‌های مختلف ارزیابی شوند تا پایداری آن‌ها برآورد شود (Finlay & Wilkinson, 1963). پژوهشگران دیگری نیز واکنش‌های متفاوت ژنوتیپ‌های عدس را در محیط‌های مختلف گزارش کرده‌اند (Hossain et al., 2023; Pezeshkpour et al., 2024 b,c;). Shobeiri et al., 2024). معنی‌دار بودن اثر محیط نشانگر این است که متوسط دما، میزان و پراکنش بارندگی و توزیع ماهانه بارندگی در دوره‌های مختلف رشدی گیاه، در محیط‌های مختلف یکسان نبوده (جدول ۲).

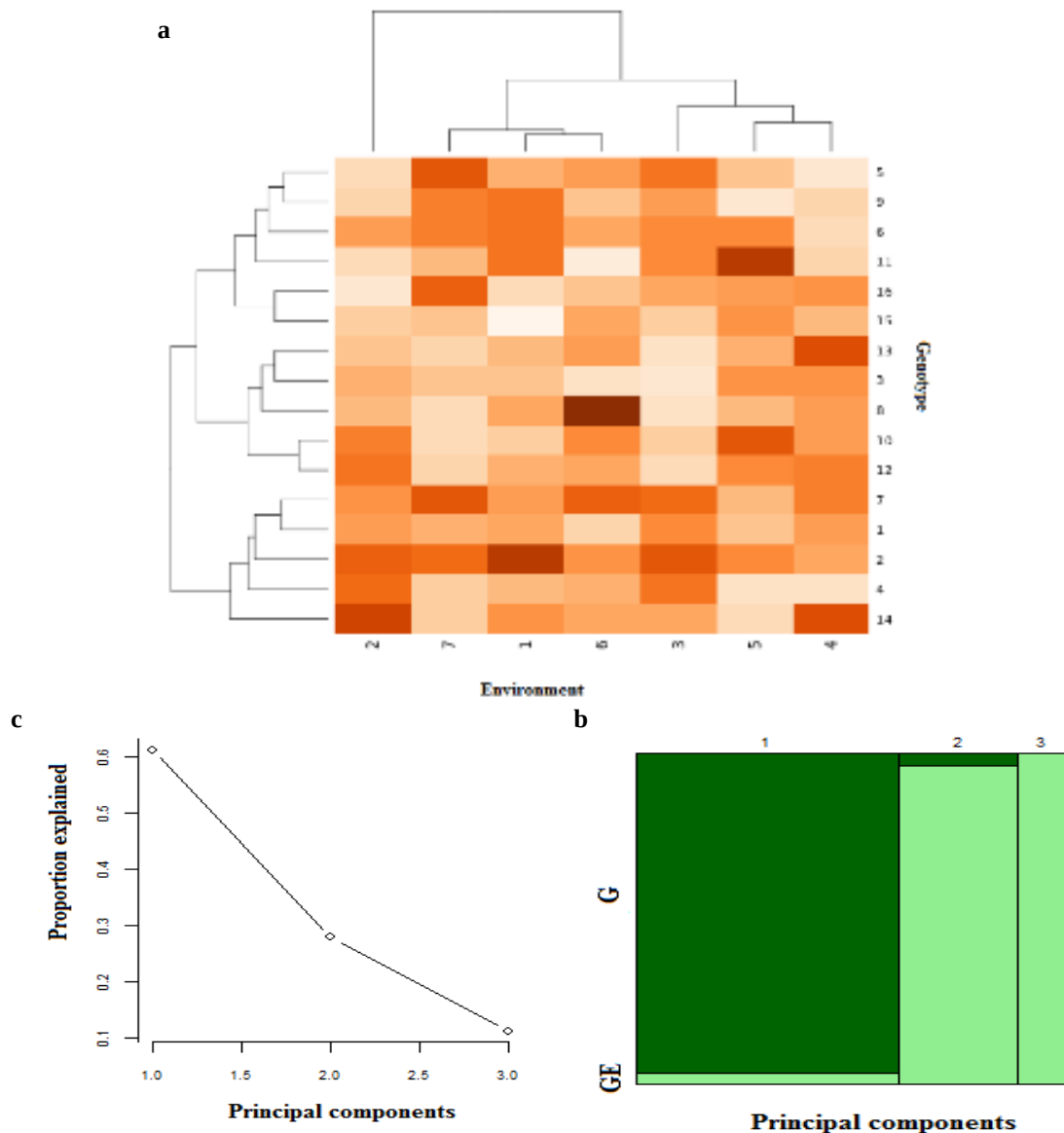
برای پی بردن به پراکنش عملکرد دانه ژنوتیپ‌ها در محیط‌های مختلف، از نمودار گرمایی استفاده شد (شکل ۲ - الف). در این نمودار، ژنوتیپ دارای عملکرد یکنواخت در تمام محیط‌ها می‌تواند پایدار باشد. بر این اساس، ژنوتیپ‌های ۲، ۷، ۱۴ و ۱۰ را می‌توان پایدار در نظر گرفت. رقم شاهد سپهر پایدار و رقم شاهد گچساران ناپایدار بود. در این نمودار، عملکرد ژنوتیپ‌ها در هر محیط بیانگر تنوع درون آن محیط است، به‌طوری‌که هرچه رنگ‌های مربوط به ژنوتیپ‌های درون یک محیط متفاوت‌تر باشند، بیانگر گوناگونی بین ژنوتیپ‌های درون آن محیط است (Karimizadeh et al., 2020). در محیط‌های ۴، ۵ و ۶ ژنوتیپ‌ها از تنوع عملکردی بیشتری برخوردار بودند. از طرف دیگر، می‌توان از تفاوت عملکرد هر ژنوتیپ در محیط‌های مختلف برای بیان تنوع در بین محیط‌ها استفاده کرد؛ به‌طوری‌که ژنوتیپ‌های ۳، ۵، ۹ و ۱۵ دارای تنوع بیشتر در محیط‌های مطالعه‌شده بودند (شکل ۲ - الف). بررسی چشمی پراکنش میانگین ژنوتیپ‌ها در محیط‌های

پیش از تجزیه پایداری، اجزای مجموع مربعات کل (TSS) شامل مجموع مربعات ژنوتیپ (G) و برهم‌کنش ژنوتیپ در محیط (GE) با بهره‌گیری از نمودار موزائیکی، از یکدیگر جدا شدند. در این نمودار که به‌وسیله لافونت و همکاران (Laffont et al., 2007) پیشنهاد شده است، مساحت مربع نمودار، ۱۰۰ درصد مجموع مربعات کل است (شکل ۲-ب). نواحی با رنگ تیره، تنوع برآمده از اثرات ژنوتیپی یا اختلاف بین میانگین ژنوتیپ‌ها را نشان می‌دهد که در این تحقیق ۲/۲ درصد تنوع کل است (جدول ۴) و نواحیه‌های با رنگ روشن، تنوع ناشی از برهم‌کنش ژنوتیپ در محیط را نشان می‌دهد که ۴۳/۱۹ درصد از تغییرات کل را در برمی‌گیرد (جدول ۴). شکل ۲-ب سهم مؤلفه‌ها از واریانس ژنوتیپ و برهم‌کنش ژنوتیپ در محیط را نشان می‌دهد. ستون‌های این نمودار بیانگر محورهای مؤلفه اصلی است، به‌گونه‌ای که ستون اول در برگرفته ۴۴/۴ درصد از کل مساحت مربع است و اولین مؤلفه اصلی از مجموع مربعات کل را تشکیل می‌دهد. ستون (مؤلفه اصلی) دوم، ۳۲/۲ درصد از مجموع مربعات کل را در برگرفته است. این دو مؤلفه اصلی، با هم ۷۶/۶ درصد از مجموع مربعات کل را تشکیل می‌دهند.

از آزمون اسکری نیز برای شناساندن بهترین شمار مؤلفه‌های توجیه‌کننده برهم‌کنش ژنوتیپ در محیط استفاده شد که نشان داد هر کدام از مؤلفه‌ها سهم قابل توجهی در توجیه برهم‌کنش ماتریس برهم‌کنش ژنوتیپ در محیط حاصل از BLUP داشتند (شکل ۲-الف و شکل ۲-ج)، به‌طوری‌که مؤلفه اصلی اول و دوم به‌ترتیب ۳۲/۸۴ و ۲۷/۱۱ درصد از تغییرات برهم‌کنش ژنوتیپ در محیط را توجیه نمودند. با توجه به اینکه در تجزیه داده‌های این آزمایش از مدل مختلط خطی استفاده شده است، آزمون نسبت درست‌نمایی برای ارزیابی معنی‌داری فاکتورهای آزمایشی نیز به کار برده شد و نشان داد که اثر ژنوتیپ بر صفت وزن ۱۰۰ دانه معنی‌دار بود (جدول ۳). همچنین اثر برهم‌کنش ژنوتیپ در محیط بر صفات عملکرد دانه، وزن ۱۰۰ دانه، ارتفاع بوته، تعداد روز تا گل‌دهی، سرعت پُر شدن دانه، بهره‌وری از بارش، سرعت تشکیل عملکرد دانه و وزن تک دانه معنی‌دار بود (جدول ۳). اثر معنی‌دار برهم‌کنش ژنوتیپ در محیط بیانگر احتمال متفاوت بودن عملکرد دانه یک ژنوتیپ از محیطی به محیط دیگر است. بنابراین، تجزیه BLUP برای تجزیه چنین داده‌هایی مناسب است (Olivoto et al., 2019 b). از این‌رو، بهترین پیش‌بینی‌های ناریب خطی (BLUPها) برآورد شد و تجزیه پایداری به‌روش AMMI بر روی این BLUPها انجام گردید. پژوهشگران دیگری نیز برهم‌کنش معنی‌دار ژنوتیپ در محیط را بر عملکرد دانه و اجزای آن در عدس با تجزیه واریانس به‌روش کمترین مربعات گزارش نموده‌اند (Dehghani et al., 2008; Biçer et al., 2018).

در جدول ۴، برخی از پارامتری‌های ژنتیکی شامل واریانس ژنوتیپ، واریانس ژنوتیپ در محیط، واریانس باقی‌مانده و واریانس فنوتیپی به‌روش درست‌نمایی محدودشده برآورد شده‌اند و نسبت آن‌ها به واریانس فنوتیپی برای این سه جزء به‌ترتیب ۲/۲۸، ۴۳/۱۹ و ۵۴/۵۳ درصد بود (جدول ۴). کمترین (۰/۰۹۳۶) و بیشترین (۵۳۳۲۵) واریانس فنوتیپی که به‌وسیله واریانس باقی‌مانده توجیه می‌گردد، به‌ترتیب مربوط به صفات متوسط سرعت پُر شدن دانه و عملکرد دانه بود (جدول ۴). همچنین کمترین (۰/۰۴۵۲) و بیشترین (۳۹/۶) واریانس برهم‌کنش ژنوتیپ $\times$ محیط به صفات سرعت پُر شدن دانه و وزن تک دانه اختصاص داشت. برآورد اجزای واریانس ژنتیکی و سایر پارامتری‌های مرتبط با آن نشان داد که در بین صفات مختلف، بیشترین سهم واریانس ژنتیکی در توجیه واریانس فنوتیپی مرتبط به صفات وزن ۱۰۰ دانه (۴/۹۱ درصد)، وزن تک دانه (۴/۹۱ درصد) و سرعت پُر شدن دانه (۳/۶۸ درصد) بود. میزان وراثت‌پذیری عمومی برای عملکرد دانه در این پژوهش ۰/۰۲۲ درصد بود (جدول ۴) که بیانگر این می‌باشد که بخشی از تغییرات عملکرد دانه ناشی از تأثیر عوامل محیطی بود. دقت گزینش در محدوده ۰/۴۵ قرار داشت. این آماره همبستگی بین مقادیر مشاهده‌شده و پیش‌بینی‌شده را نشان می‌دهد (Olivoto et al., 2019 b). دقت گزینش بالای صفات نشان‌دهنده پایداری مدل در انتخاب ژنوتیپ‌های برتر بود.

برای عملکرد دانه، ضریب تبیین برهم‌کنش ژنوتیپ در محیط (GEI) و میزان وراثت‌پذیری بر میانگین به‌ترتیب برابر ۰/۴۳۱۹ و ۰/۲۰۶۵ درصد بود (جدول ۴). دقت گزینش ژنوتیپ و همبستگی بین ارزش‌های ژنوتیپی در سراسر محیط‌ها به‌ترتیب ۰/۴۵۴ و ۰/۴۴۲ بود (جدول ۴). همچنین ضریب تغییرات ژنوتیپی، ضریب تغییرات باقی‌مانده و همچنین نسبت این دو ضریب تغییرات به‌ترتیب برابر با ۴/۴۸، ۲۱/۹ و ۰/۲۰۴ درصد بود. برای افزایش دقت پیش‌بینی، یکی از گزینه‌های پیش‌روی به‌نژادگران، بهره‌گیری از مدل‌های آماری با توانایی پیش‌بینی بهتر همچون بهترین پیش‌بینی‌های ناریب خطی است که تجزیه پایداری به‌روش AMMI می‌تواند روی این پیش‌بینی‌ها انجام شود (Olivoto et al., 2019 a). تجزیه واریانس جداگانه در هر کدام از محیط‌ها نشان داد که در پنج محیط، اثر ژنوتیپ بر عملکرد دانه معنی‌دار بود (داده‌ها ارائه نشده است). سه گزینه اصلی برای افزایش دقت پیش‌بینی در آزمایش‌های چند محیطی، بهبود تکنیک‌های آزمایشی (همچون بهره‌گیری از طرح‌هایی با اندازه و شکل ایده‌آل، پیاده کردن درست طرح‌ها در منطقه آزمایشی و کاربرد یکنواخت مدیریت زراعی)، افزایش تعداد تکرارها (با استفاده از طرح‌های مناسب همچون طرح‌های چند عاملی) و استفاده از مدل‌های آماری با توانایی پیش‌بینی بهتر هستند (Gauch & Zobel, 1988; Olivoto et al., 2019 b).



شکل ۲- برهم کنش ژنوتیپ در محیط (GEI): الف) نمودار گرمایی پراکنش عملکرد ژنوتیپ‌ها در محیط‌ها براساس تفاوت رنگ و تنوع ژنوتیپ‌ها و

محیط‌ها؛ ب) نمودار موزائیکی جهت نمایش سهم مؤلفه‌ها از واریانس G+GE و ج) ریشه مشخصه ماتریس GEI

Figure 2- Genotype-by-environment interaction (GEI): a) Heatmap of the distribution of genotype performance across environments based on the color difference and diversity of genotypes and environments; b) Mosaic plot to show the contribution of components to the G+GE variance; and c) The characteristic root of the GEI matrix

جدول ۳- ارزیابی معنی‌داری فاکتورها در مدل مختلط و برآورد اجزای واریانس با روش حداکثر درست‌نمایی محدودشده برای صفات مطالعه‌شده

Table 3- Assessing the significance of factors in the mixed model and estimating variance components using the restricted maximum likelihood method for the studied traits

آماره Statistics	آزمون نسبت درست‌نمایی Likelihood ratio test									
	عملکرد دانه Grain yield		وزن ۱۰۰ دانه 100-seed weight		ارتفاع بوته Plant height		روز تا رسیدگی Days to maturity		روز تا گل‌دهی Days to flowering	
	Gen × Env		Gen × Env		Gen × Env		Gen × Env		Gen × Env	
	Gen	Gen × Env	Gen	Gen × Env	Gen	Gen × Env	Gen	Gen × Env	Gen	Gen × Env
کای اسکوتر (χ^2)	0.363 ^{ns}	51.943 ^{**}	1.409 ^{**}	58.966 ^{**}	0.0001 ^{ns}	57.416 ^{**}	0.8259 ^{ns}	2.593 ^{ns}	0.7115 ^{ns}	3.9766 [*]

ادامه جدول ۳- ارزیابی معنی‌داری فاکتورها در مدل مختلط و برآورد اجزای واریانس با روش حداکثر درست‌نمایی محدودشده برای صفات مطالعه‌شده

Table 3- Assessing the significance of factors in the mixed model and estimating variance components using the restricted maximum likelihood method for the studied traits, Continued

آماره Statistics	آزمون نسبت درست‌نمایی Likelihood ratio test									
	دوره پُر شدن دانه Kernel filling period		سرعت پُر شدن دانه Kernel filling rate		سرعت تشکیل عملکرد دانه Seed yield formation rate		بهره‌وری از بارش Rain water productivity		وزن تک دانه Weight of single seed	
	Gen	Gen×Env	Gen	Gen×Env	Gen	Gen×Env	Gen	Gen×Env	Gen	Gen×Env
کای اسکوتر (χ^2)	0.00001 ^{ns}	0.6281 ^{ns}	0.792 ^{ns}	68.454 ^{**}	0.0001 ^{ns}	51.971 ^{**}	7.336 ^{ns}	39.93 ^{**}	1.409 ^{ns}	58.966 ^{**}

^{ns}, * و **: به ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد.
^{ns}, * and **: Non significant, significant at the $p \leq 0.01$ and $p \leq 0.05$, respectively.

ژنوتیپ‌های شماره ۳، ۴ و ۱۴، در تمام روش‌های ارزیابی براساس عملکرد و پایداری جزء ژنوتیپ‌های پایدار بودند و در شکل ۴ در رتبه‌های ۲ و ۳ و جزء ژنوتیپ‌های پایدار و دارای عملکرد بالا شناسایی شدند. توضیح اینکه داده‌های استفاده شده در این مطالعه با استفاده از برخی شاخص‌های چندمتغیره دیگر نظیر شاخص پایداری چند صفتی (MTSI) مورد ارزیابی قرار گرفت و در آنجا نیز ژنوتیپ‌های به‌عنوان ژنوتیپ‌های برگزیده شناسایی شدند (Pezeshkpour et al., 2025).

با استفاده از تجزیه عاملی اکتشافی، شناسایی تعداد فاکتور، ارتباط بین عوامل و چگونگی ارتباط متغیرها با این عوامل امکان‌پذیر است (Ullman, 2006). سرانجام، برآورد نمرات فاکتور نهایی امکان جلوگیری از چند هم‌خطی، یک مسئله سیستمیک در تجزیه‌های چندمتغیره را فراهم می‌آورد (Olivoto & Nardino, 2021). تجزیه عاملی براساس صفات اندازه‌گیری شده در ژنوتیپ‌های مورد مطالعه نشان داد که چهار مؤلفه اصلی در مدل باقی‌مانده که واریانس تجمعی این چهار مؤلفه ۹۱/۸۵ درصد بود (جدول ۵). پس از چرخش واریماکس، میانگین میزان اشتراک، ۰/۸۹ بود و به این معنی است که عوامل می‌توانند بخش بزرگی از واریانس هر متغیر را توضیح دهند. مقادیر WAASBY هر یک از ۱۰ صفت در چهار عامل یا فاکتور قرار گرفتند. صفات عملکرد دانه، ارتفاع بوته، سرعت پُر شدن دانه و وزن تک دانه در عامل اول، صفات سرعت تشکیل عملکرد دانه و دوره پُر شدن دانه در عامل دوم، صفت روز تا رسیدگی در عامل سوم، و صفات بهره‌وری از بارش و وزن ۱۰۰ دانه در عامل چهارم، به ترتیب بیشترین سهم را به خود اختصاص دادند (جدول ۵).

در شکل ۳، میانگین‌های پیش‌بینی شده عملکرد دانه با روش BLUP نشان داده شده است که بیانگر آن است که بالاترین عملکرد پیش‌بینی شده با روش BLUP برای ژنوتیپ ۲ و در پی آن ژنوتیپ‌های ۷، ۱۴، ۶، ۱۰، ۱۲، ۱ و ۴ بود که دارای عملکرد پیش‌بینی شده بیشتر از میانگین کل بودند. ژنوتیپ‌های شماره ۱۲، ۱ و ۴ عملکرد پیش‌بینی شده بسیار نزدیک به میانگین داشتند و کمترین پیش‌بینی عملکرد با فاصله زیاد از میانگین کل، مربوط به ژنوتیپ‌های ۱۵، ۳ و ۹ (گچساران) بود. دیگر رقم شاهد یعنی ژنوتیپ شماره ۱۶ (رقم سپهر) نیز پیش‌بینی عملکردی کمتر از میانگین داشت. برآورد دقیق میانگین عملکرد ژنوتیپ‌ها به‌ویژه در مدل‌های مختلط از جمله مزیت‌های عمده روش BLUP می‌باشد (Olivoto et al., 2019 b). علاوه بر این، در صورتی که اثر مختلط خطی وجود داشته باشد، BLUP امکان پیش‌بینی بهینه اثرهای تصادفی را امکان‌پذیر می‌سازد (Smith et al., 2005). ادغام دو روش BLUP و AMMI موجب افزایش کارایی هر دو روش می‌شود و یافته‌های حاصل از آزمایش‌های چند محیطی دقیق‌تر تفسیر خواهند شد (Verma & Singh, 2021). روش BLUP این ویژگی را دارد که میانگین‌ها را با دقت بالا، به‌ویژه در مدل‌های مختلط، تخمین می‌زند (Nardino et al., 2016; Olivoto et al., 2019 a,b). در این روش، ابتدا، اثرهای مدل ANOVA تخمین زده می‌شوند و سپس وزن‌هایی به این اثرها داده می‌شود. در عدس، روش‌های مبتنی بر BLUP در ارزیابی کارایی ژنوتیپ‌ها و پیش‌بینی دقیق اجزای واریانس ژنوتیپی مؤثر بوده‌اند (Bermejo et al., 2020; Hossain et al., 2023).

جدول ۴- پارامترهای برآوردشده به روش درست‌نمایی محدودشده + REML

Table 4- Parameters estimated using the REML

پارامترهای ژنتیکی Genetic parameters	عملکرد دانه Grain yield	وزن ۱۰۰ دانه 100-seed weight	ارتفاع بوته Plant height	روز تا رسیدگی Days to maturity	روز تا گل‌دهی Days to flowering
واریانس ژنوتیپی Genotypic variance	1239 (2.281)*	0.0436 (4.911)	0.405 (0.43)	1.002 (2.286)	0.2775 (2.187)
واریانس ژنوتیپ در محیط Genotype-by- environment variance	2.281 (43.19)	0.396 (44.6)	5.20 (45.54)	4.196 (9.569)	1.511 (11.91)
واریانس مقادیر باقی‌مانده Variance of residual values	29622 (54.53)	0.4483 (50.49)	6.29 (54.03)	38.65 (88.14)	10.9 (85.9)
واریانس فنوتیپی Phenotypic variance	53325	0.8879	11.83	43.84	12.69
وراثت‌پذیری عمومی Broad heritability	0.02281	0.04911	0.0001	0.02286	0.02187
ضریب تشخیص اثرهای GEI Detection coefficient of GEI effects	0.4319	0.446	0.4567	0.09569	0.1191
وراثت‌پذیری میانگین ژنوتیپی Average genotypic heritability	0.2065	0.3588	0.001	0.2912	0.2741
دقت انتخاب ژنوتیپ Genotype selection accuracy	0.4544	0.599	0.0001	0.5397	0.5236
همبستگی بین مقادیر ژنوتیپی در میان محیط‌ها Correlation between genotypic values among environments	0.4420	0.469	0.4567	0.09793	0.1218
ضریب تغییرات ژنوتیپی Genotypic coefficient of variation (CVg)	4.482	4.414	0.0001	0.6957	0.4978
ضریب تغییرات مقادیر باقی‌مانده Residual coefficient of variation (CVr)	21.92	14.15	7.606	4.32	3.12
نرخ ضریب تغییرات ژنوتیپی بر ضریب تغییرات مقادیر باقی‌مانده CVg/CVr ratio	0.2045	0.3119	0.0001	11.16	0.1596
انحراف معیار Standard deviation	479.34	1.48	10.69	0.92	18.82
خطای استاندارد Standard error	26.19	0.08	0.58	0.05	1.03

* اعداد داخل پرانتز، درصد واریانس می‌باشند.

* Numbers in parentheses are percentage variance.

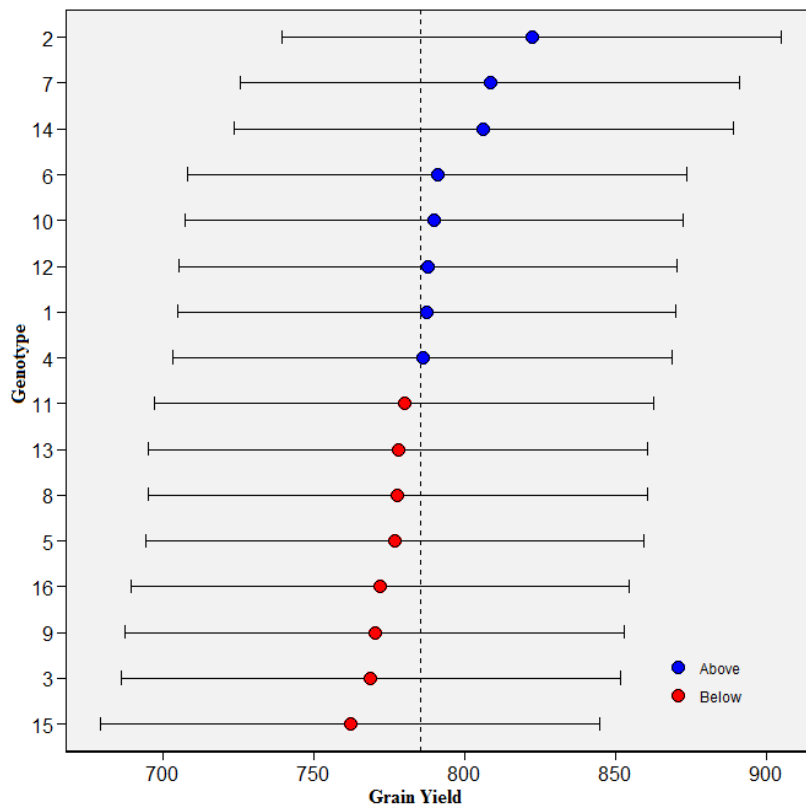
ادامه جدول ۴- پارامترهای برآورد شده به روش درست‌نمایی محدود شده + REML

Table 4- Parameters estimated using the REML, Continued

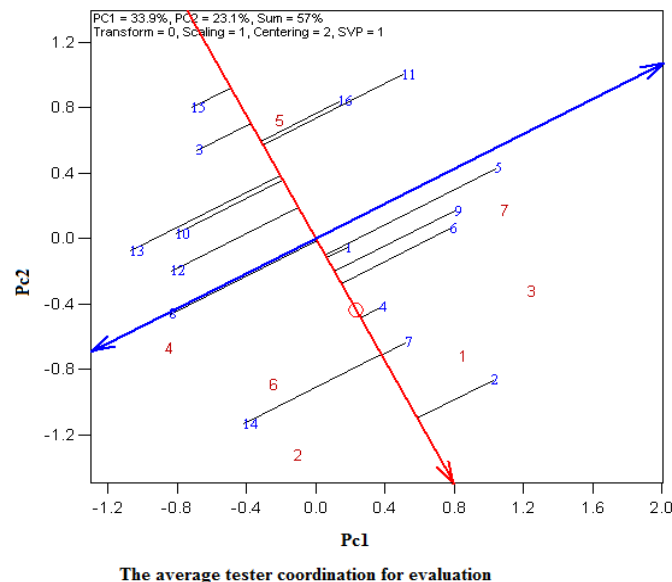
پارامترهای ژنتیکی Genetic parameters	دوره پر شدن دانه Kernel filling period	سرعت پر شدن دانه Kernel filling rate	سرعت تشکیل عملکرد دانه Seed yield formation rate	بهره‌وری از بارش Rain water productivity	وزن تک دانه Weight of single seed
واریانس ژنوتیپی Genotypic variance	0.00000001323 (0.00000002647)*	0.00345 (3.684)	0.0000000025 (0.16)	0.009595 (2.07)	40.36 (4.91)
واریانس ژنوتیپ در محیط Genotype-by-environment variance	2.263 (4.527)	0.04529 (48.37)	1.281 (43.30)	0.177 (38.17)	39.6 (44.6)
واریانس مقادیر باقی‌مانده Variance of residual values	47.72 (95.47)	0.04489 (47.94)	1.654 (56.3)	0.2771 (59.76)	44.83 (50.49)
واریانس فنوتیپی Phenotypic variance	4.999	0.09364	2.935	0.4633	88.79
وراثت‌پذیری عمومی Broad heritability	0.0000002647	0.03684	0.0000000000767	0.0207	0.0491
ضریب تشخیص اثرهای GEI Detection coefficient of GEI effects	0.0452	0.4837	0.4364	0.3817	0.4934
وراثت‌پذیری میانگین ژنوتیپی Average genotypic heritability	0.000000005098	0.2861	0.0000000008605	0.1996	0.6121
دقت انتخاب ژنوتیپ Genotype selection accuracy	0.0000715	0.5349	0.00002933	0.4468	0.7821
همبستگی بین مقادیر ژنوتیپی در میان محیط‌ها Correlation between genotypic values among environments	0.04527	0.5022	0.436	0.3898	0.7011
ضریب تغییرات ژنوتیپی Genotypic coefficient of variation (CVg)	0.0003020	4.391	0.000762	4.308	6.039
ضریب تغییرات مقادیر باقی‌مانده Residual coefficient of variation (CVr)	1.814	15.84	2.367	23.15	5.088
نرخ ضریب تغییرات ژنوتیپی بر ضریب تغییرات مقادیر باقی‌مانده CVg/CVr ratio	0.00001665	0.2772	0.00001167	0.1861	1.187
انحراف معیار Standard deviation	17.6	0.45	3.14	1.11	14.79
خطای استاندارد Standard error	0.96	0.02	3.14	0.06	0.81

* اعداد داخل پرانتز درصد واریانس می‌باشند.

* Numbers in parentheses are percentage of variance.



شکل ۳- عملکرد دانه پیش‌بینی شده ژنوتیپ‌های عدس بر پایه بهترین پیش‌بینی نااریب خطی (BLUP)
Figure 3- Predicted grain yield of lentil genotypes based on best linear unbiased prediction (BLUP)



شکل ۴- نمای قدرت تمایز و نمایندگی محیط‌ها یا مقیاس‌بندی مبتنی بر محیط. PC1 و PC2، به ترتیب مؤلفه اصلی اول و دوم هستند
Figure 4- View of the power of differentiation and representation of environments or scaling based on environment. PC1 and PC2 are the first and second principal components, respectively

شماره‌های قرمز و آبی به ترتیب نشانگر محیط‌ها و ژنوتیپ‌ها می‌باشند
Red and blue numbers indicate environments and genotypes, respectively

جدول ۵- مقادیر هر یک از صفات اندازه‌گیری شده در چهار عامل اول تحلیل عاملی

Table 5- The values of each of the measured traits in the first four factors of factor analysis

صفات Traits	عامل اول Factor 1	عامل دوم Factor 2	عامل سوم Factor 3	عامل چهارم Factor 4	میزان اشتراک Communalities
عملکرد دانه Grain yield	0.887	-0.00958	-0.346	-0.0421	0.908
روز تا رسیدگی Days to maturity	-0.168	0.0903	0.960	0.146	0.979
سرعت تشکیل عملکرد دانه Seed yield formation rate	0.076	-0.941	-0.0991	0.0784	0.907
بهره‌وری از بارش Rain water productivity	-0.198	-0.292	0.293	0.853	0.938
ارتفاع بوته Plant height	-0.592	-0.554	-0.346	0.142	0.798
دوره پر شدن دانه Kernel filling period	0.367	-0.786	0.102	0.0705	0.768
وزن ۱۰۰ دانه 100-seed weight	-0.24	-0.325	0.661	-0.554	0.907
سرعت پر شدن دانه Kernel filling rate	0.946	-0.199	-0.132	-0.0127	0.952
وزن تک دانه Weight of single seed	0.884	-0.195	-0.168	-0.0741	0.853
روز تا گل‌دهی Days to flowering	-0.168	0.0903	0.96	0.146	0.979
مقادیر ویژه Eigenvalues	660396	599796	160813	114164	
سهم از واریانس (%) % of variance	39.51	35.89	9.621	6.83	
واریانس تجمعی (%) Cumulative variance (%)	39.51	75.4	85.02	91.85	

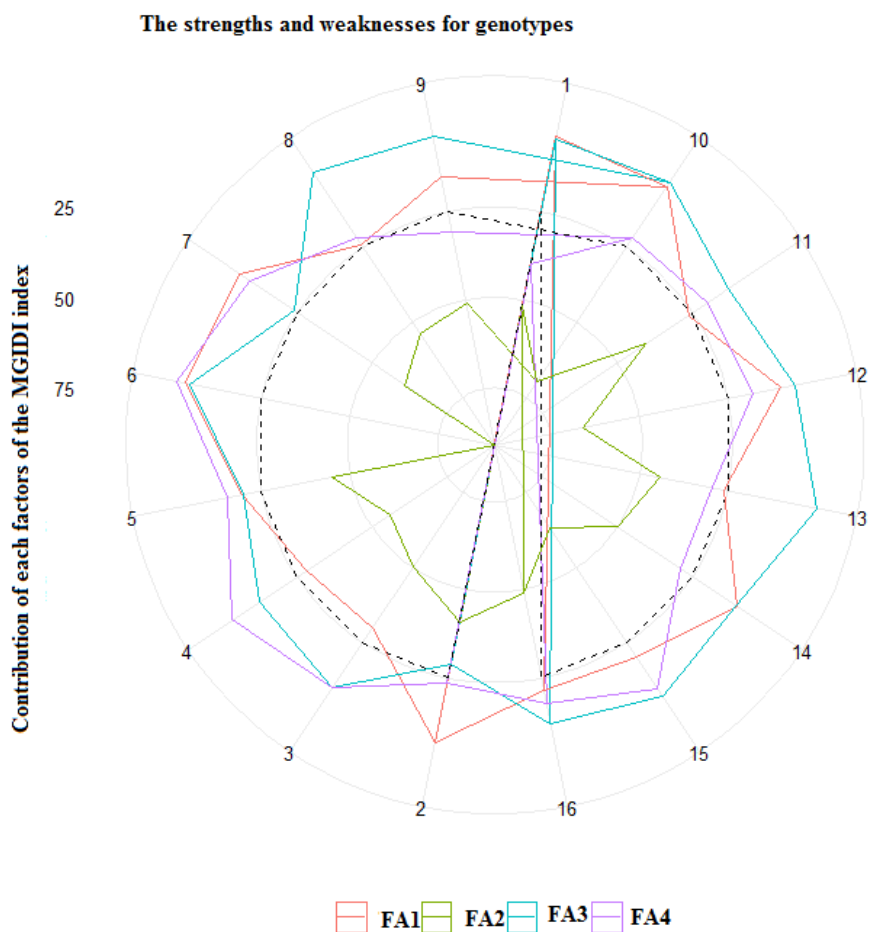
شاخص فاصله ژنوتیپ - ایدئوتیپ چند صفتی (MGIDI) یک شاخص چند صفتی دیگر و مبتنی بر تجزیه عاملی است که براساس فاصله هر کدام از ژنوتیپ‌ها از ژنوتیپ ایده‌آل، برآورد می‌شود. در شکل ۵، کاربرد این شاخص در گزینش ژنوتیپ‌های برتر عدس نشان داده شده است. ژنوتیپ شماره ۲ در عامل اول (FA_1)، ژنوتیپ شماره ۲ در عامل دوم (FA_2)، ژنوتیپ شماره ۱۳ در عامل سوم (FA_3) و ژنوتیپ شماره ۱۴ در عامل چهارم (FA_4) که به لبه شکل نزدیک‌تر می‌باشند، دارای بالاترین ظرفیت تولید و پایداری می‌باشند (شکل ۷). سهم فاکتورها در MGIDI به دو عنوان شامل عوامل کمک‌کننده کمتر و بیشتر طبقه‌بندی شدند. عواملی که سهم بیشتری دارند، در نزدیکی مرکز ترسیم قرار دارند، درحالی‌که عوامل کمک‌کننده کمتر، به سمت لبه ترسیم قرار داشتند (Olivoto & Nardino, 2021). براساس این شکل، کمترین سهم توجیه‌شده توسط یک عامل (نزدیک به لبه خارجی) نشان‌دهنده نزدیک بودن صفات درون آن عامل به حالت ایده‌آل پایدار است. خط چین نشان‌دهنده ارزش نظری است، در صورتی که همه عوامل به یک اندازه نقش داشته باشند. با توجه به

با توجه به میانگین کل صفات در جدول ۶، در بین ۱۰ صفت زراعی ارزیابی‌شده، مقادیر مشاهده‌شده ژنوتیپ‌های منتخب (X_s) برای صفات تعداد روز تا گل‌دهی، دوره پر شدن دانه، سرعت پر شدن دانه، بهره‌وری از بارش بالاتر از میانگین بود (X_0). همچنین حداقل و حداکثر دیفرانسیل انتخاب به ترتیب مربوط به صفات عملکرد دانه ($-38/1$) و دوره پر شدن دانه ($0/455$) بود که این می‌تواند روشنگری را برای اصلاح عدس به ارمغان بیاورد. دیفرانسل انتخاب آماره MGIDI برای صفات وزن تک دانه، سرعت پر شدن دانه، ارتفاع بوته، دوره پر شدن دانه، وزن ۱۰۰ دانه و تعداد روز تا رسیدگی مثبت بود. این موضوع بیانگر توانایی شاخص MGIDI در شناسایی ژنوتیپ‌های برتری است که می‌توانند به عنوان ژنوتیپ ایده‌آل برای اصلاح با صفات زراعی مطلوب استفاده شود. با توجه به شاخص WAASBY (جدول ۶)، دیفرانسیل انتخاب صفات بهره‌وری از بارش، تعدد روز تا رسیدگی، دوره پر شدن دانه، وزن ۱۰۰ دانه، روز تا گل‌دهی و وزن تک دانه مثبت مشاهده شد و اختلاف انتخاب از $11/4$ تا 24 متغیر بود که نشان می‌دهد ژنوتیپ‌های انتخاب‌شده پایدار بودند.

کمترین عامل توجیه‌کننده (دور از مرکز نمودار) طبقه‌بندی شد. کوچکترین سهم توجیه‌شده توسط هر عامل که به لبه خارجی نزدیک‌تر است، بیانگر نزدیک بودن صفات در آن عامل به ژنوتیپ ایده‌آل است. محققان بر استفاده از شاخص MGIDI برای گزینش ژنوتیپ‌های برتر تأکید دارند، زیرا این شاخص، دقیق و تفسیر آن آسان بوده و همچنین بدون ضرایب وزنی و مشکلات هم‌راستایی چندگانه است و امکان شناسایی نقاط قوت و ضعف ژنوتیپ‌ها را فراهم می‌کند (Machado e Silva, 2023).

اینکه هر ژنوتیپ برای عامل‌هایی که سهم کمتری در آن‌ها دارد از لحاظ صفات درون آن عامل به ژنوتیپ ایده‌آل نزدیک‌تر است، ژنوتیپ ایده‌آل با توجه به صفات قرار گرفته در هر عامل و اهدافی که برای بهبود آن صفت مد نظر است، تعریف می‌شود. ژنوتیپ شماره ۲ با استفاده از شاخص میانگین هارمونیک و عملکرد نسبی ارزش ژنوتیپی ($HMRPGV^1$) ژنوتیپی پایدار و با عملکرد بالا شناسایی شده بود (Pezeshkpour et al., 2025).

برای هر ژنوتیپ گزینش‌شده، سهم هر عامل در شاخص MGIDI از بیشترین عامل توجیه‌کننده (نزدیک به مرکز نمودار) تا



شکل ۵- رتبه‌بندی ژنوتیپ‌ها و ژنوتیپ‌های انتخاب‌شده برپایه شاخص فاصله ژنوتیپ - ایدئوتیپ چند صفتی (MGIDI)

Figure 5- Ranking of genotypes and selected genotypes based on the Multi Trait Genotype Ideotype Distance Index (MGIDI)

۱۰۰ دانه (۳۶/۸ گرم) و ارتفاع بوته (۴۷ سانتی‌متر) جزو ارقام برتر بود و نسبت به شاهد‌های گچساران و سپهر به‌ترتیب ۱۸ و ۱۰ درصد برتری نشان داد. لذا با توجه به وجود پیوند منفی بین عملکرد دانه با دانه درشتی در گیاه عدس در صورتی که فقط افزایش عملکرد ملاک باشد، ژنوتیپ شماره ۱۲ (FLIP07-125C) مناسب می‌باشد، اما اگر وزن ۱۰۰ دانه و ارتفاع بوته برای بازارپسندی و برداشت مکانیزه عدس مورد توجه باشد، انتخاب ژنوتیپ شماره ۱۰ می‌تواند مناسب باشد. ژنوتیپ شماره ۲ با عملکرد دانه (۹۶۹ کیلوگرم در هکتار)، ارتفاع بوته (۴۶/۶ سانتی‌متر)، سرعت تشکیل عملکرد دانه (۶/۶۳ کیلوگرم در هکتار در روز) و بهره‌وری از بارش (۲/۸۲ کیلوگرم بر میلی‌متر) بیشتر از میانگین کل صفات در ژنوتیپ‌ها و شاهد‌ها در این پژوهش، برتر بود.

سپاسگزاری

این مقاله مستخرج از پروژه تحقیقاتی با عنوان بررسی سازگاری و پایداری عملکرد دانه ژنوتیپ‌های عدس به‌صورت کشت پاییزه در مناطق نیمه‌گرمسیر دیم با شماره مصوب ۰۰۱۰۵۵-۰۱۸-۰۱۵-۵۹-۰۰ می‌باشد که بدین وسیله از سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی تشکر و قدردانی می‌گردد.

میانگین برخی از خصوصیات زراعی ژنوتیپ‌های مورد بررسی در **جدول ۷** نشان داده شده است. از نظر روز گل‌دهی، ارقام و ژنوتیپ‌ها در محدوده ۱۰۷-۱۰۴ روز قرار داشتند، که کمترین آن مربوط به ژنوتیپ ۱۵ (شاهد گچساران) و بیشترین آن مربوط به ژنوتیپ‌های شماره ۱، ۲، ۸ و ۱۳ بود. از نظر روز تا رسیدگی نیز تفاوت هشت روز در محدوده ۱۴۵-۱۳۷ بین ارقام و ژنوتیپ‌ها مشاهده گردید (**جدول ۷**). ژنوتیپ ۱۵ (شاهد گچساران) با کمترین زمان رسیدن (۱۳۷ روز)، زودرس‌ترین ژنوتیپ شناخته شد. تغییرات ارتفاع بوته ارقام و ژنوتیپ‌ها نیز در محدوده بین ۳۱ تا ۳۵ سانتی‌متر بود. کمترین ارتفاع بوته (۳۱/۱ سانتی‌متر) مربوط به ژنوتیپ G15 و بیشترین ارتفاع بوته (۳۵/۱ سانتی‌متر) مربوط به ژنوتیپ ۱۱ بود. وزن ۱۰۰ دانه ارقام و ژنوتیپ‌ها با میانگین ۴/۷۳ گرم بین ۳/۷۸ تا ۵/۱۷ گرم متغیر بود. بیشترین وزن ۱۰۰ دانه مربوط به ژنوتیپ‌های ۳ (۵/۱۷ گرم) و ۱۰ (۵/۱۲ گرم) بود. ژنوتیپ ۲ دارای بیشترین بهره‌وری از بارش (۲/۸۲ کیلوگرم بر میلی‌متر) بود و کمترین بهره‌وری از بارش (۱/۹۵ کیلوگرم بر میلی‌متر) مربوط به ژنوتیپ ۱۵ بود. بیشترین سرعت تشکیل عملکرد دانه (۶/۶۳ کیلوگرم در هکتار در روز) مربوط به ژنوتیپ ۱۰ بود.

در **شکل ۶** نتایج حاصل از ضرایب همبستگی ساده میان صفات ارائه شده است. بیشترین میزان همبستگی مثبت و معنی‌دار با عملکرد دانه را صفات سرعت تشکیل عملکرد دانه (**۰/۹۷)، تعداد روز تا گل‌دهی (**۰/۴۷) و ارتفاع بوته (**۰/۷۱) نشان داده است. احتمالاً ژنوتیپ‌های با ارتفاع بوته بیشتر، حاوی تعداد غلاف بیشتر بوده است. اما همبستگی تعداد روز تا گل‌دهی با عملکرد دانه مثبت و معنی‌دار بود که احتمالاً این طول دوره رشد تأثیری بر عملکرد و اجزای آن داشته و باعث افزایش عملکرد شده است. در رابطه با صفت ارتفاع بوته، دیکسیت و دویی (Dixit & Dubey, 1985) به چنین نتیجه‌ای اشاره داشتند. همبستگی وزن ۱۰۰ دانه و صفات فنولوژیک مدت زمان کشت تا گل‌دهی با عملکرد، منفی و معنی‌دار گردید. در نتیجه ژنوتیپ‌های عدسی که دیررس‌تر بودند، در گریز از شرایط تنش و محدودیت رطوبت خوب عمل نمودند و بر عملکرد آن‌ها تأثیرگذار بوده و کاهش نشان دادند.

نتیجه‌گیری

به‌طور کلی، نتایج نشان داد که برهم‌کنش ژنوتیپ در محیط بر عملکرد دانه، وزن ۱۰۰ دانه، ارتفاع بوته، روز تا گل‌دهی، روز تا رسیدگی، دوره پُر شدن دانه، سرعت پُر شدن دانه، سرعت تشکیل عملکرد دانه، بهره‌وری از بارش و وزن تک دانه معنی‌دار بود. براساس نمودار گرمایی، ژنوتیپ‌های ۲ و ۱۲ را می‌توان پایدار در نظر گرفت. ژنوتیپ شماره ۲ (X02011S-163-15) عملکرد دانه (۹۶۴ کیلوگرم در هکتار) بیشتر از میانگین کل ژنوتیپ‌ها را به خود اختصاص داد و از لحاظ وزن

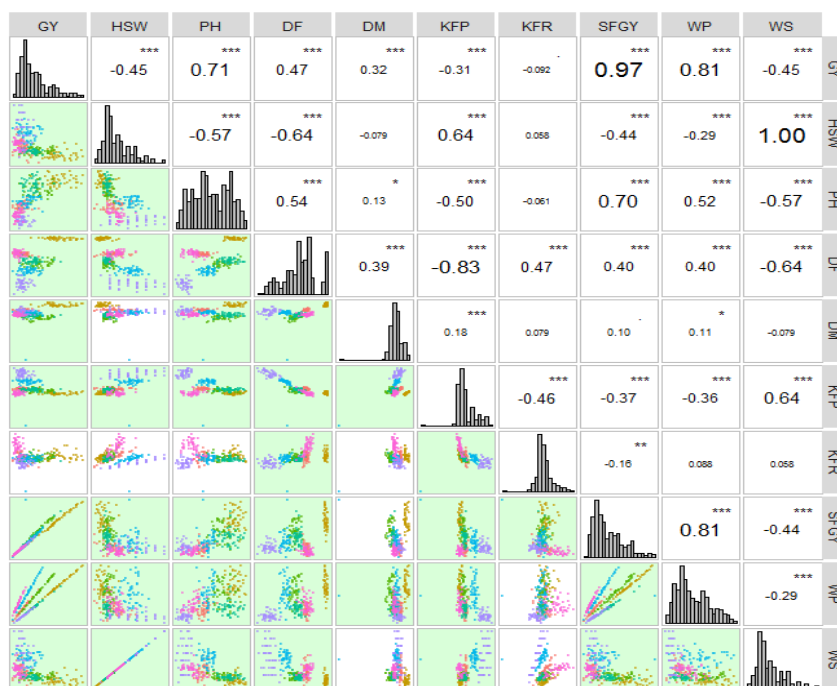
جدول ۶- دینفرانسیل انتخاب شاخص WAASBY برای صفات مورد مطالعه در ژنوتیپ‌های عدس
Table 6- Differential selection of WAASBY index for studied traits in lentil genotypes

هدف Aim	وراثت‌پذیری Hereditiy	انتخاب براساس شاخص WAASB				انتخاب براساس میانگین کل صفات				میانگین عامل Factor	صفات Traits
		Selection based on WAASB index				Selection based on the average of all traits					
		درصد دیفرانسیل انتخاب Selection differential percentage (SD%)	دیفرانسیل انتخاب Selection differential (SD)	میانگین ژنوتیپ‌های انتخابی Average of selected genotypes (Xs)	میانگین کل Total average (X0)	درصد دیفرانسیل انتخاب Selection differential percentage (SD%)	دیفرانسیل انتخاب Selection differential (SD)	میانگین ژنوتیپ‌های انتخابی Average of selected genotypes (Xs)	میانگین کل Total average (X0)		
افزایش Increase	0.206	-26.6	-11.4	31.3	42.7	-4.85	-38.1	747	785	1	عملکرد دانه Grain yield
کاهش Decrease	2.91	11.4	6.03	59.2	53.1	-0.0207	-0.0298	144	144	1	روز تا رسیدگی Days to maturity
افزایش Increase	0.0000000086	-24.3	-8.87	27.6	36.5	-5.79	-0.0314	5.12	5.43	1	سرعت تشکیل عملکرد دانه Seed yield formation rate
افزایش Increase	0.2	-24.3	-9.55	29.8	39.3	-6.23	-0.144	2.13	2.27	1	بهره‌وری از بارش Rain water productivity
افزایش Increase	0	36.0	20.9	78.7	87/۹	1.28	0.426	۳۳/۸	33.3	2	ارتفاع بوته Plant height
افزایش Increase	0.0000000051	11.2	8.4	83.4	75.0	1.2	0.455	38.5	38.1	2	دوره پر شدن دانه Kernel filling period
افزایش Increase	0.359	6.05	4.01	70.3	66.3	0.871	0.0412	4.77	4.73	3	وزن ۱۰۰ دانه 100-seed weight
افزایش Increase	0.286	-4.81	-2.44	48.2	50.6	1.88	0.0125	1.36	1.34	3	سرعت پر شدن دانه Kernel filling rate
افزایش Increase	0.359	6.05	4.01	70.3	66.3	0.871	0.422	47.7	47.3	3	وزن تک دانه Weight of single seed
کاهش Decrease	0.274	47	24	75.0	51.0	-0.458	-0.485	105	106	4	روز تا گل‌دهی Days to flowering

جدول ۷- میانگین خصوصیات زراعی ژنوتیپ‌های مورد بررسی در محیط‌های مورد آزمایش

Table 6- Differential selection of WAASBY index for studied traits in lentil genotypes

ژنوتیپ Genotype	عملکرد دانه Grain yield (kg.ha ⁻¹)	روز تا رسیدی Days to maturity	سرعت تشکیل عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار در روز) Seed yield formation rate (kg.ha ⁻¹ .day ⁻¹)	سرعت تشکیل عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار در روز) Seed yield formation rate (kg.ha ⁻¹ .day ⁻¹)	بهره‌وری از بارش (کیلوگرم بر میلی‌متر) Rain water productivity (kg.mm ⁻¹)	ارتفاع بوته (سانتی‌متر) Plant height (cm)	دوره پر شدن دانه (روز) Kernel filling period (day)	وزن ۱۰۰ دانه (گرم) 100-seed weight (g)	سرعت پر شدن دانه (میلی‌گرم دانه در روز) Kernel filling rate (mg.seed ⁻¹ .day ⁻¹)	وزن تک دانه (میلی‌گرم) Weight of single seed (mg)	روز تا گل‌دهی Days to flowering	عملکرد نسبت به شاهد گچساران کل (درصد) Yield compared to the Gachsaran control (%)	عملکرد نسبت به شاهد سپهر کل (درصد) Yield compared to the Sapehr control (%)	عملکرد نسبت به میانگین کل (درصد) Yield compared to the total average (%)
G1	796	145	5.41	5.41	2.29	33.0	38	4.67	1.35	46.7	107	118	110	101
G2	964	144	6.63	6.63	2.82	32.8	37	3.77	1.16	37.8	107	143	134	123
G3	705	144	4.84	4.84	2.04	33.8	39	5.17	1.51	51.7	105	105	98	90
G4	789	144	5.39	5.39	2.22	33.8	39	4.37	1.22	43.7	105	117	109	100
G5	744	144	5.16	5.16	2.26	34.0	39	4.83	1.27	48.4	105	111	103	95
G6	813	145	5.59	5.59	2.43	32.7	40	4.62	1.21	46.2	105	121	113	104
G7	898	144	6.18	6.18	2.60	33.1	39	4.31	1.19	43.1	105	133	125	114
G8	749	144	5.12	5.12	2.08	33.8	37	4.80	1.41	48.0	107	111	104	95
G9	713	145	4.89	4.89	2.11	32.3	39	4.79	1.31	47.9	106	106	99	91
G10	807	144	5.50	5.50	2.30	34.6	38	5.12	1.50	51.2	106	120	112	103
G11	760	143	5.31	5.31	2.34	35.1	38	5.06	1.46	50.6	105	113	105	97
G12	798	145	5.38	5.38	2.25	33.4	39	4.88	1.33	48.8	106	119	111	102
G13	750	144	5.18	5.18	2.09	32.6	37	4.88	1.42	48.8	107	111	104	95
G14	887	145	6.05	6.05	2.41	34.2	39	4.62	1.33	46.2	106	132	123	113
G15	673	137	5.26	5.26	1.95	31.1	33	4.86	1.31	48.6	104	100	93	86
G16	721	144	5.03	5.03	2.18	33.2	38	4.93	1.42	49.3	106	107	100	92



شکل ۶- تخمین‌های همبستگی خطی پیرسون برای صفات ارزیابی‌شده در ۱۶ ژنوتیپ عدس در هفت محیط مختلف

Figure 6- Pearson's linear correlation estimates for characters evaluated in 16 lentil genotypes in seven different environments

GY: عملکرد دانه، HSW: وزن ۱۰۰ دانه، PH: ارتفاع بوته، DF: روز تا گل‌دهی، DM: روز تا رسیدگی، KFP: دوره پُر شدن دانه، KFR: سرعت پُر شدن دانه، WP: بهره‌وری از بارش، SYFR: سرعت تشکیل عملکرد دانه و WS: وزن تک دانه

GY: grain yield, HSW: 100 seed weight, PH: plant height, DF: days to flowering, DM: days to maturity, KFP: kernel filling period, KFR: kernel filling rate, WP: rain water productivity, SYFR: seed yield formation rate, and WS: weight of single seed

References

- Al-Ashkar, I., Sallam, M., Almutairi, K. F., Shady, M., Ibrahim, A., & Alghamdi, S. S. (2023). Detection of high-performance wheat genotypes and genetic stability to determine complex interplay between genotypes and environments. *Agronomy*, 13(2), 585. <https://doi.org/10.3390/agronomy13020585>
- Amin, M. N., Islam, M. M., Coyne, C. J., Carpenter-Boggs, L., & McGee, R. J. (2024). Spectral indices for characterizing lentil accessions in the dryland of Pacific Northwest. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 71(1), 167-179. <https://doi.org/10.1007/s10722-023-01614-8>
- Bermejo, C., Cazzola, F., Maglia, F., & Cointy, E. (2020). Selection of parents and estimation of genetic parameters using BLUP and molecular methods for lentil (*Lens culinaris* Medik.) breeding program in Argentina. *Experimental Agriculture*, 56(1), 12-25. <https://doi.org/10.1017/S0014479719000061>
- Biçer, B. T., Kızılgeçi, F., Albayrak, Ö., Akinci C., & Yıldırım, M. (2018). Stability parameters in lentil genotypes. *El-Cezerî Journal of Science and Engineering*, 5(2), 287-291. <https://doi.org/10.31202/ecjse.403995>
- Chaves, M. M., Maroco, J. P., & Pereira, J. S. (2003). Understanding plant responses to drought—from genes to the whole plant. *Functional Plant Biology*, 30(3), 239-264. <https://doi.org/10.1071/FP02076>
- Dastfall, M., Najafi Mirak, T., & Zali, H. (2024). Selection of durum wheat (*Triticum turgidum* L. var. *durum*) genotypes tolerant to terminal season drought stress using multi-trait indices (MGIDI). *Iranian Journal of Crop Sciences*, 25(4), 342-361. (In Persian).
- Dehghani, H., Sabaghpour, S. H., & Sabaghnia, N. (2008). Genotype × environment interaction for grain yield of some lentil genotypes and relationship among univariate stability statistics. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 6(3), 385-394. <https://doi.org/10.5424/sjar/2008063-5292>

- De Souza, P. I., Egli, D. B., & Bruening, W. P. (1997). Water stress during seed filling and leaf senescence in soybean. *Agronomy Journal*, 89(5), 807-812. <https://doi.org/10.2134/agronj1997.00021962008900050015x>
- Dixit, P., & Dubey, D. K. (1985). Path analysis in lentil. *Lens Newsletter*, 11, 15-17.
- Finlay, K., & Wilkinson, G. (1963). The analysis of adaptation in a plant-breeding programme. *Australian Journal of Agricultural Research*, 14(6), 742-754. <http://dx.doi.org/10.1071/AR9630742>
- Forouzi, M., Ehteshami, S. M., Esfahani, M., & Rabiei, M. (2016). Study the amount of dry matter remobilization and current photosynthesis in different seed sizes of four wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars in Rasht. *Iranian Journal of Seed Science and Research*, 3(1), 47-61. (In Persian). <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.24763780.1395.3.1.4.8>
- Gauch, H., & Zobel, R. (1988). Predictive and postdictive success of statistical analyses of yield trials. *Theoretical and Applied Genetics*, 76(1), 1-10. <https://doi.org/10.1007/BF00288824>
- Henderson, C. R. (1975). Best linear unbiased estimation and prediction under a selection model. *Biometrics*, 31(2), 423-447. <https://doi.org/10.2307/2529430>
- 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>
- Hossain, M. A., Sarker, U., Azam, M. G., Kobir, M. S., Roychowdhury, R., Ercisli, S., Ali, D., Oba, S., & Golokhvast, K. S. (2023). Integrating BLUP, AMMI, and GGE models to explore GE interactions for adaptability and stability of winter lentils (*Lens culinaris Medik.*). *Plants*, 12(11), 2079. <https://doi.org/10.3390/plants12112079>
- IBPGR, ICRISAT and ICARDA, (1993). Descriptors for Lentil International Board for Plant Genetic Resources, Rome, Italy; International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics, Patancheru, India and International Center for Agriculture Research in the Dry Areas, Aleppo, Syria.
- 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>
- Joudi, M., & Ebadi, A. (2015). Evaluation of agronomic traits of Iranian wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars and their associations under terminal heat stress. *Research in Field Crop Journal*, 3(1), 42-54. (In Persian)
- Karimizadeh, R., Pezeshkpour, P., Barzali, M., Mehraban, A., & Sharifi, P. (2020). Evaluation the mean performance and stability of lentil genotypes by combining features of AMMI and BLUP techniques. *Journal of Crop Breeding*, 12(36), 160-170. (In Persian). <http://dx.doi.org/10.52547/jcb.12.36.160>
- Kumar, J., Kant, R., Kumar, S., Basu, P. S., Sarker, A., & Singh, N. P. (2016). Heat tolerance in lentil under field conditions. *Legume Genomics and Genetics*, 7(1), 1-11.
- Laffont, J. L., Hanafi, M., & Wright, K. (2007). Numerical and graphical measures to facilitate the interpretation of GGE biplots. *Crop Science*, 47(3), 990-996. <https://doi.org/10.2135/cropsci2006.08.0549>
- Machado e Silva, C., Mezzomo, H. C., Ribeiro, J. P. O., Freitas, D. S., & Nardino, M. (2023). Multi-trait selection of wheat lines under drought-stress condition. *Bragantia, Campinas*, 82, e20220254.
- Mohammadi, G. H., Golezani, K. G., Javanshir, A., & Moghaddam, M. (2006). The influence of water limitation on the yield of three lentil cultivars. *JWSS-Isfahan University of Technology*, 10(2), 109-120. (In Persian)
- Nardino, M., Baretta, D., Carvalho, I. R., Olivoto, T., Follmann, D. N., Szareski, V. J., Ferrari, M., de Pelegrin, A. J., Konflanz, V. A., & de Souza, V. Q. (2016). Restricted maximum likelihood/best linear unbiased prediction (REML/BLUP) for analyzing the agronomic performance of corn. *African Journal of Agricultural Research*, 11(48), 4864-4872. <https://doi.org/10.5897/AJAR2016.11691>
- Olivoto, T., Lúcio, A. D. C., da Silva, J. A. G., 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. C., da Silva, J. A. G., 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., & Lúcio, A. D. (2020). Metan: An R package for multi-environment trial analysis. *Methods in Ecology and Evolution*, 11(6), 783-789. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13384>
- Olivoto, T., & Nardino, M. (2020). MGIDI: A novel multi-trait index for genotype selection in plant breeding. *BioRxiv (Preprint)*, 2020:07. <https://doi.org/10.1101/2020.07.23.217778>
- 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>

- Oweis, T. Y., & Hachum, A. Y. (2003). Improving water productivity in the dry areas of West Asia and North Africa. In *Water Productivity in Agriculture: Limits and Opportunities for Improvement*. pp. 179-198. Wallingford UK: CABI Publishing.
- Parry, M. A., Andralojc, P. J., Khan, S., Lea, P. J., & Keys, A. J. (2002). Rubisco activity: Effects of drought stress. *Annals of Botany*, 89(7), 833-839. <https://doi.org/10.1093/aob/mcf103>
- Pezeshkpour, P., Sharifi, P., Amiri, R., Namdari, A., Mirzaei, A., & Mehraban, A. (2025). Selection of stable lentil genotypes for rainfed conditions using multivariate methods. *Legume Science*, 7, e70047. <https://doi.org/10.1002/leg3.70047>
- Pezeshkpour, P., Armion, M., & Rostami, B. (2024 a). Evaluation of the efficiency of WAASB, WAASBY indices and linear mixed effects model (LMM) for identifying high-yielding lentil genotypes adapted to rainfed regions. *Crop Science Research in Arid Regions*, 6(2), 431-452. (In Persian)
- Pezeshkpour, P., Amiri, R., Karami, I., & Mirzaei, A. (2024 b). 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. (In Persian). <http://dx.doi.org/10.61186/jcb.16.2.42>
- Pezeshkpour, P., Amiri, R., Karami, I., & Mirzaei, A. (2024 c). Genetic parameters, stability and selection of lentil genotypes under rainfed conditions for autumn planting using BLUP, WAASB and AMMI methods. *Plant Production and Genetics*, 5(2), 183-200. (In Persian).
- Rahmati, M., Abdipour, M., & Sepahvand, M. (2024). Selection of durum wheat genotypes based on MGIDI and SIIG selection indexes. *Plant Production and Genetics*, 5(2), 299-312. (In Persian).
- Resende, M. D. V. D. (2016). Software Selegen-REML/BLUP: A useful tool for plant breeding. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, 16(04), 330-339.
- Sehgal, A., Sita, K., Kumar, J., Kumar, S., Singh, S., Siddique, K. H., & Nayyar, H. (2017). Effects of drought, heat and their interaction on the growth, yield and photosynthetic function of lentil (*Lens culinaris* Medikus) genotypes varying in heat and drought sensitivity. *Frontiers in Plant Science*, 8, 1776. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01776>
- 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., Aminpanah, H., Erfani, R., Mohaddesi, A., & Abbasian, A. (2017). Evaluation of genotype× environment interaction in rice based on AMMI model in Iran. *Rice Science*, 24(3), 173-180. <https://doi.org/10.1016/j.rsci.2017.02.001>
- Shirzad, A., Asghari, A., Zali, H., Sofalian, O., & Mohammaddoust Chamanabad, H. (2022). Application of the multi-trait genotype-ideotype distance index in the selection of top barley genotypes in the warm and dry region of Darab. *Journal of Crop Breeding*, 14(44), 65-76. (In Persian). <https://doi.org/10.52547/jcb.14.44.65>
- Shobeiri, S. S., Khorsandi, H., & Kamel, M. (2019). Effects of seed rates and row spaces on grain yield and yield components of two lentil cultivars under cold dryland conditions. *Iranian Dryland Agronomy Journal*, 7(2), 125-141. (In Persian).
- Shobeiri, S. S., Pezeshkpour, P., & Naseri, B. (2024). Evaluation of efficiency of weighted average of stability and mean performance estimated by linear mixed models for identifying high-yielding lentil genotypes adapted to rainfed regions. *Legume Science*, 6(2), e226. <https://doi.org/10.1002/leg3.226>
- Smith, H. F. (1936). A discriminant function for plant selection. *Annals of Eugenics*, 7(3), 240-250. <https://doi.org/10.1111/j.1469-1809.1936.tb02143.x>
- Smith, A. B., Cullis, B. R., & Thompson, R. (2005). The analysis of crop cultivar breeding and evaluation trials: An overview of current mixed model approaches. *The Journal of Agricultural Science*, 143(6), 449-462. <https://doi.org/10.1017/S0021859605005587>
- Ullman, J. B. (2006). Structural equation modeling: Reviewing the basics and moving forward. *Journal of Personality Assessment*, 87, 35-50. https://doi.org/10.1207/s15327752jpa8701_03
- Verma, A., & Singh, G. P. (2021). Stability, adaptability analysis of wheat genotypes by AMMI with BLUP for restricted irrigated multi location trials in Peninsular zone of India. *Agriculture Science*, 12(3), 118-124. <https://doi.org/10.4236/as.2021.123013>
- Wright, K., & Laffont, J. L. (2018). Genotype plus genotype-by-environment biplots. R package. <https://Kwstat.Github.io/gge/index.html>.