

Research Paper

Evaluation of the Adaptability and Stability of Autumn Lentil Genotypes Using AMMI Model Indices

Amir Mirzaei¹, Payam Pezeshkpour², Reza Amiri² and Iraj Karami³

1- Assistant Professor, Crop and Horticultural Science Research Department, Ilam Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Ilam, Iran, (Corresponding author: amir.mirzaei53@gmail.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, Sararood Branch, Agricultural Research, Education and Extension (AREEO), Kermanshah, Iran

Received: 15 June, 2025

Revised: 05 October, 2025

Accepted: 12 November, 2025

Extended Abstract

Background: Lentil (*Lens culinaris* Medikus) is an important staple food crop. It is a rich source of protein (20–36%) and contains essential micronutrients and vitamins in a highly bioavailable form to human body. In addition to its nutritional value, lentils generally have a fast cooking time compared to other legumes due to their smaller seed size and thin seed coat. Lentil is grown on 5675756 ha with a production over 7068621 tonnes worldwide. Lentil is a highly adaptable plant that grows under varying climate and soil conditions. It is commonly cultivated in the Mediterranean and subtropical dryland regions, where synthetic fertilizers are typically not needed for cultivation due to their ability to fix atmospheric nitrogen (N₂) by the lentil crop. However, global lentil productivity has been reported to decline over the last decades due to fluctuations in the climate, such as extreme temperatures, flooding, droughts, and a rise in the prevalence of pests and diseases. Multiple stresses, such as high temperatures and drought during the seed filling stage, adversely affect lentil productivity. On the other hand, increased heat intensity and water deficits have a substantial impact on lentil nutritional quality. Several studies have reported that iron and zinc concentrations in lentil seed were reduced due to high temperature and drought conditions. Protein content in the seeds was also affected. To attain global food security under changing climate, lentil breeders face a significant challenge of simultaneously enhancing both yield and nutritional quality. Genotype × environment interactions (GEIs) play an important role in the selection of suitable germplasm in breeding programs. In multi-environment experiments, lentil yield is influenced by the genetic structure, environment, and genotype × environment interaction. To better interpret the genotype × environment interaction, the additive main effects and the multiplicative interaction (AMMI) model is one of the most common methods in the study of multi-environment experiments. The current study aimed to investigate the genotype and environment interaction on lentil genotypes and to identify stable, high-yielding genotypes compatible with the climatic conditions of temperate rainfed regions of Iran.

Methods: In this study, 10 promising lentil genotypes, along with “local”, “Kimia”, and “Bilesavar” cultivars, were cultivated in a randomized complete block design for three consecutive cropping years (2019-2022) in Lorestan/Khorramabad, Ilam/chardavel, and Kermanshah/sararood. In the field, each plot consisted of 4-meter planting rows with a distance of 25 cm and a density of 200 seeds per square meter. Stability analysis was performed using the AMMI multivariate method and the superiority index. Statistical analyses were performed using Metan and GGE packages of multi-environment experiments in R software.

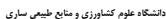
Results: The AMMI analysis of variance showed that the effects of environment, genotype, the genotype × environment, and the first three main components were significant. Therefore, due to the significance of the genotype × environment interaction, it was possible to perform stability analysis on these data. According to AMMI analysis, the first and second main components of the genotype-environment interaction accounted for 33.3 and 27.3% of genotype × environment interaction variations, respectively. The effect of the first seven main components was significant and in total explained 99.5% of the genotype × environment interaction variations. The shares of the environment, genotype, and genotype × environment interaction in the sum of total squares were 64.04, 4.286, and 31.67 percent, respectively. Among the studied genotypes, Genotype G12 with 715 kg/ha, followed by genotypes G6 and G4 produced the highest grain yield. Based on the ASV stability index, genotypes G2, G3 and G5, based on the SIPC index, genotypes G13, G2,

G3, and G5, based on the EV index, genotypes G2, G3, and G5, based on the Za index, genotypes G3, G6, G5, and G2, and based on the WAAS index, genotypes G6, G5, G7, and G9 were the most stable genotypes. Based on the simultaneous selection index of SSIASV, genotypes G3, G6, G5, and G2, based on the SSISIPC index, genotypes G3, G6, G5, and G2, based on the SSIEV index, genotypes G3, G6, G5, and G2, based on the SSIZA index, genotypes G3, G6, G5, and G2, and based on the SSIWAAS index, genotypes G6, G5, G7, and G9 were the best genotypes in terms of yield and stability. Based on the AMMI1 biplot, genotypes G2, G7, G3, and G6 with mean grain yield higher than the overall average and lowest values of IPCA1 were identified as stable genotypes with high general compatibility. In the AMMI2 biplot, genotypes G3, G5, and G7, in addition to high general stability, produced higher grain yield than the overall average. In addition to the AMMI indices, Lin and Binn's superiority index was also used to identify the best genotypes, and based on this, genotypes G12, G4, G6, and G3 were the most stable genotypes in the studied environments. Using AMMI distance parameter, genotypes G2, G3, G5, and G7 were recognized as genotypes with stable yields.

Conclusion: In general, genotypes 6 (FLIP2012-172L), 4 (FLIP2012-86L), 3 (FLIP2012-48L), 5 (FLIP2012-149L), and 7 (FLIP2012-176L) produced high yields in most of the environments based on different indices and showed good stability in most methods. Therefore, they could be candidates for the introduction of new cultivars.

Keywords: Adaptability, Biplot, Lentil, Priority index Yield stability

How to Cite This Article: Mirzaei, A., Pezeshkpour, P., Amiri, R., Karami, I. (2026). Evaluation of the Adaptability and Stability of Autumn Lentil Genotypes Using AMMI Model Indices. *J Crop Breed*, 18(1), 106-117. DOI: 10.61882/jcb.2026.1613



عدس (*Lens culinaris* Medik.) محصولی مقرون به صرفه و حاوی پروتئین غذایی (۲۲-۳۵٪)، مواد معدنی، فیبر و کربوهیدرات‌ها برای افراد فقیر است و نقش حیاتی در برطرف

معرفی ارقام پرمحصول با پایداری بهبودیافته از طریق برنامه‌های روشمند اصلاحی برای دستیابی به تولید هدفمند عدس ضروری است (Gupta *et al.*, 2019). علی‌رغم سازگاری گسترده ارقام عدس با اقلیم‌های متنوع، پتانسیل عملکرد عدس به‌طور قابل توجهی در محیط‌های مختلف به‌دلیل برهمکنش ژنوتیپ × محیط متفاوت است (Chandran *et al.*, 2022). ارزیابی آزمایش‌های چندمحیطی که در مناطق مختلف با استفاده از ژنوتیپ‌های متنوع انجام شده است، بینش‌های مهمی را در مورد برهمکنش ژنوتیپ × محیط ارائه می‌کند و شناسایی عوامل کلیدی زیستی و غیر زیستی مؤثر بر عملکرد را امکان‌پذیر می‌سازد. با تجزیه و تحلیل برهمکنش ژنوتیپ × محیط، مناطق را می‌توان به محیط‌های بزرگ متمایز طبقه‌بندی کرد که با الگوهای عملکرد ثابت مشخص می‌شود. شناسایی این محیط‌های بزرگ، همراه با عوامل مؤثر بر آن‌ها، به به‌نژادگرها اجازه می‌دهد تا اهداف اصلاحی هدفمند را تعیین و میارهای انتخاب را برای هر منطقه اصلاح کنند (Parihar *et al.*, 2022).

ارزیابی پایداری شش ژنوتیپ عدس در هشت ایستگاه در کشور ترکیه نشان داد که برهمکنش ژنوتیپ × محیط با استفاده از روش AMMI در سطح یک درصد معنی دار بود و دو مؤلفه اصلی اول، ۸۵/۱ درصد از تغییرات برهمکنش ژنوتیپ × محیط را توجیه کردند (Turk & Kendal, 2017).

جبرسون و همکاران با بررسی ۲۴ ژنوتیپ عدس در سه محیط در کشور هندوستان بیان کردند که دو مؤلفه اصلی اول بیش از ۹۰ درصد از تغییرات برهمکنش ژنوتیپ × محیط را توجیه نمودند و تجزیه و تحلیل AMMI نشان داد که ژنوتیپ‌ها سازگاری گسترده‌ای داشتند و تحت تأثیر برهمکنش ژنوتیپ × محیط قرار نگرفتند (Jeberson *et al.*, 2019).

در روش چندمتغیره، اثرات اصلی جمع‌پذیر و اثرات متقابل ضرب‌پذیر (AMMI)، ابتدا تجزیه واریانس معمولی روی داده‌های مربوط به عملکرد ژنوتیپ‌ها در محیط‌های مختلف انجام و سپس اثرات متقابل با روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی تحلیل و بررسی می‌شود (Gauch & Zobel, 1988).

گوپتا و همکاران اثرات بالای برهمکنش ژنوتیپ × محیط را بر عملکرد دانه، محتوای پروتئین و مواد معدنی در عدس گزارش کرده‌اند (Gupta *et al.*, 2021).

کریمی‌زاده و محمدی ضمن ارزیابی ۱۰ ژنوتیپ عدس با روش تجزیه پایداری AMMI نشان دادند که اثرات محیط، ژنوتیپ و برهمکنش ژنوتیپ × محیط معنی‌دار بودند و این سه جزء به ترتیب ۸۹/۲، ۲ و ۸/۶ درصد از مجموع مربعات کل ترکیبات تیماری را شامل شدند (Karimizadeh & Mohammadi, 2010).

هدف این پژوهش، ارزیابی برهمکنش ژنوتیپ × محیط بر ژنوتیپ‌های عدس و شناسایی ژنوتیپ‌های پایدار، پرمحصول و سازگار با شرایط اقلیمی مناطق دیم معتدل با استفاده از روش‌های تجزیه پایداری AMMI و شاخص برتری بود.

مصرف پروتئین گیاهی را به پروتئین حیوانی ترجیح می‌دهند، توصیه می‌گردد (Srivastava & Vasishta, 2012). گیاه عدس در سیستم تناوبی حبوبات - غلات دیم به‌خاطر تثبیت بیولوژیکی نیتروژن، جذب کربن و کنترل مؤثر علف‌های هرز، آفات، و بیماری‌های گیاهی ناشی از سیستم‌های تک‌کشتی، گیاه بسیار مناسبی است (Kumar *et al.*, 2013).

بر اساس آخرین آمارنامه زراعی، سطح زیر کشت این محصول در ایران در سال زراعی ۱۴۰۲-۱۴۰۱، ۸۱۷۲۸ هکتار بود که از این مقدار ۷۶۹۲۴ هکتار به کشت دیم و ۴۸۰۰ هکتار به کشت آبی اختصاص داشت. طبق این آمار، عملکرد عدس دیم در کشور ۵۰۳ کیلوگرم در هکتار و عملکرد عدس آبی ۱۴۷۸ کیلوگرم در هکتار گزارش شده‌اند (Anonymous, 2024). عملکرد پایین ژنوتیپ‌های عدس به‌دلیل عوامل مختلف ممانعت‌کننده تولید، از جمله حاصلخیزی پائین خاک، کمبود ارقام اصلاح‌شده پرمحصول، شدت تنش خشکی، بیماری‌ها، آفات، علف‌های هرز و مدیریت نامناسب تولید محصول، ایجاد می‌شود. در سالیان اخیر، تغییرات آب و هوایی جهانی، به‌ویژه به‌دلیل نوسانات در توزیع و پراکنش بارندگی و تغییرات زیست‌محیطی، تأثیر قابل‌توجهی بر تولید عدس داشته‌اند. از آنجا که در ایران معمولاً عدس در شرایط دیم در بهار کشت می‌شود، کشت پاییزه آن به خاطر افزایش راندمان بهره‌وری از بارش، موجب افزایش عملکرد دانه نسبت به کشت بهار در شرایط دیم می‌شود (Cokkizgin & Shtaya, 2013).

عملکرد عدس تحت تأثیر عوامل محیطی و ژنتیکی قرار می‌گیرد و به همین دلیل، ارزیابی پایداری عملکرد در شرایط مختلف برای انتخاب ارقام مناسب اهمیت دارد. پایداری عملکرد عدس در تولید، به تأمین غذای پایدار و قابل دسترس برای جوامع کمک می‌کند. عملکرد پایدار، درآمد کشاورزان را در طول زمان تضمین می‌کند و از نوسانات شدید قیمت و ضررهای اقتصادی جلوگیری می‌کند. با توجه به تغییرات اقلیمی و افزایش تنش‌های محیطی، انتخاب ارقام پایدار عدس که بتوانند در شرایط نامساعد نیز عملکرد خوبی داشته باشند، اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. بنابراین، تلاش برای شناسایی و کشت ارقام عدس پایدار، یکی از اهداف مهم در تحقیقات کشاورزی و توسعه پایدار تولید این محصول است (Pezeshkpour *et al.*, 2024).

آزمایش‌های چند محیطی نقشی اساسی در فرآیند ارزیابی انجام شده توسط به‌نژادگران گیاه برای ارزیابی عملکرد ژنوتیپ‌های جدید یا پیشرفته در طیف وسیعی از محیط‌های آزمایشی بازی می‌کنند. هدف اصلی این آزمایش‌ها تعیین برهمکنش ژنوتیپ × محیط است که مستلزم ارزیابی عملکرد ژنوتیپ‌های مختلف در شرایط مختلف محیطی است. در نظر گرفتن برهمکنش ژنوتیپ × محیط به به‌نژادگران این امکان را می‌دهد تا توصیه‌های خود را افزایش دهند و توسعه ژنوتیپ‌هایی را که نیازهای تولیدکنندگان را برآورده می‌کنند، بهبود بخشند. بنابراین، به‌نژادگرها باید از ابزارهایی استفاده کنند که بتوانند به‌طور مؤثر و دقیق عملکرد ژنوتیپ‌ها را در محیط‌های مختلف آزمایش ارزیابی کنند (Yan *et al.*, 2007).

مواد و روش‌ها

انتهای دو خط وسط حذف و محصول از مابقی هر کرت (۱/۵ متر مربع) برداشت شد، و با دستگاه خوشه‌کوب (خرمن‌کوب) آزمایشگاهی دانه از کاه جدا گردید. مبارزه با علف‌های هرز به‌صورت وجین دستی و با استفاده از کولتیواتور دستی در دو مرحله در طول دوره رشد رویشی انجام شد. عملکرد دانه در سال‌های مختلف برای هر ژنوتیپ بر اساس کیلوگرم در هکتار اندازه‌گیری شد.

تجزیه‌های آماری با استفاده از بسته تجزیه آزمایش‌های چندمحیطی با نام ¹Metan (Olivoto and Dalcol Lucio, 2020) و GGE (Wright & Laffont, 2018) در نرم‌افزار R انجام شدند.

برای تعیین کمیت پایداری ژنوتیپی، از تجزیه مقادیر منفرد (SVD)، بر روی ماتریس بهترین پیش‌بینی‌های ناریب خطی (BLUP) برهمکنش‌های ژنوتیپ $\times$ محیط با یک مدل اثر مختلط خطی (LMM) استفاده شد. اجزای واریانس با روش حداکثر درست‌نمایی محدودشده (REML, Restricted maximum likelihood) برآورد شدند و برای ارزیابی معنی‌داری اثرهای تصادفی، آزمون نسبت درست‌نمایی (Likelihood Ratio Test) (LRT) به‌کار گرفته شد. مدل آماری BLUP راهکاری برای توانایی پیش‌بینی بهتر است که در آن بهترین پیش‌بینی‌های ناریب خطی بر روی ماتریس برهمکنش ژنوتیپ $\times$ محیط تخمین زده می‌شود و تجزیه پایداری به روش AMMI بر روی این پیش‌بینی‌ها انجام می‌شود (Olivoto et al., 2019).

پارامترهای پایداری استفاده شده در این پژوهش در جدول ۴ نشان داده شده‌اند.

در این پژوهش ۱۰ ژنوتیپ پیشرفته عدس که از آزمایش‌های مقایسه عملکرد ژنوتیپ‌های پیشرفته سال زراعی قبل (۹۸-۱۳۹۷) گزینش شده بودند، به‌همراه ارقام شاهد (توده محلی، کیمیا و بیله‌سوار) (جدول ۱) در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار و در سه منطقه لرستان/خرم‌آباد (ایستگاه تحقیقات کشاورزی سراب چنگائی خرم‌آباد)، ایلام/چرداول (ایستگاه تحقیقات کشاورزی زنجیره چرداول) و کرمانشاه/سرارود (معاونت موسسه تحقیقات کشاورزی دیم کشور) به‌مدت سه سال زراعی (۴۰۱-۱۳۹۸) مورد مطالعه قرار گرفتند. تاریخ کاشت بسته به وضعیت بارندگی مؤثر در سه سال زراعی در مناطق مختلف از نیمه دوم آبان‌ماه تا نیمه دوم آذرماه انجام شد. در مزرعه، هر کرت شامل چهار خط کاشت ۴ متری با فاصله ۲۵ سانتی‌متر و تراکم ۲۰۰ دانه در متر مربع بود. در هر سال پیش از کشت، زمینی که در سال پیش از آن آیش و یا در تناوب با غلات دیم بود، با گاوآهن چپزل مرکب شخم زده شد و با دیسک و روتیواتور تسطیح و تهیه زمین آماده گردید. کاشت با استفاده از بذرکار آزمایشی (ساخت شرکت وینتر اشتایگر- کشور اتریش) انجام پذیرفت. عمق کاشت ۴-۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. کود شیمیایی بر مبنای ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار فسفات آمونیوم و ۳۵ کیلوگرم در هکتار اوره، به‌هنگام عملیات تهیه زمین، به‌طور یکنواخت با خاک مخلوط شد. ویژگی‌های جغرافیایی و میزان بارندگی سالانه مناطق اجرای آزمایش، به‌ترتیب در جدول‌های ۲ و ۳ نشان داده شده‌اند. قبل از برداشت، دو خط کناری و ۵/۰ متر از ابتدا و

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	کد ژنوتیپ	نام ژنوتیپ	کد ژنوتیپ	نام ژنوتیپ	کد ژنوتیپ
Genotype name	Genotype code	Genotype name	Genotype code	Genotype name	Genotype code
Local	G11	FLIP2012-172L	G6	FLIP2012-172L	G11
Kymia	G12	FLIP2012-176L	G7	FLIP2012-176L	G12
Bilehsavar	G13	FLIP2013-53L	G8	FLIP2013-53L	G13
		FLIP2013-55L	G9	FLIP2013-55L	
		FLIP2012-54L	G10	FLIP2012-54L	

جدول ۲- ویژگی‌های جغرافیایی مناطق اجرای آزمایش

Table 2. Geographic characteristics of experimental area

منطقه	ارتفاع از سطح دریا (متر)	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	میانگین بارندگی (میلی‌متر)	شرایط اقلیمی
Location	Above mean sea level (m)	Longitude	Latitude	Average rainfall (mm)	(Climatic condition)
Lorestan/Khoramabad	1147	48° 18' E	33° 29' N	445	Moderat cold
Ilam/Chardavel	975	47° 33' E	36° 46' N	350	Moderat warm
Kermanshah/sararood	1351	47° 20' E	34° 20' N	420	Moderat warm

جدول ۳- میزان بارندگی سالانه مناطق اجرای آزمایش در طول فصل زراعی در سال‌های ۱۳۹۸ تا ۱۴۰۱

Table 3. Annual rainfall of experimental areas during the cropping seasons (2019-2022)

منطقه	۱۳۹۸-۱۳۹۹	۱۳۹۹-۱۴۰۰	۱۴۰۰-۱۴۰۱
Location	2019-2020	2020-2021	2021-2022
Lorestan/Khoramabad	524 (E1)	305 (E2)	307 (E3)
Ilam/Chardavel	520 (E4)	313 (E5)	261 (E6)
Kermanshah/sararood	604 (E7)	301 (E8)	224 (E9)

E1 to E9 represent environments 1 to 9, respectively.

¹ Multi-Environment Trial Analysis

جدول ۴- شاخص‌های تجزیه پایداری

Table 4. Stability analysis indices

منابع References	رابطه Formula	شاخص Index	شماره No.
Purchase <i>et al.</i> , 2000	$ASV = \sqrt{\frac{SSIPC1}{SSIPC2}(IPC1)^2 + (IPC2)^2}$	AMMI Stability Value (ASV)	1
Sneller <i>et al.</i> , 1997	$SIPC = \sum_{n=1}^N \lambda_n^{0.5} \gamma_{in}$	Sum of IPCs Scores (SIPC)	2
Zobel <i>et al.</i> , 1988	$EV = \sum_{n=1}^N \gamma_{in}^2 / n$	Eigenvalue (EV) stability parameters of AMMI	3
Zali <i>et al.</i> , 2012	$Za_i = \sum_{n=1}^N \theta_n \gamma_{in} $	Absolute value of the relative contribution of IPCs to the interaction (Za)	4
Olivoto <i>et al.</i> , 2019a	$WAAS_i = \frac{\sum_{n=1}^N IPCA_{in} \times EP_n }{\sum_{n=1}^N EP_n}$	Weighted average of absolute scores (WASS)	5
Farshadfar, 2008	$SSI = R(\text{AMMI Stability Indices}) + RY$	Simultaneous selection index (SSI)	6
Lin and Binns, 1988	$P_i = \frac{\sum_{j=1}^n (X_{ij} - M_{.j})^2}{2n}$	Superiority index (Pi)	7

i = 1, ..., 15 (تعداد ژنوتیپ‌ها); ۱ = n, ..., p (تعداد مؤلفه‌های اصلی)

i = 1, ..., 15 (Number of genotypes); n = 1, ..., p (Number of principal components)

چندین مدل بیومتریک، از جمله مدل‌های AMMI و GGE بای پلات، برای بررسی برهمکنش ژنوتیپ × محیط و بررسی سازگاری و پایداری پیشنهاد شده‌اند (Gauch, 1988; Yan *et al.*, 2007).

نتایج و بحث

تجزیه واریانس نشان داد که اثرات محیط، ژنوتیپ و برهمکنش ژنوتیپ × محیط در سطح احتمال یک درصد بر عملکرد دانه ژنوتیپ‌های مطالعه شده معنی‌دار بودند (جدول ۵). با توجه به معنی‌دار بودن برهمکنش ژنوتیپ × محیط، امکان انجام تجزیه پایداری روی این داده‌ها وجود دارد. از این‌رو، تجزیه پایداری به روش AMMI انجام شد. برای انجام تجزیه AMMI، ابتدا ماتریس انحراف حاصل از اثرات جمع‌پذیر (ماتریس Z) محاسبه شد و سپس تجزیه به مؤلفه‌های اصلی، یک بار روی ماتریس Z برای ژنوتیپ‌ها و بار دیگر روی ماتریس Z'' برای محیط‌ها انجام شد. اولین (IPC1) و دومین (IPC2) مؤلفه اصلی برهمکنش ژنوتیپ × محیط، به ترتیب ۳۳/۳ و ۲۷/۳ درصد از تغییرات برهمکنش ژنوتیپ × محیط را توجیه کردند و مؤلفه‌های باقیمانده در درجه‌های بعدی اهمیت قرار داشتند (جدول ۵). در تطابق با این نتیجه، پژوهشگران دیگری نیز سهم ۴۰/۸ و ۲۷/۴ درصدی (Choukri *et al.*, 2025)، ۴۲/۹ و ۲۲/۴ درصدی (Pezeshkpour *et al.*, 2025) و ۶۱/۳ و ۲۳/۳ درصدی (Hossaini *et al.*, 2023) دو مؤلفه اصلی اول و دوم را در برهمکنش ژنوتیپ × محیط در ارزیابی ژنوتیپ‌های عدس نشان دادند.

این نتایج همچنین نشان دادند که اثر سه مؤلفه اصلی اول، معنی‌دار بود و در مجموع ۷۷/۲ درصد از تغییرات برهمکنش ژنوتیپ × محیط را توجیه کردند. سهم محیط، ژنوتیپ و برهمکنش ژنوتیپ × محیط در مجموع مربعات کل، به ترتیب ۶۴/۰۴، ۴/۲۸۶ و ۳۱/۶۷ درصد بود (جدول ۵). در تطابق با این نتیجه، سهم بیشتر اثر محیط در مجموع مربعات کل برای عملکرد دانه ژنوتیپ‌های عدس گزارش شده است (Choukri *et al.*, 2025).

اثر معنی‌دار ژنوتیپ، تفاوت عملکرد ژنوتیپ‌ها را نشان می‌دهد که در تجزیه‌های جداگانه هم، چنین نتایجی دیده شده بود و بیانگر پیش‌زمینه ژنتیکی مواد آزمایشی است. اثر معنی‌دار

در رابطه ۱، (ASV) نسبت $\frac{SSIPC1}{SSIPC2}$ وزن اختصاص داده شده به نخستین محور مؤلفه اصلی (IPC1) است که با تقسیم مجموع مربعات IPC1 بر مجموع مربعات IPC2 (دومین محور مؤلفه اصلی) به دست می‌آید. ارزیابی ژنوتیپ‌ها با این شاخص، فقط بر اساس دو مؤلفه اصلی اول انجام می‌شود. در رابطه ۲، $\lambda_n^{0.5}$ ریشه IPC در محور ln ام است. در این رابطه، برای SIPC1، N برابر با یک و برای SIPC2، N برابر با تعداد IPC‌هایی است که در مدل باقی مانده‌اند. در رابطه‌های ۳ و ۴، γ_{in} ریشه مشخصه برای محور n ام و N (در رابطه ۴)، تعداد مؤلفه‌های اصلی است که در تجزیه واریانس AMMI با آزمون F معنی‌دار شده است. در رابطه ۴، θ_n درصد مجموع مربعات توجیه شده به وسیله ln امین محور IPC است. ارزیابی ژنوتیپ‌ها با رابطه‌های ۲ تا ۴ بر پایه تمام مؤلفه‌های اصلی باقیمانده در مدل انجام می‌شود و از این‌رو، می‌توانند نسبت به شاخص ASV دارای برتری باشند. چهار شاخص بالا، برای شناسایی ژنوتیپ‌های پایدار، بدون در نظر گرفتن عملکرد دانه به کار گرفته می‌شوند و بر اساس آن، ژنوتیپ‌های دارای کمترین میزان این شاخص‌ها، پایدار در نظر گرفته می‌شوند. در رابطه ۵، WAAS_i میانگین وزنی نمرات مطلق ژنوتیپ i ام، $IPCA_{in}$ نمره ژنوتیپ ln ام در ln امین محور مؤلفه اصلی برهمکنش (IPCA)، EP_n مقدار واریانس توجیه شده توسط ln امین IPCA هستند. ژنوتیپ با کمترین مقدار WAAS، پایدار در نظر گرفته می‌شود (Olivoto *et al.*, 2019). در رابطه ۶، R(AMMI stability Indices)، رتبه ژنوتیپ‌ها بر پایه هر کدام از شاخص‌های پایداری AMMI و RY رتبه میانگین عملکرد دانه ژنوتیپ‌ها در تمام محیط‌ها است. کاربرد این شاخص برای شناسایی ژنوتیپ‌های برتر از نظر عملکرد دانه و پایداری عملکرد دانه است که در گزینش ژنوتیپ‌ها به هر دو شاخص میانگین عملکرد دانه و پایداری عملکرد دانه توجه شده است. نمودارهای بای پلات نوع اول (AMMI1 = IPCA1 vs seed yield) و نوع دوم (AMMI2 = IPCA1 vs IPCA2) شاخص با روش استاندارد کشیده شدند (Zobel *et al.*, 1988). شاخص برتری با رابطه ۷ (جدول ۴) محاسبه شد (Lin and Binns, 1988) که در آن، P_i برتری ژنوتیپ i ام، X_{ij} عملکرد ژنوتیپ ln ام در محیط j ام، M_j حداکثر پاسخ به دست آمده در میان همه ارقام در محیط j ام و n تعداد محیط‌ها هستند.

² Weighted Average of Absolute Score

ژنوتیپ‌ها و افزایش بازده گزینش ژنوتیپ‌ها و شناسایی ژنوتیپ‌های پایدار یا سازگار به مناطق، روش‌های مختلف تجزیه پایداری را به کار گرفت. با توجه به دریافت ژنوتیپ‌های پیشرفته از یک برنامه به‌نژادی در مرکز بین‌المللی تحقیقات کشاورزی در مناطق خشک (ایکارد)، این ژنوتیپ‌ها در آزمایش‌های چندمحیطی در مقایسه با محیط و برهمکنش ژنوتیپ × محیط نقش کمتری در توجیه تنوع کل داشتند. در بسیاری از پژوهش‌ها به خاطر این که اثر محیط بسیار زیاد است و قابل بهره‌برداری نیست و تنها اثرات ژنوتیپ و ژنوتیپ × محیط در گزینش ژنوتیپ‌های پایدار اهمیت دارند، لذا در این موارد بهتر است که اثر محیط حذف شود و بیشتر بر اثر ژنوتیپ و برهمکنش ژنوتیپ × محیط تمرکز شود (Gauch *et al.*, 1996).

معنی‌دار شدن اثر سه مؤلفه اصلی، بر پیچیدگی زیاد اثر توأم ژنوتیپ و محیط در این آزمایش دلالت دارد و از این‌رو، برای کاهش تأثیرات منفی این پیچیدگی، پژوهشگر باید از شاخص‌هایی در تجزیه پایداری استفاده کند که در برآورد آن‌ها، تعداد بیشتری از مؤلفه‌ها نقش دارند.

محیط، نشانه‌ای از تأثیر متفاوت مکان‌های آزمایشی و سال‌های زراعی بر عملکرد دانه است؛ حال آن که اثر معنی‌دار برهمکنش ژنوتیپ × محیط بیانگر نوسان عملکرد ژنوتیپ‌ها در محیط‌های آزمایشی است که می‌تواند برآمده از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، طول و عرض جغرافیایی، تغییرات آب و هوایی و ... باشد (Hajivand *et al.*, 2020).

سهم بیشتر اثر محیط در توجیه مجموع مربعات کل، نشان‌دهنده دامنه گسترده‌تر اثرات اصلی محیط و به بیانی دیگر تفاوت بین محیط‌ها است که دلیل این تفاوت می‌تواند ناشی از میزان و پراکنش بارندگی در طول سال‌ها و مکان‌های انجام آزمایش و همچنین تفاوت در توزیع ماهانه بارندگی در دوره‌های مختلف رشدی گیاه باشد. سهم بیشتر برهمکنش ژنوتیپ × محیط می‌تواند به واکنش‌های متفاوت ژنوتیپ‌ها به عوامل جغرافیایی و اقلیمی نسبت داده شود. بنابر این، با توجه به نوسان عملکرد ژنوتیپ‌ها در محیط‌های مختلف و برهمکنش معنی‌دار بین محیط و ژنوتیپ، نتیجه‌گیری و انتخاب ژنوتیپ‌های برتر بر اساس نتایج تجزیه مرکب و مقایسه میانگین عملکرد دانه کافی نیست و باید برای تعیین اندازه پایداری عملکرد دانه

جدول ۵- تجزیه واریانس مرکب روش AMMI برای عملکرد دانه ژنوتیپ‌های عدس

Table 5. AMMI combined analysis of variance for seed yields of lentil genotypes

منابع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	مقدار F	درصد از مجموع مربعات کل	درصد تغییرات از اثر مقابل ژنوتیپ در محیط	درصد تجمعی تغییرات
S.O.V	df	Sum of Squares	Mean of Squares	F Value	Percentage of the total sum of squares	The percentage of variation from the genotype- $\times$ environment interaction	Cumulative percentage of changes
ENV	8	25985830	3248229 **	144.441	64.04		
REP(ENV)	18	404788	22488	0.841			
GEN	12	1376811	114734 **	4.291	4.286		
GEN:ENV	96	6375502	66411 **	2.484	31.67		
PC1	19	2123541	111765 **	4.18		33.3	33.3
PC2	17	1741434	102437 **	3.83		27.3	60.6
PC3	15	1056538	70436 **	2.63		16.6	77.2
PC4	13	592102	45546 ns	1.7		9.3	86.5
PC5	11	425802	38709 ns	1.45		6.7	93.2
PC6	9	212613	23624 ns	0.88		3.3	96.5
PC7	7	131319	18760 ns	0.7		2.1	98.6
PC8	5	92153	18431 ns	0.69		1.4	100
Residuals	216	5776015	26741				
Total	446	46294448	103799				
C.V.(%)	25.7						

ns, * and **: Non- significant and significant at 5 % and 1 % probability levels, respectively

بر اساس شاخص SIPC، ژنوتیپ‌های ۱۳، ۲، ۳ و ۵ پایدارترین ژنوتیپ‌ها بودند، در حالی که بر اساس شاخص EV، ژنوتیپ‌های شماره ۲، ۳ و ۵ از پایداری بیشتری برخوردار بودند. شاخص ZA نیز ژنوتیپ‌های شماره ۱۳، ۲، ۳ و ۵ را به‌عنوان چهار ژنوتیپ پایدار شناسایی کرد. بر پایه شاخص WAAS نیز ژنوتیپ‌های شماره ۵، ۶، ۷ و ۹ پایدارترین بودند. مزیت این شاخص نسبت به سایر شاخص‌های AMMI این است که در برآورد آن، از تمام مؤلفه‌های اصلی مدل با وزن‌های متفاوت استفاده می‌شود (Olivoto *et al.*, 2019). از آنجا که در ارزیابی ژنوتیپ‌ها و برگزیدن ژنوتیپ‌های برتر با شاخص‌های بالا، فقط به جنبه پایداری ژنوتیپ‌ها اهمیت داده شده است، امکان برگزیدن ژنوتیپ‌هایی با عملکرد پایین همچون ژنوتیپ شماره

شاخص‌های پایداری AMMI و شاخص انتخاب همزمان (Simultaneous selection index, SSI)

با استفاده از پارامترهای مختلف AMMI، ابعاد گوناگون تغییرات ناشی از برهمکنش ژنوتیپ × محیط ارزیابی شدند. میانگین عملکرد هر کدام از ژنوتیپ‌ها در تمام محیط‌ها نشان می‌دهد که بیشترین عملکرد دانه در ژنوتیپ شماره ۱۲ (۷۱۵ کیلوگرم در هکتار) و در پی آن، در ژنوتیپ‌های شماره ۶ و ۴ دیده شد (جدول ۶). بر اساس شاخص پایداری ASV، ژنوتیپ‌های شماره ۲، ۳ و ۵ با نمره‌های پایین، پایدارترین ژنوتیپ‌ها بودند. در پژوهش‌های دیگر نیز از این شاخص به‌عنوان یک معیار مفید برای شناسایی ژنوتیپ‌های پایدار در عدس استفاده شده است (Pezeshkpour *et al.*, 2025; Tadesse *et al.*, 2021; Bale, 2020).

تبیین نشان داد که استفاده از روش گزینش همزمان برای عملکرد و پایداری می‌تواند با اطمینان بیشتری فرایند گزینش را انجام دهد (Moghadam, 2003). در پژوهشی دیگر، نشان داده شد که گزینش همزمان برای عملکرد و هر یک از پارامترهای پایداری توانست به شناسایی ژنوتیپ‌های پایدار عدس کمک کند (Karimizadeh *et al.*, 2021).

به‌طور کلی، در صورت وجود برهمکنش معنی‌دار ژنوتیپ و محیط، اگر دو مؤلفه اصلی اول بیش از ۵۰ درصد از کل تغییرات را توجیه کند، بای‌پلات می‌تواند ابزار مناسبی برای مطالعه برهمکنش ژنوتیپ × محیط باشد. در این پژوهش، با آنکه دو مؤلفه اصلی اول، ۶۴/۶ درصد برهمکنش ژنوتیپ × محیط را توجیه کردند، اما مشاهده شد که گزینش ژنوتیپ‌ها فقط بر پایه این دو مؤلفه و صرف‌نظر از سایر مؤلفه‌ها و عملکرد دانه، می‌تواند منجر به نتایج نادرستی شود. برای نمونه، ژنوتیپ شماره ۱۳، که در سه تا از شاخص‌های AMMI پایدار بود، زمانی که از SSI برای هر یک از شاخص‌ها استفاده شد، جزو ژنوتیپ‌های منتخب قرار نگرفت. در سوی مقابل، ژنوتیپ شماره ۶ بود که بر اساس پارامترهای AMMI پایدار نبود، اما به عنوان یک ژنوتیپ برتر با توجه به شاخص‌های SSI آن‌ها برگزیده شد. بنابراین، زمانی که توجیه الگوی برهمکنش ژنوتیپ × محیط با دو مؤلفه اصلی اول، کم تا متوسط باشد (برای نمونه در محاسبه شاخص ASV)، لازم است در تفسیر احتیاط شود؛ زیرا ممکن است که تعداد بیشتری از محورهای در الگوی برهمکنش ژنوتیپ × محیط نقش داشته باشند، به طوری که حتی مؤلفه‌های اصلی آخر نیز می‌توانند سهمی در این برهمکنش‌ها داشته باشند (Olivoto *et al.*, 2019).

روش AMMI در هر محیط، ژنوتیپ برتر را از نظر عملکرد و پایداری انتخاب می‌کند که نتایج حاصل از این تجزیه در جدول ۷ نشان داده شده‌اند. ژنوتیپ شماره ۷ در محیط یک و دو (به‌ترتیب سال اول و دوم لرستان/خرم‌آباد) با کسب رتبه دو و در محیط‌های پنج، شش و هفت (به‌ترتیب سال دوم و سوم ایلام/چرداول و سال اول کرمانشاه/سرارود) با کسب رتبه یک، به‌عنوان یکی از پایدارترین ژنوتیپ‌ها شناخته شد. ژنوتیپ شماره سه در محیط یک (سال اول لرستان/خرم‌آباد) حائز رتبه یک، در محیط سه (سال سوم لرستان/خرم‌آباد) حائز رتبه دو و در محیط پنج (سال دوم ایلام/چرداول) حائز رتبه دو گردید. بنابر این، می‌تواند به‌عنوان یکی از پایدارترین ژنوتیپ‌ها در این روش انتخاب شود.

۱۳ وجود دارد که عملکرد آن، پایین‌تر از متوسط کل ژنوتیپ‌ها است. بنابر این، از شاخص انتخاب همزمان (SSI) بر پایه هر کدام از شاخص‌های بالا استفاده شد، به طوری که بر مبنای شاخص انتخاب همزمان SSIASV که بر پایه شاخص پایداری ASV است، ژنوتیپ‌های ۳، ۵ و ۲ را می‌توان ژنوتیپ‌های برتر از نظر پایداری و عملکرد دانه شناسایی کرد.

انتخاب همزمان ژنوتیپ‌ها بر اساس شاخص SIPC و عملکرد دانه، ژنوتیپ‌های ۳، ۵ و ۲ را به‌عنوان برترین ژنوتیپ‌ها در نظر گرفت. بر اساس انتخاب همزمان بر پایه SSIEV، ژنوتیپ‌های ۳، ۵ و ۲ به‌عنوان ژنوتیپ‌های برتر شناسایی شدند. بر پایه شاخص SSIWAAS که در برآورد آن افزون بر تمام مؤلفه‌های برهمکنش ژنوتیپ × محیط، به عملکرد دانه ژنوتیپ‌ها نیز توجه شده است، ژنوتیپ‌های ۵، ۷ و ۹ برترین ژنوتیپ‌ها بودند (جدول ۶).

برای شناسایی ژنوتیپ‌های دارای عملکرد پایدار از پارامتر فاصله AMMI نیز استفاده شد. هرچه میزان فاصله AMMI ژنوتیپ بیشتر باشد، فاصله ژنوتیپ از مبدأ مؤلفه‌ها بیشتر و ژنوتیپ دارای عملکرد دانه ناپایدار محسوب می‌شود. ژنوتیپ‌های دارای فاصله کمتر AMMI به عنوان ژنوتیپ‌های دارای عملکرد پایدار در نظر گرفته می‌شوند. با استفاده از این پارامتر، ژنوتیپ‌های شماره ۲، ۳، ۵ و ۷ به‌عنوان ژنوتیپ‌های دارای عملکرد پایدار شناخته شدند. همان‌گونه که گفته شد، آماره‌های SSI که در برآورد آن‌ها به هر دو جنبه پایداری و متوسط عملکرد یک ژنوتیپ توجه می‌شود و این معیارها در یک شاخص گردآورده می‌شوند، محدودیت‌های گزینش ژنوتیپ فقط بر پایه شاخص پایداری کاهش می‌یابد و بهره‌گیری از این شاخص‌ها وابسته به این واقعیت است که پایدارترین ژنوتیپ‌ها همیشه بالاترین عملکرد را ندارند. از طرفی، ژنوتیپ‌های پایدار اما با عملکرد پایین نیز با این شیوه برگزیده نمی‌شوند (Farshadfar, 2008). روش گزینش همزمان برای عملکرد و پایداری در عدس (Pezeshkpour *et al.*, 2024)، برای تعیین پایداری ژنوتیپ‌ها استفاده شده است. همچنین در پژوهش دیگری، از شاخص Ysi، برای گزینش همزمان برای عملکرد و پایداری استفاده شده است (Shobeiri *et al.*, 2023).

در توجیه کاربرد روش گزینش همزمان برای ارزیابی عملکرد و پایداری، محققان با مقایسه این آماره با آماره‌های مختلف پایداری همچون واریانس محیطی، ضریب تغییرات محیطی، ضریب رگرسیون، انحراف از خط رگرسیون و ضریب

جدول ۶- شاخص‌های پایداری، رتبه ژنوتیپ‌ها و شاخص انتخاب همزمان

Code	Yield (kg/ha)	IPCA1	IPCA2	IPCA3	ASV	SIPC	EV	ZA	rY	rASV	rSIPC
G1	628	-4.538	-5.943	-5.755	7.04	14.8	0.038	0.134	9	5	5
G2	634	2.63	-3.048	-3.048	4.42	10.7	0.021	0.095	8	1	2
G3	674	-3.75	-2.304	4.892	5.12	10.9	0.021	0.099	4	2	3
G4	691	-6.556	-11.06	2.678	13.6	20.3	0.075	0.203	3	10	8
G5	658	-4.772	0.4771	6.061	5.84	11.3	0.030	0.101	5	3	4
G6	703	-4.538	4.898	4.898	7.39	14.9	0.036	0.138	2	6	6
G7	639	1.204	5.799	5.799	5.98	170.2	0.074	0.141	7	4	13
G8	622	-5.274	10.13	10.13	12	23.1	0.089	0.213	10	8	9
G9	653	-11.47	-10.49	-9.732	17.5	31.3	0.150	0.299	6	11	11
G10	617	14.42	0.6678	-12.65	17.6	27.7	0.172	0.258	11	12	10
G11	484	2.614	12.53	-1.54	12.9	16.7	0.073	0.164	13	9	7
G12	715	18.68	-9.782	4.532	24.8	33	0.192	0.342	1	13	12
G13	529	-0.0778	8.123	-1.909	8.12	10.1	0.031	0.094	12	7	1

ASV: ارزش پایداری امی، SIPC: مجموع نمره‌های محورهای مؤلفه‌ها، EV: مقدار ویژه پارامتر پایداری AMMI، ZA: قدر مطلق سهم نسبی IPC در برهمکنش ASV: AMMI stability value, SIPC: Sum of IPCs scores, EV: Eigenvalue stability parameter of AMMI, ZA: Absolute value of the relative contribution of IPCs to the interaction

ادامه جدول ۶- شاخص های پایداری، رتبه ژنوتیپ ها و شاخص انتخاب همزمان

Table 6 Continued. Stability indices, ranks of genotypes, and the simultaneous selection index (SSI)

Code	rEV	rZa	SSIASV	SSISIPC	SSIEV	SSIZa	WAAS	rWAAS	SSIWAAS	AMMI distance
G1	6	5	14	14	15	14	4.68	5	14	6.7
G2	1	2	9	10	9	10	9.17	11	19	4.03
G3	2	3	6	7	6	7	5.89	8	12	4.4
G4	9	9	13	11	12	12	12.49	13	16	12.9
G5	3	4	8	9	8	9	3.32	2	7	4.8
G6	5	6	8	8	7	8	3.29	1	3	6.68
G7	8	7	11	20	15	14	3.48	3	10	5.92
G8	10	10	18	19	20	20	7.32	9	19	11.4
G9	11	12	17	17	17	18	3.53	4	10	15.5
G10	12	11	23	21	23	22	4.87	7	18	14.4
G11	7	8	22	20	20	21	4.76	6	19	12.8
G12	13	13	14	13	14	14	7.51	10	11	21.1
G13	4	1	19	13	16	13	10.67	12	24	8.12

WAAS: میانگین وزنی نمرات مطلق، SSI: شاخص انتخاب همزمان، Pi-a: شاخص برتری لین و بینز

WASS: Weighted average of absolute scores, SSI: Simultaneous selection index, Pi-a: Superiority index Lin & Binns

جدول ۷- ژنوتیپ انتخابی هر محیط توسط روش AMMI

Table 7. Selected genotypes in each environment based on the AMMI method

محیط	عملکرد (کیلوگرم در هکتار)	رتبه	رتبه اول	رتبه دوم	رتبه سوم	رتبه چهارم
Environment	Yield (kg/ha)	Score	First rank	Second rank	Third rank	Fourth rank
E1	1315.42	-11.538	3	7	4	2
E2	690.4	-1.05273	10	7	2	4
E3	615.31	22.1826	9	3	4	8
E4	655.9	5.3784	5	11	13	6
E5	614.29	6.37369	7	3	12	4
E6	601.41	-2.92933	7	12	11	6
E7	566.15	-2.60407	7	12	1	4
E8	299.81	-9.50611	10	5	7	1
E9	350.77	-6.30364	4	6	2	12

جدول ۸- شناسایی ژنوتیپ های برتر عدس با شاخص برتری در کل محیط ها و محیط های مطلوب و نامطلوب

Table 8. Identification the superior lentil genotypes by the superiority index in all and favorable and unfavorable environments

Code	Yield (kg/ha)	Pi-a	R pi	Pi_f	R-f	Pi_u	R-u
G1	628	51336.5	7	38884.7	4	57562.4	9
G2	634	48689.62	5	61936.0	7	42066.4	3
G3	674	47257.76	4	47639.2	5	47067.1	4
G4	691	41206.66	2	14806.2	1	54406.9	8
G5	658	48801.26	6	49804.8	6	48299.5	6
G6	703	42097.51	3	65987.4	8	30152.6	1
G7	639	59231.32	9	82181.7	10	47756.2	5
G8	622	70514.15	11	68746.1	9	71398.2	10
G9	653	58615.39	8	22263.4	2	76791.4	11
G10	617	60433.2	10	82374.7	11	49462.4	7
G11	484	118876.24	13	177309.1	13	89659.8	13
G12	715	30816.97	1	27175.9	3	32637.5	2
G13	529	95717.31	12	124674.8	12	81238.6	12

Pi-a: شاخص برتری در کل محیط ها، Pi-f: شاخص برتری در محیط های مطلوب، Pi-u: شاخص برتری در محیط های نامطلوب

Pi-a: Superiority index in all environments, Pi-f: Superiority index in favorable environments, Pi-u: Superiority index in unfavorable environments

تفسیر بای پلات

دو محور افقی و عمودی بای پلات نوع اول AMMI (عملکرد دانه در برابر مؤلفه اصلی اول)، به ترتیب به عملکرد دانه (به عنوان نمودار بیان فنوتیپی یک ژنوتیپ) و نخستین مؤلفه اصلی برهمکنش ژنوتیپ × محیط (IPC1) اختصاص داده می شوند و بر مبنای بزرگی (مثبت یا منفی) و کوچکی (نزدیک به صفر و مبدأ مختصات) ضرایب ژنوتیپ ها و محیط ها در این مؤلفه اصلی، پایداری آن ها شناسایی می شود. ژنوتیپ های دارای مقادیر اولین مؤلفه اصلی بزرگ (مثبت یا منفی)، برهمکنش بالایی با محیط دارند، در حالی که ژنوتیپ ها و محیط های دارای مقادیر اولین مؤلفه اصلی نزدیک به صفر، دارای برهمکنش پایینی هستند. بر این اساس، ژنوتیپ های شماره ۲، ۷، ۱۳، ۳، ۸ و ۶ دارای کمترین مقادیر IPCA1 بودند اما فقط میانگین عملکرد دانه ژنوتیپ های شماره ۲، ۷، ۳

و ۶ بیشتر از میانگین کل (۶۳۴/۴ کیلوگرم در هکتار) بود و به عنوان ژنوتیپ های پایدار با سازگاری عمومی بالا معرفی شدند (شکل ۱).

از سوی دیگر، ژنوتیپ های ۱۲ و ۹ دورترین ژنوتیپ ها از مبدأ بای پلات (دارای بیشترین ضرایب در مؤلفه اصلی اول) بودند و بر اساس این شاخص، ناپایدار بودند (شکل ۱)، البته بیشتر ژنوتیپ ها در اطراف محور عمودی پراکنده بودند و کمترین فاصله را از این محور داشتند. محیط های شماره ۲ (سال دوم لرستان/خرم آباد)، ۴ (سال اول ایلام/چرداول)، ۵ (سال دوم ایلام/چرداول)، ۶ (سال سوم ایلام/چرداول) و ۷ (سال اول کرمانشاه/سرارود) دارای کمترین مقدار IPCA1 و کمترین برهمکنش ژنوتیپ × محیط بودند. به این ترتیب، این محیط ها به نسبت محیط های دیگر، پایداری عملکرد بهتری داشتند. محیط های یک (سال اول لرستان / خرم آباد)، دو (سال

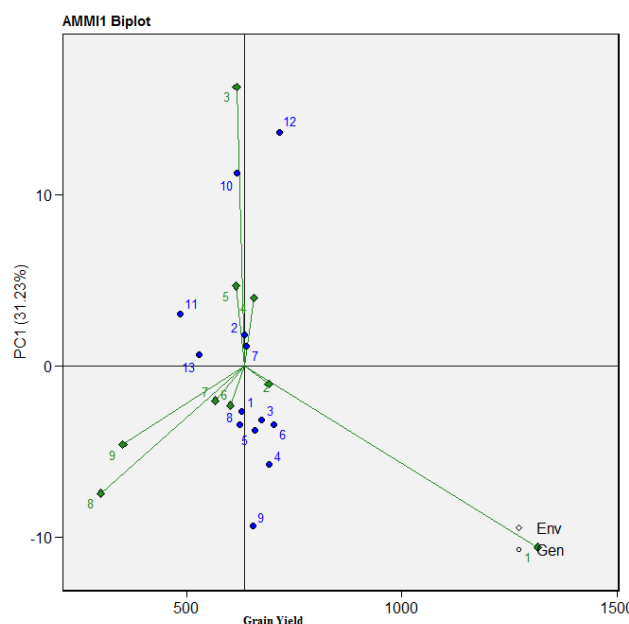
۲ و ۸ بودند. در بخش سوم، ژنوتیپ‌های شماره ۶، ۷ و ۸ بهترین ژنوتیپ‌ها برای محیط‌های ۷، ۶ و ۹ بودند (شکل ۲). از دیگر کاربردهای نمودار بای‌پلات، علاوه بر شناسایی ژنوتیپ‌های سازگار به هر محیط، معرفی ژنوتیپ‌های با پایداری عمومی است، به طوری که ژنوتیپ‌های شماره ۲، ۷، ۵ و ۳ تا حدودی ژنوتیپ‌های شماره ۱ و ۶ دارای پایداری عمومی بالایی بودند. در تطابق با یافته حاضر، پژوهشگران دیگری نیز با استفاده از روش بای‌پلات نوع دوم، ژنوتیپ‌های پایدار عدس را شناسایی کرده‌اند (Hossain *et al.*, 2023; Pezeshkpour *et al.*, 2024; Choukri *et al.*, 2025).

شناسایی ژنوتیپ‌های برتر بر پایه شاخص برتری لین و بینز

در این پژوهش، علاوه بر شاخص‌های مختلف AMMI، از شاخص برتری لین و بینز (Lin & Binns, 1988) که برتری عمومی رقم را در تمام محیط‌ها (Pi-a)، محیط‌های مطلوب (Pi-f) و محیط‌های نامطلوب (Pi-u) اندازه‌گیری می‌کند. بر اساس شاخص Pi-a ژنوتیپ‌های شماره ۱۲، ۴، ۶، ۳ و ۲ ژنوتیپ‌های برتر بودند. در محیط‌های مطلوب نیز پنج ژنوتیپ برتر به ترتیب عبارت از ژنوتیپ‌های شماره ۴، ۹، ۱۲، ۱ و ۳ بودند، در حالی که در محیط‌های نامطلوب، ژنوتیپ‌های شماره ۶، ۱۲، ۲ و ۳ برترین ژنوتیپ‌ها بودند. بنابراین و بر اساس این سه شاخص، ژنوتیپ‌های شماره چهار، شش و ۱۲، برترین ژنوتیپ‌ها در محیط‌های مطالعه شده بودند. در تطابق با این نتیجه، دهقانی و همکاران (Dehghani *et al.*, 2008) نیز با استفاده از شاخص Pi در ژنوتیپ‌های عدس، پایدارترین ژنوتیپ‌ها را شناسایی کردند.

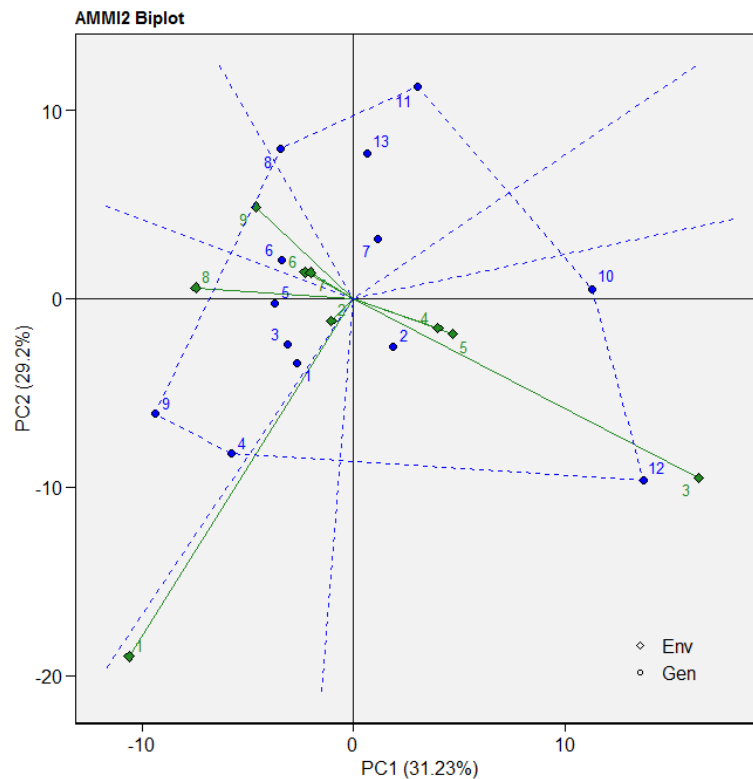
دوم لرستان/خرم آباد) و چهار (سال اول ایلام/چرداول) عملکرد دانه بالاتری نسبت به میانگین کل داشتند (شکل ۱).

توضیح این نکته ضروری است که اگر تصمیم‌گیری برای شناساندن ژنوتیپ‌های پایدار بر مبنای این نمودار باشد که در کشیدن آن، فقط از مؤلفه اصلی نخست بهره گرفته شده است که تنها ۳۳/۳ درصد از تغییرات برهمکنش ژنوتیپ × محیط را توجیه می‌کند، می‌تواند به نتایج نادرستی بیانجامد. از این‌رو، از روش بای‌پلات نوع دوم AMMI استفاده شد که در آن از ضرایب هر دو مؤلفه اصلی اول و دوم بهره گرفته شده است. با توجه به سهم بالای دو مؤلفه اصلی اول و دوم در برهمکنش ژنوتیپ × محیط (۶۰/۶ درصد) نسبت به بای‌پلات نوع اول، به نظر می‌رسد که ارزیابی ژنوتیپ‌ها با بای‌پلات نوع دوم AMMI به واقعیت نزدیک‌تر باشد و ژنوتیپ‌های پایدار را به شکل بهتری شناسایی کند (Olivoto *et al.*, 2019). در این نمودار (شکل ۲)، ژنوتیپ‌های شماره ۱۱، ۹، ۸، ۴، ۱۲ و ۱۰ با بیشترین فاصله از مبدأ بای‌پلات، سهم بالایی در برهمکنش ژنوتیپ × محیط داشتند و ژنوتیپ‌های ناپایداری بودند. اما این ژنوتیپ‌ها، بهترین یا ضعیف‌ترین در برخی یا تمام محیط‌ها و دارای سازگاری به برخی از محیط‌ها بودند، به طوری که در هر بخش، ژنوتیپ قرار گرفته در رأس آن، بهترین ژنوتیپ برای محیط‌های واقع در آن است (Yan *et al.*, 2000). در هر کدام از بخش‌های این نمودار چند ضلعی، ژنوتیپ‌های سازگار با برخی از محیط‌ها قابل شناسایی هستند. بر این اساس، ژنوتیپ ۱۲ به عنوان ژنوتیپ رأسی و ژنوتیپ شماره ۲ درون آن بخش، بهترین ژنوتیپ برای محیط‌های شماره ۳، ۴ و ۵ بود. در بخش بعدی این چندضلعی، ژنوتیپ‌های شماره ۱، ۳ و ۵ بهترین ژنوتیپ‌ها برای محیط‌های



شکل ۱- بای‌پلات AMMI1 برای شناسایی ژنوتیپ‌های برتر عدس بر پایه میانگین عملکرد دانه و مؤلفه اصلی اول. ژنوتیپ‌ها مطابق با جدول ۱ و اسامی محیط‌ها مطابق با جدول ۳ هستند.

Figure 1. The AMMI1 biplot to identify the superior lentil genotype based on mean grain yield and PC1. The names of genotypes and environments are based on Tables 1 and 3, respectively.



شکل ۲- بای پلات AMMI2 برای شناسایی ژنوتیپ‌های برتر عدس بر پایه دو مؤلفه اصلی اول. اسامی ژنوتیپ‌ها مطابق با جدول ۱ و اسامی محیط‌ها مطابق با جدول ۳ هستند.

Figure 2. The AMMI2 biplot to identify the superior lentil genotype based on the first two PCs. The names of genotypes and environments are based on Tables 1 and 3, respectively.

نتیجه‌گیری کلی

ژنوتیپ‌ها بودند. بر پایه بای پلات AMMI1، ژنوتیپ‌های شماره ۲، ۷، ۳ و ۶ با میانگین بیشتر از میانگین کل (۶۳۴ کیلوگرم در هکتار) و کمترین مقادیر IPCA1، به عنوان ژنوتیپ‌های پایدار با سازگاری عمومی بالا بودند. بر پایه بای پلات AMMI2، ژنوتیپ‌های ۳، ۵ و ۷ علاوه بر پایداری عمومی بالا، دارای میانگینی بالاتر از میانگین کل بودند. در ارتباط با مقایسه شاخص‌ها، از آنجا که در محاسبه شاخص WAAS، تمامی مؤلفه‌های اصلی معنی‌دار با وزن‌های متفاوت به کار گرفته شده‌اند، پایداری عملکرد را به شکل بهتری نشان می‌دهند و ژنوتیپ‌های برگزیده با این شاخص از پایداری مطمئن‌تری برخوردار هستند و پیشنهاد می‌شود که در پژوهش‌های آینده برای تعیین پایداری ژنوتیپ‌ها، این روش بیشتر مورد توجه قرار گیرد. علاوه بر شاخص‌های AMMI، از شاخص برتری لین و بینز نیز برای شناسایی ژنوتیپ‌های برتر استفاده شد که بر این اساس نیز ژنوتیپ‌های شماره ۱۲، ۴، ۶ و ۳، برترین ژنوتیپ‌ها در محیط‌های مطالعه شده بودند. با استفاده از پارامتر فاصله امی، ژنوتیپ‌های شماره ۲، ۳، ۵ و ۷ به عنوان ژنوتیپ‌های دارای عملکرد پایدار شناخته شدند. در مجموع و بر پایه شاخص‌های مختلف، ژنوتیپ‌های شماره ۶ (FLIP2012-172L)، ۴ (FLIP2012-86L)، ۳ (FLIP2012-48L)، ۵ (FLIP2012-149L) و ۷ (FLIP2012-176L) در بسیاری از محیط‌ها (ترکیبی از سال و مکان) و در بیشتر روش‌ها، دارای عملکرد و پایداری مطلوبی بودند و نسبت به رقم شاهد بیله سوار (۵۲۹ کیلوگرم در هکتار) به ترتیب ۳۳، ۳۱، ۲۷، ۲۴ و ۲۱

واریانس برآورد شده به سه جزء واریانس ژنوتیپی، برهمکنش ژنوتیپ × محیط و باقیمانده تفکیک شد. ۳۱/۶۷ درصد از واریانس توسط برهمکنش ژنوتیپ × محیط توجیه گردید، حال آن که اثر ژنوتیپ، به تنهایی توجیه‌کننده ۴/۲۹ درصد از واریانس برآورد شده است. عمده واریانس (۶۴/۰۴ درصد) نیز توسط اثر باقیمانده توجیه گردید. 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. تجزیه واریانس AMMI نشان داد که سه مؤلفه اصلی اول، اثر معنی‌داری در برهمکنش ژنوتیپ × محیط داشتند. در بین ژنوتیپ‌های مطالعه شده، بیشترین عملکرد دانه در ژنوتیپ شماره ۱۲ (۷۱۵ کیلوگرم در هکتار) و در پی آن در ژنوتیپ‌های شماره ۶ و ۴ دیده شد. بر اساس شاخص پایداری ASV، ژنوتیپ‌های شماره ۲، ۳ و ۵، بر اساس شاخص SIPC، ژنوتیپ‌های ۱۳، ۲، ۳ و ۵، بر اساس شاخص EV، ژنوتیپ‌های شماره ۲، ۳ و ۵، بر اساس شاخص WAAS نیز ژنوتیپ‌های ۲، ۳ و ۵ و بر اساس شاخص WAAS نیز ژنوتیپ‌های ۵، ۶، ۷ و ۹ پایدارترین ژنوتیپ‌ها بودند. بر مبنای شاخص انتخاب همزمان SSIASV، ژنوتیپ‌های ۳، ۶، ۵ و ۲، بر مبنای شاخص SSISIPC، ژنوتیپ‌های شماره ۳، ۶، ۵ و ۲، بر مبنای شاخص SSIEV، ژنوتیپ‌های ۳، ۶، ۵ و ۲، بر مبنای شاخص SSIZA، ژنوتیپ‌های شماره ۳، ۶، ۵ و ۲ و بر مبنای شاخص SSIWAAS، ژنوتیپ‌های ۶، ۵، ۷ و ۹ برترین

تشکر و قدردانی

این تحقیق منتج از پروژه مصوب مؤسسه تحقیقات کشاورزی دیم به شماره ۹۸۰۹۹۸-۳۷-۱۵-۰۱ است که به این وسیله از مسئولین محترم مؤسسه تحقیقات کشاورزی دیم سپاسگزاری می‌شود.

درصد و نسبت به میانگین کل ژنوتیپ‌ها (۶۳۴/۴) کیلوگرم در هکتار) به ترتیب ۱۱، ۹، ۴ و یک درصد، افزایش نشان دادند ولی نسبت به میانگین رقم شاهد کیمیا، هیچکدام از ژنوتیپ‌ها افزایش عملکردی را نشان ندادند و می‌توانند نامزد معرفی ارقام جدید باشند.

References

- Anonymous. (2024). Agricultural Statistics of 2022-2023 Cropping Season. Ministry of Agriculture-Jahad, Vol. 1. [In Persian]
- Bale, S. E. (2020). AMMI Analysis for Grain yield Stability in Lentil Genotypes Tested in the Highlands of. In Regional Review Workshop on Completed Research Activities (p. 26). <https://doi.org/10.11648/j.jps.20210901.12>
- Chandran MA, S., Banerjee, S., Mukherjee, A., Nanda, M. K., & Kumari, V. V. (2022). Evaluating the long-term impact of projected climate on rice-lentil-groundnut cropping system in Lower Gangetic Plain of India using crop simulation modelling. *International Journal of Biometeorology*, 1-15. <https://doi.org/10.1007/s00484-021-02189-8>
- Choukri, H., Aloui, K., El Haddad, N., Hejjoui, K., Smouni, A., & Kumar, S. (2025). AMMI and GGE-Biplot Analysis for Seed Yield and Nutritional Quality Traits in Lentil (*Lens culinaris* Medikus) Under Multiple Stress Conditions. *Preprints*. <https://doi.org/10.20944/preprints202503.0018.v1>
- Cokkizgin, A., & Shtaya, M. J. (2013). Lentil: Origin, cultivation techniques, utilization and advances in transformation. *Agricultural Science*, 1(1), 55-62. <https://doi.org/10.12735/as.v1i1p55>
- Dehghani, H., Sabaghpour, S. H., & Sabaghnia, N. (2008). Genotype $\times$ 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>
- Farshadfar, E. (2008). Incorporation of AMMI stability value and grain yield in a single non-parametric index (GSI) in bread wheat. *Pakistan Journal of Biological Science*, 11, 1791-1796. <https://doi.org/10.3923/pjbs.2008.1791.1796>
- Gauch, H. G., & Zobel, R. W. (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>
- Gauch Jr, H. G. (1988). Model selection and validation for yield trials with interaction. *Biometrics*, 705-715.
- Gauch Jr, H. G. (1992). AMMI analysis on yield trials. CIMMYT Wheat Special Report (CIMMYT), (8).
- Gupta, D., Dadu, R. H. R., Sambasivam, P., Bar, I., Singh, M., beera, N., & Biju, S. (2019). Toward climate-resilient lentils: challenges and opportunities. *Genomic Designing of Climate-Smart Pulse Crops*, 165-234. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-96932-94>
- Gupta, S., Das, S., Dikshit, H. K., Mishra, G. P., Aski, M. S., Bansal, R., ... & Kumar, S. (2021). Genotype by environment interaction effect on grain iron and zinc concentration of indian and mediterranean lentil genotypes. *Agronomy*, 11(9), 1761. <https://doi.org/10.3390/agronomy11091761>
- Hajivand, A., Asghari, A., Karimizadeh, R., Mohammaddoust-Chamanabad, H.R., & Zeinalzadeh-Tabrizi, H. (2020). Stability analysis of seed yield of advanced chickpea (*Cicer arietinum* L.) genotypes under tropical and subtropical rainfed regions of Iran. *Applied Ecology & Environmental Research*, 18(2). doi:10.15666/aeer/1802_26212636
- Hossain, M. A., Sarker, U., Azam, M. G., Kobir, M. S., Roychowdhury, R., Ercisli, 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>
- 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.
- Karimizadeh, R., & Mohammadi, M. (2010). AMMI adjustment for rainfed lentil yield trials in Iran. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 16(1), 66-73.
- Karimizadeh, R., Pezeshkpour, P., Mehraban, A., Sharifi, P., & Barzali, M. (2021). Grain yield stability analysis of lentil genotypes by AMMI method indices. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 52(4), 197-209. <https://doi.org/10.22059/ijfcs.2020.310524.654752>. [In Persian]
- Kumar, S., Barpete, S., Kumar, J., Gupta, P., & Sarker, A. (2013). Global lentil production: constraints and strategies. *SATSA Mukhapatra-Annual Technical*, 17, 1-13.
- Lin, C. S., & Binns, M. R. (1988). A superiority measure of cultivar performance for cultivar $\times$ location data. *Canadian Journal of Plant Science*, 68(1), 193-198. <https://doi.org/10.4141/cjps88-018>
- Moghdam, A. (2003). Simultaneous selection for yield and stability and its comparison with different stability statistics. *Seed and Plant Journal*, 19(1), 1-13. 10.22092/SPIJ.2017.110935. [In Persian]
- Olivoto, T., & Lúcio, A. D. C. (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., Lúcio, A. D. C., da Silva, J. A. G., Marchioro, V. S., de Souza, V. Q., & Jost, E. (2019). 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>.
- Parihar, A. K., Gupta, S., Hazra, K. K., Lamichaney, A., Sen Gupta, D., Singh, D., ... & Das, S. (2022). Multi-location evaluation of mungbean (*Vigna radiata* L.) in Indian climates: Ecophenological dynamics, yield relation, and characterization of locations. *Frontiers in Plant Science*, 13, 984912. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.984912>
- Pezeshkpour, P., Amiri, R., Karami, I., & Mirzaei, A. (2024). Grain Yield Stability Analysis of Lentil Genotypes by AMMI Indices. *Journal of Crop Breeding*, 16(4), 1-12. <https://doi.org/10.61186/jcb.16.4.1>. [In Persian]
- 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). *Journal of Crop Breeding*, 16(2), 42-52. <https://doi.org/10.61186/jcb.16.2.42>. [In Persian]
- Pezeshkpour, P., Naseri, B., Amiri, R., Mirzaei, A., Shobeiri, S. S., & Karami, I. (2025). Evaluation of Mean Performance and Stability of Lentil Genotypes According to Combination of Additive Main Effects and Multiplicative Interaction, and Best Linear Unbiased Prediction Methods. *Legume Science*, 7(1). <https://doi.org/e70021>. <https://doi.org/>
- Purchase, J. L., Hatting, H., & Van Deventer, C. S. (2000). Genotype $\times$ environment interaction of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) in South Africa: II. Stability analysis of yield performance. *South African Journal of Plant and Soil*, 17(3), 101-107. <https://doi.org/10.1080/02571862.2000.10634878>
- Shobeiri, S. S., Pezeshkpour, P., & Sadeghzadeh Ahari, D. (2023). Non-Parametric Stability Analysis of Yield in Lentil Genotypes. *Journal of Crop Production*, 16(3), 49-68. <https://doi.org/10.22069/ejcp.2024.20804.2551>. [In Persian]
- Sneller, C. H., Kilgore-Norquest, L., & Dombek, D. (1997). Repeatability of yield stability statistics in soybean. *Crop Science*, 37(2), 383-390. <https://doi.org/10.2135/cropsci1997.0011183X003700020013x>
- Srivastava, R. P., & Vasishtha, H. (2012). Saponins and lectins of Indian chickpeas (*Cicer arietinum*) and lentils (*Lens culinaris*). *Indian Journal of Agricultural Biochemistry*, 25(1), 44-47.
- Tadesse, T., Tekalign, A., & Asmare, B. (2021). Identification of stable lentil genotypes using AMMI analysis for the highlands of bale, Southeastern Ethiopia. *Chemical and Biomolecular Engineering*, 19(6), 4. <https://doi.org/10.11648/j.cbe.20210604.12>
- Türk, Z., & Kendal, E. (2017). The practice of AMMI and GGE biplot analysis of lentil genotypes assessment in multi-environment trials. *Philippine Journal of Crop Science*, 42(3), 39-48.
- Wright, K., & Laffont, J. L. (2018). *R package for GGE biplot*. Github Company, Newyork, USA.
- Yan, W., Kang, M. S., Ma, B., Woods, S., & Cornelius, P. L. (2007). GGE biplot vs. AMMI analysis of genotype-by-environment data. *Crop Science*, 47(2), 643-653. <https://doi.org/10.2135/cropsci2006.06.0374>
- Zali, H., Farshadfar, E., Sabaghpour, S. H., & Karimizadeh, R. (2012). Evaluation of genotype $\times$ environment interaction in chickpea using measures of stability from AMMI model. *Annals of Biological Research*, 3(7), 3126-3136.
- Zobel, R. W., Wright, A. J., & Gauch, H. G. (1988). Statistical analysis of a yield trial. *Agronomy Journal*, 80(3), 388-393. <https://doi.org/10.2134/agronj1988.00021962008000030002x>