

Analyzing chickpea grain yield stability using AMMI indices and biplots in dryland conditions

Payam Pezeshkpour ^{*a}, Reza Amiri ^a, Adel Jahangiri ^b

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

^b Dryland Agricultural Research Institute, Sararood Branch, Agricultural Research, Education and Extension (AREEO), Kermanshah, Iran

*Corresponding Author: Papezeshkpour@yahoo.com

Received: 28 February 2025

Accepted: 3 June 2025

DOI: 10.22034/CSRAR.2025.509345.1471

How to cite this article:

Pezeshkpour, P., Amiri, R. and Jahangiri, A., 2026. Analyzing chickpea grain yield stability using AMMI indices and biplots in dryland conditions. *Crop Science Research in Arid Regions*, 8(1), 47-63. <https://doi.org/10.22034/csrar.2025.509345.1471>

Abstract

Introduction: Environmental factors significantly influence crop yield and other quantitative traits, posing a challenge for scaling up agricultural production. Additionally, climate change and the variability of environmental conditions in experimental settings necessitate the development of resilient cultivars capable of adapting to unpredictable changes. To effectively identify the best-performing cultivars for specific environments, conducting multi-environment trials is essential. This process requires evaluating genotype-by-environment interactions (GEI) to select cultivars with optimal stability and performance. This study aimed to develop high-yielding chickpea cultivars adapted to the tropical and subtropical rainfed regions of Iran, utilizing indicators derived from the AMMI (Additive Main Effects and Multiplicative Interaction) analysis method.

Material and Methods: In this study, 13 chickpea genotypes along with two check genotypes (cultivar “Mansour” and local landrace “Bivanij”) were grown for three cropping years (2019-2022) in a three-replicated randomized block design at Sarab-Changaie Agricultural Research Station, Khorramabad, Lorestan. The experimental plots consisted of four four-meter planting lines with a row spacing of 30 cm and a density of 60 seeds per square meter. The annual rainfall in the first, second, and third cropping years was 523.6, 304.9, and 0.307 mm, respectively. Stability analysis was performed using the AMMI multivariate method. For statistical analyses, the multi-environment trial analysis package (Metan) and GGE were used in the R software environment.

Results and Discussion: In this study, the contribution of environment, genotype, and genotype × environment interaction to the total sum of squares was 79.18, 6.93, and 4.81 percent, respectively. AMMI analysis of variance showed that the effects of the environment, genotype, and their interaction, as well as the first two main components, were significant. Genotype 12 (FLIP07-125C) had the highest grain yield with 1602 kg/ha. The ASV index selected genotypes 14, 6, and 1, the SIPC and EV indices selected genotypes 14 and 1, and the ZA and WAAS indices selected genotypes 14, 1, and 6 as the most stable genotypes. Based on the ssiASV index, genotypes 1, 10, 8, and 12, based on the ssiSIPC and ssiZA indices, genotypes 1, 10, 8, and 14, and based on the ssiEV and ssiWAAS indices,



genotypes 1, 10, and 8 were the best genotypes in terms of grain yield and stability. Based on the AMMI1 biplot, genotypes 10, 1, and 8 with grain yield higher than the total average yield and the lowest IPCA1 values were identified as stable genotypes with high general compatibility. According to this biplot, the second and third environments (E2 and E3) had the lowest IPCA1 content and the lowest genotype $\times$ environment interaction, and therefore, these environments had better yield stability. The first and third environments (E1 and E3) had higher grain yield than the overall average. In the AMMI2 biplot, genotypes 12, 10, 5, 11, 8, and 1, in addition to high general stability, had grain yield higher than the total average. Using the AMMI distance parameter, genotypes 14, 1, and 2 were identified as genotypes with stable performance. Based on the ssiDist index, genotypes 10, 1, and 14 were the best. The most stable genotypes based on the Lin and Binns superiority index were genotypes 12, 10, 5, and 8.

Conclusion: Since all significant principal components with different weights are used in calculating the WAAS index, this index better reflects yield stability, and the genotypes selected with this index have more reliable stability. In this regard, this method can be further investigated and used in future research. In general, based on different indices, genotypes 12 (FLIP07-125C), 1 (FLIP09-319C), 10 (X010TH163K2), and 8 (X010TH121K1) had favorable stability and could be a suitable option for further research.

Keywords: Adaptability, Biplot, Priority index, Rainfed, Simultaneous selection index

استفاده از شاخص‌ها و نمودارهای روش AMMI برای تجزیه پایداری عملکرد دانه نخود در شرایط دیم

پیام پزشکیپور^{۱*}، رضا امیری^۱، عادل جهانگیری^۲

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

* مسئول مکاتبه: Papezeshkpour@yahoo.com

DOI: 10.22034/CSRAR.2025.509345.1471

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۱۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۱۰

چکیده

عدم وجود شرایط محیطی ثابت در محیط‌های آزمایشی، به‌نژادگران را ملزم به ایجاد ارقامی می‌نماید که آماده رویارویی با تغییرات اقلیمی باشند. این تحقیق با هدف شناسایی ژنوتیپ‌های پرمحصول نخود سازگار با شرایط منطقه نیمه‌گرمسیری دیم خرم‌آباد با استفاده از شاخص‌های مبتنی بر روش AMMI انجام شد. تعداد ژنوتیپ امیدبخش نخود به‌همراه رقم شاهد منصور و توده محلی بیونج، به‌مدت سه سال زراعی و تحت شرایط دیم در ایستگاه تحقیقات کشاورزی سراب چنگائی (لرستان) کشت شدند. تجزیه واریانس AMMI نشان داد که اثرات محیط، ژنوتیپ و برهم‌کنش ژنوتیپ× محیط معنی‌دار بودند. ژنوتیپ ۱۲ (FLIP07-125C) با ۱۶۰۲ کیلوگرم در هکتار، بیشترین عملکرد دانه را به‌خود اختصاص داد. شاخص ASV ژنوتیپ‌های ۱۴، ۶ و ۱، شاخص‌های SIPC و EV ژنوتیپ‌های ۱۴، ۱ و شاخص‌های ZA و WAAS ژنوتیپ‌های ۱۴، ۱ و ۶ را به‌عنوان پایدارترین ژنوتیپ‌ها انتخاب کردند. براساس شاخص ssiASV، ژنوتیپ‌های ۱، ۱۰، ۸ و ۱۲، براساس شاخص‌های ssiSIPC و ssiZA ژنوتیپ‌های ۱، ۱۰، ۸ و ۱۴ و براساس شاخص‌های ssiEV و ssiWAAS ژنوتیپ‌های ۱، ۱۰ و ۸ برترین ژنوتیپ‌ها از نظر عملکرد دانه و پایداری بودند. براساس بای‌پلات AMMI1 ژنوتیپ‌های ۱، ۱۰ و ۸ به‌عنوان ژنوتیپ‌های پایدار با سازگاری عمومی بالا شناسایی شدند. در بای‌پلات AMMI2، ژنوتیپ‌های ۱۲، ۱۰، ۵، ۱۱، ۸ و ۱، علاوه‌بر پایداری عمومی بالا، دارای عملکرد دانه بالاتر از میانگین کل بودند. در مجموع و براساس شاخص‌های مختلف، ژنوتیپ‌های شماره ۱۲، ۱، ۱۰ و ۸ دارای پایداری مطلوبی بودند و می‌توانند نامزد برای تحقیقات بعدی باشند.

واژه‌های کلیدی: بای‌پلات، سازگاری، شاخص انتخاب همزمان، شاخص برتری، دیم

مقدمه

بعد از گندم و جو، رتبه سوم تولید در بین محصولات زراعی دیم در کشور را به‌خود اختصاص داده است. استان‌های کرمانشاه، لرستان، کردستان، آذربایجان غربی و همدان در رتبه‌های اول تا پنجم تولیدکنندگان نخود دیم کشور قرار دارند. این پنج استان جمعاً در حدود ۸۸/۷۵ درصد از کل تولید نخود دیم کشور را تشکیل می‌دهند (Ministry of Agriculture Jihad, 2023). پژوهشگران در به‌نژادی گیاهان زراعی به‌دنبال تلفیق پایداری با عملکرد دانه بالا برای دستیابی به ژنوتیپ‌های پایدار و دارای عملکرد بالا هستند. یکی از دلایل محدودیت در گسترش نخود، کاشت‌پذیر توده‌ها و ارقام محلی می‌باشد که دارای پایداری ضعیف در شرایط مختلف محیطی هستند (Jahangiri et al., 2015). عملکرد دانه صفت کمی پیچیده‌ای است که توسط تعداد زیادی ژن کنترل می‌گردد و شدیداً تحت تأثیر محیط

نخود (*Cicer arietinum* L.)، یکی از گیاهان گروه حبوبات، نقش مهمی در تأمین نیازهای غذایی انسان دارد که به‌صورت دیم در مناطق غرب آسیا و شمال آفریقا کشت می‌شود و با استفاده از رطوبت ذخیره شده در خاک، چرخه زیستی خود را تکمیل می‌کند. از عوامل عمده کاهش عملکرد آن می‌توان از توزیع نامناسب بارندگی و کاهش بارندگی یاد کرد. نخود سومین گیاه مهم از گروه حبوبات در جهان و مهم‌ترین آن‌ها در ایران است. سطح زیر کشت نخود در کشور در سال زراعی ۱۴۰۲-۱۴۰۱ حدود ۴۱۶ هزار هکتار بود که از این سطح، حدود ۲۴۲ هزار تن نخود برداشت شد (Ministry of Agriculture Jihad, 2023). نخود با تولید حدود ۲۳۳ هزار تن و اختصاص ۲/۸۳ درصد از کل میزان تولید محصولات زراعی دیم کشور،

(سال یا مکان) قرار دارد و همچنین صفات بسیاری به تنهایی یا با هم، بر آن اثر می گذارند. بنابراین، انتخاب ژنوتیپ های 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).

تجزیه پایداری برای شناسایی ژنوتیپ هایی به کار می رود که کمتر تحت تأثیر تغییرات محیطی قرار بگیرند و برای طیف وسیعی از محیط ها توصیه شوند (Liang et al., 2015). پدیده برهم کنش ژنوتیپ × محیط از ارزش ویژه ای نزد دانشمندان علوم ژنتیک و به نژادی گیاهان زراعی برخوردار است و آگاهی از آن، به نژادگران گیاهی را کمک می کند تا ارزیابی ژنوتیپ ها را با دقت بیشتری انجام داده و بهترین ژنوتیپ ها را شناسایی کنند (Sharifi et al., 2017). روش های زیادی برای تجزیه برهم کنش ژنوتیپ × محیط و ارزیابی پایداری ژنوتیپ ها ارائه شده است که یکی از آن ها، روش چندمتغیره اثرات اصلی جمع پذیر و اثرات متقابل ضرب پذیر (AMMI) است که در آن، ابتدا تجزیه واریانس معمولی روی داده های دوطرفه عملکرد ژنوتیپ ها در محیط های مختلف انجام می شود و سپس با روش تجزیه به مؤلفه های اصلی (PCA)، برهم کنش ژنوتیپ در محیط تحلیل و بررسی می شود و مؤلفه های اصلی (PC) ^۲ و سهم هر کدام از آن ها در برهم کنش ژنوتیپ × محیط محاسبه می شوند (Olivoto et al., 2019a). انجام پژوهش هایی برای دستیابی به ارقام جدید نخود که در مقایسه با ارقام موجود دارای پتانسیل عملکرد بیشتر، سازگاری گسترده تر و پایداری عملکرد بالاتری باشند، از اهمیت زیادی برخوردار است. اصولاً یک رقم جدید زراعی، علاوه بر اینکه باید عملکرد بالا و سایر صفات زراعی برتری از خود نشان دهند، باید پایدار بودن آن در دامنه وسیعی از شرایط محیطی نیز اثبات گردد. بنابراین، یکی از جنبه های مهم در ارزیابی ژنوتیپ های پیشرفته و امیدبخش، افزون بر عملکرد و ویژگی های دیگری همچون مقاومت به آفات و بیماری ها، پایداری صفات بررسی شده در آزمایش های چند

محیطی است که بیانگر نوسان لندک عملکرد در مکان ها یا سال های مختلف است (Liang et al., 2015).

در ارزیابی ۱۴ لاین و رقم نخود در چهار ایستگاه تحقیقاتی و به مدت سه سال زراعی در شرایط دیم، اثرات معنی دار محیط، ژنوتیپ و برهم کنش ژنوتیپ در محیط بر عملکرد دانه نشان داده شد (Kanouni et al., 2016).

در تحقیقی دیگر، اثر معنی دار ژنوتیپ، محیط و برهم کنش ژنوتیپ در محیط و سه مؤلفه اصلی اول در برهم کنش ژنوتیپ در محیط در نخود گزارش شد (Erdemci, 2018). نتایج ارزیابی ۱۷ ژنوتیپ نخود در ۱۶ محیط نشان داد که دو مؤلفه اصلی اول و دوم به ترتیب ۴۷/۴۹ و ۲۵/۲۵ درصد از برهم کنش ژنوتیپ در محیط را توجیه نموده و با توجه به معنی دار بودن پنج مؤلفه اصلی اول، از شاخص های SIPC^۳، و ASV^۴ برای ارزیابی پایداری ژنوتیپ های نخود بهره گرفته شد (Danyali et al., 2012). مطالعه ۱۵ ژنوتیپ نخود در ۱۲ محیط، اثر معنی دار پنج مؤلفه اصلی اول را در برهم کنش ژنوتیپ در محیط نشان داد و با پارامترهای ASV، SUI^۵ و GSI^۶ ژنوتیپ های پایدار را شناسایی شد (Pouresmael et al., 2018). در پژوهشی دیگر، با بررسی ۱۷ ژنوتیپ نخود در ۱۰ محیط (ترکیب سال و مکان) گزارش شد که چهار مؤلفه اصلی اول با اثر معنی دار، حدود ۹۴ درصد از برهم کنش ژنوتیپ در محیط را توجیه کرد (Zali et al., 2012). آن ها از شاخص های SIPC، EV^۷، MASV^۸، Dz^۹، AVAMGE^{۱۰}، (AMMI) Wi^{۱۱}، FAi^{۱۲}، ASV^{۱۳}، Da^{۱۴} و Bi^{۱۳} برای ارزیابی پایداری ژنوتیپ ها استفاده کردند. نتایج ارزیابی ۱۴ ژنوتیپ نخود در چهار مکان و سه سال زراعی حاکی از این بود که سهم محیط، ژنوتیپ و برهم کنش ژنوتیپ در محیط بر مجموع مربعات کل به ترتیب ۸۲/۲، ۴/۶ و ۱۳/۱ درصد است (Kanouni et al., 2015). آن ها همچنین نشان دادند که چهار مؤلفه اصلی اول با اثر معنی دار، ۸۶/۸ درصد از تغییرات برهم کنش ژنوتیپ در محیط را توجیه می کردند و با استفاده از بای پلات های AMMI

⁹ Zhang's D Parameter

¹⁰ Sum across environments of absolute value of GEI modelled by AMMI

¹¹ Stability measure based on fitted AMMI model

¹² Annicchiarico's D parameter

¹³ Regression coefficient

¹⁴ Absolute value of the relative contribution of IPCs to the interaction

¹ Additive Main effect and Multiplicative

² - Principle Components

³ Sum of IPCs scores (SIPC)

⁴ AMMI stability value (ASV)

⁵ Sustainability Index

⁶ Genotype Selection Index

⁷ Eigenvalue (EV) stability parameters of AMMI

⁸ Modified AMMI stability value

۱۳۹۷ گزینش شده بودند، در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار در ایستگاه تحقیقات کشاورزی سراب چنگائی خرم‌آباد به مدت سه سال زراعی (۱۳۹۸-۱۴۰۱) مورد ارزیابی قرار گرفتند. کرت‌های آزمایش شامل چهار خط کاشت چهار متری با فاصله ردیف ۳۰ سانتی‌متر و تراکم ۶۰ دانه در مترمربع بودند. میزان بارندگی سالانه در سال‌های زراعی ۱۳۹۹-۱۴۰۰ (محیط E1)، ۱۳۹۹-۱۴۰۰ (محیط E2) و ۱۴۰۰-۱۴۰۱ (محیط E3) به ترتیب برابر ۵۲۳/۶، ۳۰۴/۹ و ۳۰۷/۰ میلی‌متر بود، و میانگین دمای سالیانه در طول دوره رشد گیاه نخود در سال‌های اول تا سوم به ترتیب ۱۵/۵۵، ۱۶/۵۳ و ۱۴/۶۵ درجه سانتی‌گراد بود.

مبارزه با علف‌های هرز، با استفاده از کولتیواتور دستی در دو مرحله در طول دوره رشد رویشی انجام شد. در مرحله رسیدگی فیزیولوژیک، دو خط کناری و نیم‌متر از ابتدا و انتهای دو خط وسط حذف و محصول از مابقی هر کرت (۱/۸ مترمربع) برداشت شد و پس از خرمن‌کوبی، دانه‌های حاصل توزین و به‌عنوان عملکرد دانه در واحد سطح تبدیل و در نظر گرفته شد.

برای تجزیه‌های آماری، بسته تجزیه آزمایش‌های چند محیطی با نام Metan Ver.1.9.0^۱ (Olivoto et al., 2019b) و GGE (Wright and Laffont, 2018) در محیط نرم‌افزار R به‌کار گرفته شد. در این پژوهش از پارامترهای تجزیه AMMI استفاده شد که روابط آن در جدول ۲ نشان داده شده‌اند.

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) به‌دست می‌آید. ارزیابی ژنوتیپ‌ها با این شاخص، فقط براساس دو مؤلفه اصلی اول انجام می‌شود. در رابطه ۲، $\lambda_n^{0.5}$ ریشه IPC در محور nام است. در این رابطه، برای SIPC1، N برابر با یک و برای SIPC2، N برابر با تعداد IPCهایی است که در مدل باقی‌مانده است. در رابطه‌های ۳ و ۴، γ_{in} ریشه مشخصه برای محور nام و N (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 به‌وسیله nمین محور IPC است. ارزیابی ژنوتیپ‌ها با رابطه‌های ۲ تا ۴ بر پایه تمام مؤلفه‌های اصلی

و شاخص ASV ژنوتیپ‌های پایدار را شناسایی کردند. در سنجش ۱۹ ژنوتیپ نخود با روش‌های پارامتری، پایداری در چهار محیط و دو سال زراعی، اثر معنی‌دار محیط و برهم‌کنش ژنوتیپ در محیط مشاهده شد (Kizilgeci, 2018). اثر معنی‌دار مکان، سال × مکان، ژنوتیپ، ژنوتیپ در مکان و ژنوتیپ × مکان × سال را در نخود گزارش شده و با روش بای‌پلات، ژنوتیپ‌های پایدار شناسایی گردید (Hajivand et al., 2020). در مطالعات دیگر نیز پس از مشاهده اثر معنی‌دار ژنوتیپ، محیط و برهم‌کنش ژنوتیپ در محیط، با روش‌های پارامتری ژنوتیپ‌های پایدار نخود شناسایی شده است (Hasan et al., 2020; Azam et al., 2020; and Deb, 2017). هدف از انجام این پژوهش، دستیابی به ارقام نخود پر محصول و سازگار با شرایط آب‌وهوایی مناطق دیم گرمسیری و نیمه‌گرمسیری کشور با استفاده از شاخص‌های مبتنی بر روش تجزیه AMMI بود.

مواد و روش‌ها

برای انجام این پژوهش، در هر سال پیش از کشت، زمینی که در سال پیش از آن آیش بود، با گاواهن چیزل مرکب شخم زده شد و سپس با استفاده از دیسک، عملیات کلوخ شکنی انجام شد. در ابتدای سال نخست و پیش از کاشت آزمایش، به‌منظور ارزیابی خصوصیات اولیه خاک، از لایه سطحی (عمق ۰ تا ۳۰ سانتی‌متر) نمونه‌برداری صورت گرفت. نتایج آنالیز خاک نشان داد که مقدار کربن آلی ۱/۰۵ درصد، پتاسیم قابل جذب ۳۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم، فسفر قابل جذب ۷/۶ میلی‌گرم در کیلوگرم، نیتروژن کل ۰/۱۴ درصد و هدایت الکتریکی عصاره اشباع ۰/۵۸ دسی‌زیمنس بر متر بوده است. همچنین بافت خاک منطقه آزمایشی در رده سیلتی-رسی-لومی طبقه‌بندی شد.

طبق عرف منطقه و براساس توصیه بخش خاک مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی لرستان، کود شیمیایی بر مبنای ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار فسفات آمونیوم و ۳۵ کیلوگرم در هکتار اوره، به هنگام عملیات تهیه زمین، به‌طور یکنواخت با خاک مخلوط شد. تعداد ۱۳ ژنوتیپ پیشرفته نخود به‌همراه ارقام شاهد منصور و توده محلی بیونج (جدول ۱) که از آزمایش‌های پیشرفته مقایسه عملکرد سال زراعی ۱۳۹۸-

¹ Multi environment trial analysis

باقی مانده در مدل انجام می شود و از این رو، می تواند نسبت به شاخص ASV دارای برتری باشند. چهار شاخص بالا، برای شناسایی ژنوتیپ های پایدار، بدون در نظر گرفتن عملکرد دانه به کار گرفته می شوند و براساس آن، ژنوتیپ های دارای کمترین میزان این شاخص ها، پایدار در نظر گرفته می شوند. در رابطه ۵،

WAAS_i میانگین وزنی نمرات مطلق (WAAS) ژنوتیپ λ_m ؛ IPCA_{in}، نمره ژنوتیپ λ_m در λ_n امین محور مؤلفه اصلی برهم کنش (IPCA)؛ و EP_n، مقدار واریانس توجیه شده توسط λ_n امین IPCA است. ژنوتیپ با کمترین مقدار WAAS، پایدار در نظر گرفته می شود (Olivoto et al., 2019a).

جدول ۱- اسامی ارقام و ژنوتیپ های امیدبخش نخود مورد استفاده در آزمایش

Table 1- Names of promising chickpea cultivars and genotypes used in the experiment

کد	نام	منشاء
Code	Name	Origin
G1	FLIP09-319C	ICARDA
G2	FLIP09-331C	ICARDA
G3	FLIP09-402C	ICARDA
G4	X010TH72K2	IRAN
G5	X010TH72K3	IRAN
G6	X010TH104K1	IRAN
G7	X010TH115K1	IRAN
G8	X010TH121K1	IRAN
G9	X010TH123K1	IRAN
G10	X010TH163K2	IRAN
G11	Hashem/FLIP0078CIDKER-2010-SKER-OKERK2	IRAN
G12	FLIP07-125C	ICARDA
G13	FLIP97-149C	IRAN
G14	MANSOR	IRAN
G15	BIVANJ	IRAN

جدول ۲- شاخص های تجزیه پایداری

Table 2- Stability analysis indices

کد	شاخص	رابطه	منبع
Code	Index	Formula	References
1	AMMI stability value (ASV)	$ASV = \sqrt{\left \frac{SSIPC1}{SSIPC2} \right (IPC1)^2 + (IPC2)^2}$	Purchase et al., 2000
2	Sum of IPCs scores (SIPC)	$SIPC = \sum_{n=1}^N \lambda_n^{0.5} \gamma_{in}$	Sneller et al., 1997
3	Eigenvalue (EV) stability parameters of AMMI	$EV = \sum_{n=1}^N \gamma_{in}^2 / n$	
4	Absolute value of the relative contribution of IPCs to the interaction (Za)	$Za_i = \sum_{n=1}^N \theta_n \gamma_{in} $	Zali et al., 2012
5	Weighted average of absolute scores (WASS)	$WAASB_i = \frac{\sum_{n=1}^N IPCA_{in} \times EP_n }{\sum_{n=1}^N EP_n}$	Olivoto et al., 2019a
6	Simultaneous selection index (SSI)	$SSI = R(\text{AMMI Stability Indices})$	Pezeshkpour et al., 2021
7	Superiority index (Pi)	$P_i = \frac{\sum_{j=1}^n (X_{ij} - M_j)^2}{2n}$	Lin and Binns, 1988

i=1, ..., 15 (تعداد ژنوتیپ ها)؛ n=1, ..., p (تعداد مؤلفه های اصلی)

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

عملکرد دانه توجه شده است. نمودارهای بای پلات نوع اول IPCA1 vs AMMI1 (IPCA1 vs grain yield) و نوع دوم (IPCA1 vs AMMI2 (IPCA2 با روش استاندارد توضیح داده شده توسط محققان ترسیم شدند (Zobel et al., 1988). برای محاسبه شاخص برتری از رابطه ۷ (جدول ۲) استفاده شد (Lin and Binns, 1988). در آن، P_i ، برتری ژنوتیپ λ_m ؛ X_{ij} ، عملکرد

در رابطه ۶، R(AMMI stability Indices) برابر است با رتبه ژنوتیپ ها بر پایه هر کدام از شاخص های پایداری AMMI و RY، با رتبه میانگین عملکرد دانه ژنوتیپ ها در تمام محیط ها برابر است. کاربرد این شاخص برای شناسایی ژنوتیپ های برتر از نظر عملکرد دانه و پایداری عملکرد دانه است که در گزینش ژنوتیپ ها به هر دو شاخص میانگین عملکرد دانه و پایداری

ژنوتیپ نام در محیط زام؛ Mj، حداکثر پاسخ به دست آمده در میان همه ارقام در محیط زام و n تعداد محیط‌ها است.

نتایج و بحث

تجزیه واریانس جداگانه در هر کدام از محیط‌ها نشان داد که اثر ژنوتیپ در سه محیط (سال) مطالعه شده معنی‌دار بود (نتایج ارائه نشده‌اند). بنابراین ژنوتیپ‌ها در محیط‌های (سال‌های) آزمایشی دارای تنوع کافی بودند و برای ارزیابی برهم‌کنش ژنوتیپ × محیط نیاز به تجزیه‌های پایداری بود. در این پژوهش اثر محیط (سال) بیشترین سهم را در توجیه مجموع مربعات کل به خود اختصاص داد، که این موضوع نشان‌دهنده دامنه وسیع‌تر اثرات اصلی محیط (سال) نسبت به اثرات اصلی ژنوتیپ بود. ابتدا تجزیه واریانس ساده (داده‌ها نشان داده نشده است) برای هر محیط انجام و آزمون بارتلت برای بررسی همگن بودن واریانس‌های خطای آزمایش‌ها نیز انجام شد. با انجام آزمون بارتلت روی داده‌های سه محیط، فرض همگنی واریانس خطاهای آزمایش مورد تأیید قرار گرفت ($\chi^2 = 159/3^{ns}$).

تجزیه واریانس نشان داد که اثرات محیط (سال)، ژنوتیپ و برهم‌کنش ژنوتیپ × محیط (سال) در سطح احتمال یک درصد بر عملکرد دانه ژنوتیپ‌های مطالعه شده معنی‌دار بود (جدول ۳). با توجه به معنی‌دار بودن برهم‌کنش ژنوتیپ × محیط (سال)، امکان تجزیه پایداری روی این داده‌ها وجود دارد. از این رو تجزیه پایداری به روش AMMI انجام شد. برای انجام تجزیه AMMI، ابتدا ماتریس Z یا ماتریس انحراف حاصل از اثرات جمع‌پذیر 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 (سال)، به ترتیب ۶۹/۵ و ۳۰/۵ درصد از تغییرات برهم‌کنش ژنوتیپ × محیط (سال) را توجیه کردند (جدول ۴). در تطابق با این نتیجه، پژوهشگران دیگری نیز سهم ۴۳/۰۹ و ۲۳/۳۴ درصدی (Kanouni et al., 2016) و ۴۷/۴۹ و ۲۵/۲۵ درصدی (Danyali et al., 2012) دو مؤلفه اصلی اول و دوم را در برهم‌کنش ژنوتیپ × محیط در ارزیابی ژنوتیپ‌های نخود نشان دادند. این نتایج همچنین نشان داد که اثر دو مؤلفه اصلی اول، معنی‌دار بود و در مجموع ۱۰۰ درصد از

تغییرات برهم‌کنش ژنوتیپ در محیط را توجیه کردند. سهم محیط، ژنوتیپ و برهم‌کنش ژنوتیپ × محیط در مجموع مربعات کل، به ترتیب ۷۹/۱۸، ۶/۹۳ و ۴/۸۱ درصد بود (جدول ۴). در تطابق با این نتیجه، در پژوهشی دیگر نیز سهم بیشتر اثر محیط در مجموع مربعات کل برای عملکرد دانه ژنوتیپ‌های نخود گزارش شده است (Azam et al., 2020).

اثر معنی‌دار ژنوتیپ، تفاوت عملکرد ژنوتیپ‌ها را نشان می‌دهد، که در تجزیه‌های جداگانه نیز، چنین نتایجی دیده شده بود و بیانگر پیش‌زمینه ژنتیکی مواد آزمایشی و تنوع سال‌های زراعی است. اثر معنی‌دار برهم‌کنش ژنوتیپ × محیط (سال)، عملکرد متفاوت ژنوتیپ‌ها را در محیط‌های (سال‌های) مختلف نشان می‌دهد. بنابراین با توجه به وابستگی تنوع عملکرد دانه ژنوتیپ‌های نخود به محیط، نیاز به انجام تجزیه‌های بیشتر برای افزایش بازده گزینش ژنوتیپ‌ها است. به عبارت دیگر، وجود برهم‌کنش ژنوتیپ × محیط، نیازمند به تشخیص عملکرد و سازگاری ژنوتیپ‌ها براساس ارزیابی‌ها در چندین مکان و سال زراعی است. کاهش برهم‌کنش ژنوتیپ × محیط متضمن گزینش ژنوتیپ‌هایی با بالاترین پایداری در طیف گسترده‌ای از محیط‌ها (سال‌ها) است. از آن‌جا که برهم‌کنش ژنوتیپ در محیط می‌تواند هرگونه پیشرفت برآمده از گزینش را کاهش دهد، بنابراین در گزینش ارقام، تلفیق پایداری با عملکرد می‌تواند نتایج خوبی را در پی داشته باشد.

اثر معنی‌دار محیط، نشانه‌ای از تأثیر متفاوت سال‌های زراعی بر عملکرد است؛ حال آن‌که، اثر معنی‌دار برهم‌کنش ژنوتیپ × محیط (سال) بیانگر نوسان عملکرد ژنوتیپ‌ها در محیط‌های (سال‌های) آزمایشی است که می‌تواند برآمده از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، طول و عرض جغرافیایی، دگرگونی‌های آب‌وهوایی و ... باشد (Hajivand et al., 2020). سهم بیشتر اثر محیط (سال) در توجیه مجموع مربعات کل، نشان‌دهنده دامنه گسترده‌تر اثرات اصلی محیط (سال) و به بیانی دیگر تفاوت بین محیط‌ها (سال‌ها) بود، که دلیل این تفاوت می‌تواند ناشی از میزان و پراکنش بارندگی در طول سال‌ها و همچنین تفاوت در توزیع ماهانه بارندگی در دوره‌های مختلف رشدی گیاه باشد.

بنابراین با توجه به نوسان عملکرد ژنوتیپ‌ها در محیط‌های (سال‌های) مختلف و برهم‌کنش معنی‌دار بین محیط (سال) و

بست. با توجه به دریافت لاین‌های پیشرفته از یک برنامه به‌نژادی در مرکز بین‌المللی پژوهش کشاورزی در مناطق خشک (ICARDA)، این ژنوتیپ‌ها در آزمایش‌های چندمحیطی در مقایسه با محیط و برهم‌کنش ژنوتیپ× محیط نقش کمتری در توجیه تنوع کل داشتند.

ژنوتیپ، نتیجه‌گیری و انتخاب ژنوتیپ‌های برتر براساس نتایج تجزیه مرکب و مقایسه میانگین عملکرد دانه کافی نیست و باید برای تعیین اندازه پایداری عملکرد دانه ژنوتیپ‌ها و افزایش بازده گزینش ژنوتیپ‌ها و شناسایی ژنوتیپ‌های پایدار یا سازگار به سال‌های مختلف، روش‌های مختلف تجزیه پایداری را به‌کار

جدول ۳ - نتایج تجزیه واریانس مرکب برای عملکرد دانه

Table 3- Combined analysis of variance for grain yield

منابع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	مقدار F	سطح معنی‌داری
S.O.V	df	Sum of Squares	Mean of Squares	F Value	Pr (>F)
محیط (سال)	2	49279420	24639710	256.2349	1.55E-06
ENV (YEAR)					
خطای محیط (سال)	6	576964	96161	3.8851	0.001798
REP(ENV)					
ژنوتیپ	14	4309836	307845	2.8783	0.008363
GEN					
ژنوتیپ× محیط (سال)	28	2994667	106952	4.3211	1.03E-07
GEN×ENV(YEAR)					
باقی‌مانده	84	2079107	24751	256.2349	
Residuals					

جدول ۴ - تجزیه واریانس مرکب روش امی برای عملکرد دانه ژنوتیپ‌های نخود

Table 4- AMMI combined analysis of variance for grain yield of chickpea genotypes

منابع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	مقدار F	سطح معنی‌داری	درصد از مجموع مربعات کل	درصد تغییرات از اثر متقابل ژنوتیپ در محیط	درصد تجمعی تغییرات
S.O.V	df	Sum of Squares	Mean of Squares	F Value	Pr (>F)	Percentage of the total sum of squares	The percentage of variation from the genotype×environment interaction	Cumulative percentage of changes
محیط	2	49279420.4	24639710.2	256.23	1.55E-06	79.18		
ENV								
خطای محیط	6	576963.7	96160.6	3.89	1.80E-03			
REP(ENV)								
ژنوتیپ	14	4309836.0	307845.4	12.44	4.13E-15	6.93		
GEN								
ژنوتیپ× محیط	28	2994666.6	106952.4	4.32	1.03E-07	4.81		
GEN×ENV								
مؤلفه اصلی اول	15	2080430.6	138695.4	5.60	0.00E+00		69.47	69.5
PC1								
مؤلفه اصلی دوم	13	914236.0	70325.8	2.84	2.00E-03		30.53	100
PC2								
باقی‌مانده	84	2079107.5	24751.3					
Residuals								
کل	162	62234660.8	384164.6					
Total								

در این موارد بهتر است که اثر محیط حذف شود و بیشتر بر اثر ژنوتیپ و برهم‌کنش ژنوتیپ× محیط (سال) تمرکز شود (Sharifi, 2020). برای رسیدن به چنین هدفی، می‌توان از

در بسیاری از پژوهش‌ها اثر محیط (سال) بسیار بزرگ و قابل بهره‌برداری نیست و از آنجا که تنها اثر ژنوتیپ و ژنوتیپ× محیط است که در گزینش ژنوتیپ‌های پایدار اهمیت دارند، لذا

روش‌های چندمتغیره مانند روش AMMI و روش GGE بای پلات استفاده کرد.

شاخص‌های پایداری AMMI و شاخص انتخاب همزمان (SSI)

با استفاده از پارامترهای مختلف AMMI، ابعاد گوناگون تغییرات ناشی از برهم‌کنش ژنوتیپ و محیط ارزیابی شد. در جدول ۴، میانگین عملکرد هر کدام از ژنوتیپ‌ها در تمام محیط‌ها نشان می‌دهد که بیش‌ترین عملکرد دانه (۱۶۰۲ کیلوگرم در هکتار) در ژنوتیپ شماره ۱۲ و در پی آن در ژنوتیپ‌های شماره ۱۰، ۵ و ۸ دیده شد. تغییرات شرایط اقلیمی در سال‌های مختلف بر عملکرد دانه ژنوتیپ‌های مختلف اثرات قابل توجهی نشان داد، به‌عنوان مثال ژنوتیپ شماره ۲ در سال اول دارای عملکرد دانه ۱۷۶۷/۳ کیلوگرم در هکتار بود و به‌خاطر کاهش بارندگی به‌میزان ۲۱۹ میلی‌متر در سال دوم و همچنین افزایش تعداد روزهای یخبندان (۵۰ روز) و کاهش متوسط درجه حرارت مطلق به‌میزان ۱۶/۵ درجه سانتی‌گراد در این سال، عملکرد دانه این ژنوتیپ در سال دوم به‌شدت کاهش پیدا نموده است.

براساس شاخص‌های پایداری ASV و ZA ژنوتیپ‌های شماره ۱۴، ۶ و ۱ پایداری‌ترین ژنوتیپ‌ها بودند. از شاخص ASV به‌عنوان یک معیار مفید برای شناسایی ژنوتیپ‌های پایدار در نخود استفاده شده است (Pouresmael et al., 2018; Zali et al., 2012; Danyali et al., 2012).

براساس شاخص‌های SIPC و EV ژنوتیپ‌های ۱۴، ۱ و ۲ از پایداری بیشتری برخوردار بودند. بر پایه شاخص WAAS ژنوتیپ‌های شماره ۱۴، ۱ و ۶ پایداری‌ترین بودند. مزیت این شاخص نسبت به سایر شاخص‌های AMMI این است که در برآورد آن، از تمام مؤلفه‌های مدل با وزن‌های متفاوت استفاده می‌شود (Olivoto et al., 2019a).

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 ژنوتیپ‌های شماره ۶ و ۱۴ وجود دارد که عملکرد آن‌ها، پایین‌تر از متوسط کل ژنوتیپ‌ها است، بنابراین از شاخص

انتخاب همزمان (SSI^1) بر پایه هر کدام از شاخص‌های بالا استفاده شد، به‌طوری‌که بر مبنای شاخص انتخاب همزمان ssiASV که بر پایه شاخص پایداری ASV است، ژنوتیپ‌های ۱، ۱۰، ۸ و ۱۲ را می‌توان ژنوتیپ‌های برتر از نظر پایداری و عملکرد دانه شناسایی کرد. انتخاب همزمان ژنوتیپ‌ها براساس شاخص‌های ssiSIPC، ssiEV و ssiWAAS، ژنوتیپ‌های ۱۰، ۱ و ۸ را به‌عنوان برترین ژنوتیپ‌ها شناسایی کردند (جدول ۵). برای شناسایی ژنوتیپ‌های دارای عملکرد پایدار از پارامتر فاصله امی نیز استفاده شد. هرچه میزان فاصله امی ژنوتیپ بیشتر باشد، فاصله ژنوتیپ از مبدأ مؤلفه‌ها بیشتر و ژنوتیپ دارای عملکرد دانه ناپایدار محسوب می‌شود. ژنوتیپ‌های دارای فاصله کمتر امی به‌عنوان ژنوتیپ‌های دارای عملکرد پایدار در نظر گرفته می‌شوند. با استفاده از این پارامتر، ژنوتیپ‌های شماره ۱۴، ۱ و ۲ به‌عنوان ژنوتیپ‌های دارای عملکرد پایدار شناخته شدند. بر پایه شاخص ssiDist ژنوتیپ‌های ۱۰، ۱ و ۱۴ برترین ژنوتیپ‌ها بودند (جدول ۵).

در آماره‌های ssi که در برآورد آن‌ها به هر دو جنبه پایداری و متوسط عملکرد 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 پایداری‌ترین ژنوتیپ‌ها همیشه بالاترین عملکرد را ندارند. از طرفی، ژنوتیپ‌های پایدار اما با عملکرد پایین نیز با این شیوه برگزیده نمی‌شوند (Sayar et al., 2013).

در توجیه کاربرد روش گزینش همزمان برای ارزیابی عملکرد و پایداری، مقدم با مقایسه این آماره با آماره‌های مختلف پایداری همچون واریانس محیطی، ضریب تغییرات محیطی، ضریب رگرسیون، انحراف از خط رگرسیون و ضریب تبیین، نشان داد که استفاده از روش گزینش همزمان برای عملکرد و پایداری می‌تواند با اطمینان بیشتری فرایند گزینش را انجام دهد (Pezeshkpour et al., 2024). همچنین در پژوهشی دیگر برای بررسی پایداری عملکرد ارقام جدید نخود نشان داده شد که گزینش همزمان برای عملکرد و هر یک از پارامترهای پایداری می‌تواند به شناسایی ژنوتیپ‌های پایدار کمک کند (Fikre et al., 2018).

¹ Simultaneous selection index

جدول ۵- شاخص‌های پایداری، رتبه ژنوتیپ‌ها و شاخص انتخاب همزمان

Table 5- Stability indices, rank of genotypes and simultaneous selection index (SSI)

ژنوتیپ	عملکرد دانه	IPCA1	IPCA2	ASV	SIPC	EV	ZA	WAAS	AMMIDist	rY	rASV
Gen	Yield (Kg/ha)										
G1	1293.3	-1.83	1.1E-01	4.2	1.9E+00	0.002	0.046	1.31	1.83	6	3
G2	1220.4	1.927	-9.9E-01	4.5	2.9E+00	0.003	0.059	1.64	2.17	10	4
G3	1263.6	-7.9	4.8E-03	18.0	7.9E+00	0.038	0.190	5.49	7.9	9	12
G4	1090.9	-1.041	4.6E+00	5.2	5.7E+00	0.020	0.085	2.13	4.73	13	5
G5	1318.5	-5.564	-5.7E+00	13.9	1.1E+01	0.048	0.208	5.61	7.97	3	8
G6	1185.4	0.9507	-2.5E+00	3.3	3.5E+00	0.006	0.056	1.43	2.69	12	2
G7	1285.8	-10.29	1.2E+01	26.3	2.2E+01	0.194	0.404	10.80	15.8	7	14
G8	1294.8	1.489	-5.4E+00	6.4	6.9E+00	0.028	0.106	2.68	5.59	4	6
G9	1075.6	7.417	2.0E+00	17.0	9.5E+00	0.037	0.205	5.78	7.69	14	11
G10	1390.3	-3.50	2.0E+00	8.2	5.5E+00	0.011	0.111	3.05	4.05	2	7
G11	1295.0	7.20	-9.3E+00	18.8	1.7E+01	0.109	0.294	7.84	11.8	5	13
G12	1601.7	-3.62	-1.1E+01	14.0	1.5E+01	0.125	0.235	5.98	11.9	1	9
G13	1277.4	-6.85	5.6E+00	16.6	1.2E+01	0.057	0.238	6.47	8.84	8	10
G14	1206.8	0.5625	1.0E+00	1.6	1.6E+00	0.001	0.027	0.70	1.16	11	1
G15	737.1	21.04	7.8E+00	48.5	2.9E+01	0.321	0.608	17.00	22.5	15	15

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; WASS = Weighted average of absolute scores; AMMIDist = AMMI distance; rY = rank of grain yield; rASV = rank of ASV

ادامه جدول ۵- شاخص‌های پایداری، رتبه ژنوتیپ‌ها و شاخص انتخاب همزمان

Table 5 Continued- Stability indices, rank of genotypes and simultaneous selection index (SSI)

ژنوتیپ	rSIPC	rEV	rZA	rWAAS	rDist	ssiASV	ssiSIPC	ssiEV	ssiZA	ssiWAAS	ssiDist
G1	2	2	2	2	2	9	8	8	8	8	8
G2	3	3	3	3	3	14	13	13	13	13	13
G3	8	9	9	9	9	21	17	18	18	18	18
G4	6	6	6	6	6	18	19	19	19	19	19
G5	10	10	10	10	10	11	13	13	13	13	13
G6	4	4	4	4	4	14	16	16	16	16	16
G7	14	14	14	14	14	21	21	21	21	21	21
G8	7	7	7	7	7	10	11	11	11	11	12
G9	9	8	8	8	8	25	23	22	22	22	22
G10	5	5	5	5	5	9	7	7	7	7	7
G11	13	12	12	12	12	18	18	17	17	17	16
G12	12	13	13	13	13	10	13	14	14	14	14
G13	11	11	11	11	11	18	19	19	19	19	19
G14	1	1	1	1	1	12	12	12	12	12	12
G15	15	15	15	15	15	30	30	30	30	30	30

rSIPC = rank of SIPC; rEV = rank of EV; rZA = rank of ZA; rWAAS = rank of WAAS; rDist = rank of AMMI distance; ssiASV = Simultaneous selection index of ASV; ssiSIPC = Simultaneous selection index of SIPC; ssiEV = Simultaneous selection index of EV; ssiZA = Simultaneous selection index of ZA; ssiWAAS = Simultaneous selection index of WAAS; ssiDist = Simultaneous selection index of AMMI distance

جدول ۶- چهار ژنوتیپ انتخابی هر محیط توسط روش امی

Table 6- Four selected genotypes in each environments based on AMMI method

محیط	عملکرد دانه	امتیاز	رتبه اول	رتبه دوم	رتبه سوم	رتبه چهارم
Environment	Yield (kg/ha)	Score	First rank	Second rank	Third rank	Fourth rank
محیط (سال) اول E1	1828	-23.56	G12	G7	G10	G5
محیط (سال) دوم E2	406.2	11.58	G10	G12	G7	G13
محیط (سال) سوم E3	1473	11.98	G12	G11	G8	G5

یک از شاخص‌ها استفاده شد، جزء ژنوتیپ‌های منتخب قرار نگرفتند. در سوی مقابل، ژنوتیپ‌های شماره ۸ و ۱۰ که براساس پارامترهای AMMI پایدار نبود، اما به عنوان ژنوتیپ‌های برتر با توجه به شاخص‌های SSI آن‌ها برگزیده شدند. در این باره گفته شده است که زمانی که توجه 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 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., 2019a).

با وجود آن که گفته شده است که در صورت وجود برهم‌کنش معنی‌دار ژنوتیپ و محیط، اگر دو مؤلفه اصلی اول بیش از ۵۰ درصد از کل تغییرات را توجیه کنند، بای‌پلات می‌تواند ابزار مناسبی برای مطالعه برهم‌کنش ژنوتیپ در محیط باشد (Karimizadeh et al., 2020).

با آن که دو مؤلفه اصلی اول در این پژوهش، ۶۴/۶ درصد برهم‌کنش ژنوتیپ در محیط را توجیه کردند، اما مشاهده شد که گزینش ژنوتیپ‌ها فقط بر پایه این دو مؤلفه و صرف نظر از سایر مؤلفه‌ها و همچنین عملکرد دانه، می‌تواند منجر به نتایج نادرستی شود. برای نمونه، ژنوتیپ‌های شماره ۶، ۱ و ۲ که در هر چهار شاخص AMMI پایدار بودند، زمانی که از SSI برای هر

جدول ۷- شناسایی ژنوتیپ‌های برتر نخود با شاخص برتری در کل محیط‌ها (سال‌ها)، محیط‌های مطلوب و نامطلوب

Table 7- Identification the superior chickpea genotypes by superiority index in all, favorable and unfavorable environments

ژنوتیپ	عملکرد دانه	Pi-a	R-a	Pi-f	R-f	Pi-u	R-u
Gen	Yield (Kg/ha)						
G1	1293.3	60552.97	5	87820.9	5	6017.0	5
G2	1220.4	87542.91	9	125112.8	9	12403.1	7
G3	1263.6	72499.81	7	97577.2	7	22345.0	11
G4	1090.9	155850.26	13	220809.8	13	25931.2	13
G5	1318.5	44574.24	3	54212.6	2	25297.5	12
G6	1185.4	97756.79	11	133486.7	10	26296.9	14
G7	1285.8	106395.3	12	159526.5	12	132.8	3
G8	1294.8	54711.64	4	75538.8	4	13057.3	9
G9	1075.6	172627.16	14	250107.9	14	17665.7	10
G10	1390.3	38820.16	2	58230.2	3	0.0	1
G11	1295.0	64372.51	6	90105.3	6	12906.9	8
G12	1601.7	31.28	1	0.0	1	93.9	2
G13	1277.4	80861.2	8	119175.8	8	4232.0	4
G14	1206.8	95171.63	10	136879.7	11	11755.6	6
G15	737.1	493300.04	15	721440.5	15	37019.2	15

اول و سوم (E1 و E3) در رتبه یک، و در محیط دوم (E2) در رتبه دوم می‌تواند به عنوان یکی از پایدارترین ژنوتیپ‌ها در این روش انتخاب شود.

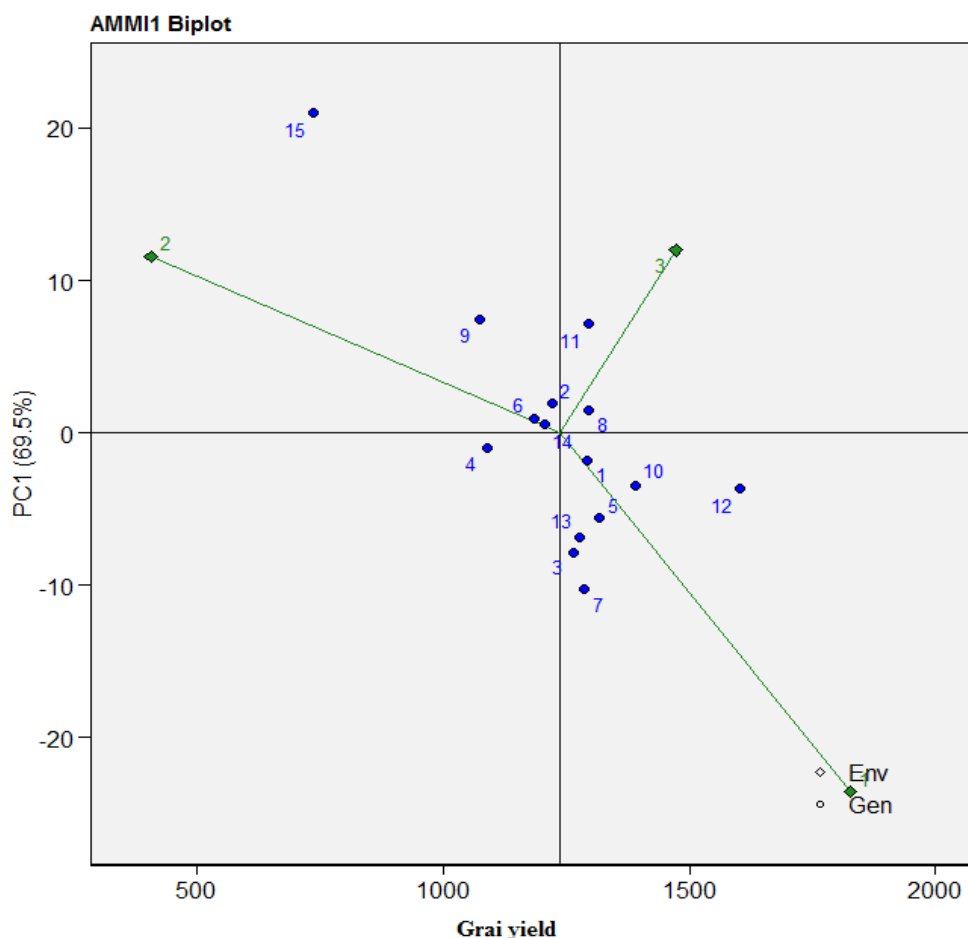
روش امی در هر محیط، چهار ژنوتیپ برتر را از نظر عملکرد و پایداری انتخاب می‌کند که نتایج حاصل از این تجزیه در جدول ۶ نشان داده شده است. ژنوتیپ شماره ۱۲ در محیط‌های

ژنوتیپ‌ها و محیط‌های دارای مقادیر اولین مؤلفه اصلی نزدیک به صفر، برهم‌کنش پایینی دارند. از این‌رو، ژنوتیپ‌های ۲، ۸، ۶، ۱۴، ۱، ۴ و ۱۰ دارای کمترین مقادیر IPCA1 بودند (شکل ۱). فقط میانگین عملکرد دانه ژنوتیپ‌های شماره ۱۰، ۱ و ۸ بیشتر از میانگین کل (۱۲۳۵/۷ کیلوگرم در هکتار) و رقم شاهد منصور به‌عنوان ژنوتیپ پایدار با سازگاری عمومی بالا معرفی شد. ژنوتیپ‌های ۱۵ و ۷ دورترین ژنوتیپ‌ها از مبدأ بای‌پلات (دارای بیشترین ضرایب در مؤلفه اصلی اول) بودند و براساس این شاخص، ناپایدار بودند (شکل ۱). محیط‌های دوم و سوم (E2 و E3) دارای کمترین مقدار IPCA1 و کمترین برهم‌کنش ژنوتیپ در محیط بودند و بنابراین، این محیط‌ها پایداری عملکرد بهتری داشتند. محیط‌های اول و سوم (E1 و E3) دارای عملکرد دانه بالاتری نسبت به میانگین کل بودند (شکل ۱).

در این پژوهش علاوه بر شاخص‌های مختلف AMMI، از شاخص برتری هم استفاده شده است (Lin and Binns, 1988). این شاخص برتری عمومی رقم را در تمام محیط‌ها (Pi-a) اندازه‌گیری می‌کند. براساس شاخص Pi-a، ژنوتیپ‌های شماره ۱۲، ۱۰، ۵ و ۸ ژنوتیپ‌های برتر بودند (جدول ۷). در تطابق با این نتیجه، پژوهشگران دیگری با استفاده از شاخص Pi در ژنوتیپ‌های نخود، پایدارترین ژنوتیپ‌ها را شناسایی کردند (Azam et al., 2020; Danyali et al., 2012; Hajivand et al., 2020).

تفسیر بای‌پلات

در بای‌پلات نوع اول AMMI (عملکرد دانه در برابر مؤلفه اصلی اول)، ژنوتیپ‌های دارای مقادیر اولین مؤلفه اصلی بزرگ (مثبت یا منفی)، برهم‌کنش بالایی با محیط دارند، درحالی‌که

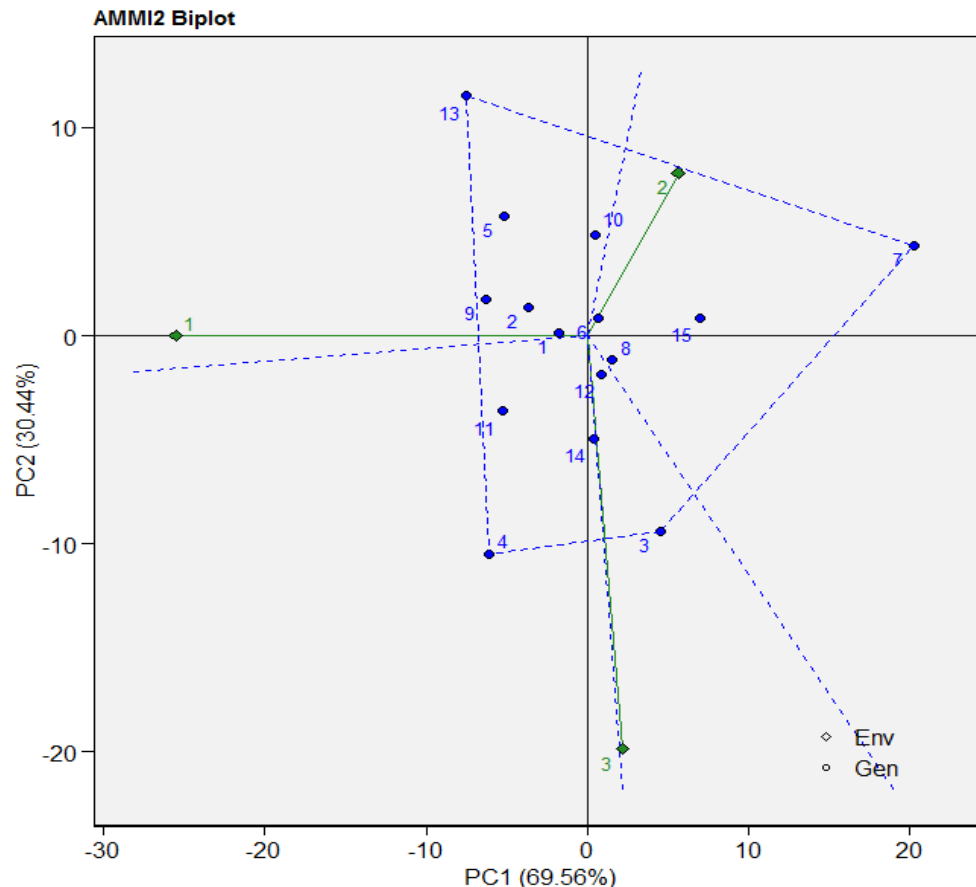


شکل ۱- بای‌پلات AMMI1 برای شناسایی ژنوتیپ‌های برتر نخود بر پایه میانگین عملکرد دانه و مؤلفه اصلی اول. اسامی ژنوتیپ‌ها مطابق با جدول ۱ است. محیط اول (E1)، دوم (E2) و سوم (E3) به ترتیب نمایانگر سال‌های زراعی ۱۳۹۹-۱۴۰۰، ۱۴۰۰-۱۳۹۹ و ۱۴۰۱-۱۴۰۰ است.

Figure 1- AMMI1 biplot to identify the superior chickpea genotype based on mean grain yield and PC1. The name of genotypes is based on the Table 1. The E1, E2 and E3 shows 2019-2020, 2020-2021 and 2021-2022 cropping years, respectively.

اول و دوم دخیل شده است. در بای پلات AMMI2، ژنوتیپ‌های ۳، ۴، ۷ و ۱۳ (شکل ۲) دارای بیشترین فاصله از مبدأ بای پلات بوده، سهم بالایی در برهم‌کنش ژنوتیپ در محیط داشته و بنابراین ژنوتیپ‌های ناپایداری بودند. در هر بخش از این شکل، ژنوتیپ قرار گرفته در رأس آن، بهترین ژنوتیپ برای محیط‌های واقع در آن است (Farshadfar et al., 2012).

چنانچه اتخاذ تصمیم برای شناسایی ژنوتیپ‌های پایدار، فقط براساس این نمودار (که در رسم آن، تنها از مؤلفه اصلی اول بهره گرفته شده است) صورت گیرد، که تنها ۶۹/۵ درصد از تغییرات برهم‌کنش ژنوتیپ× محیط را توجیه می‌کند، ممکن است نتایج ناصحیحی حاصل گردد. لذا، از روش بای پلات نوع دوم AMMI استفاده شد که در آن، ضرایب هر دو مؤلفه اصلی



شکل ۲- بای پلات AMMI2 برای شناسایی ژنوتیپ‌های برتر نخود بر پایه دو مؤلفه اصلی اول. اسامی ژنوتیپ‌ها مطابق با جدول ۱ است. محیط اول (E1)، دوم (E2) و سوم (E3) به ترتیب نمایانگر سال‌های زراعی ۱۳۹۹-۱۴۰۰، ۱۴۰۰-۱۴۰۱ و ۱۴۰۱-۱۴۰۰ است.

Figure 2- AMMI2 biplot to identity the superior chickpea genotype based on the first two PCs. The name of genotypes is based on the Table 1. The E1, E2 and E3 shows 2019-2020, 2020-2021 and 2021-2022 cropping years, respectively.

عمومی بالایی بودند. محققان دیگری نیز با استفاده از روش بای پلات نوع دوم، ژنوتیپ‌های پایدار نخود را شناسایی کرده‌اند (Farshadfar et al., 2011; Erdemci, 2018; Azam et al., 2020). این بای پلات همچنین نشان داد که محیط‌های ۳، ۴ و ۱۰ با بردارهای بلند، از توانایی جداکنندگی یا تمایز (Discriminating) بالایی برخوردار بودند و می‌توانند کارایی نسبی ژنوتیپ‌ها را به درستی برآورد کنند. حال آن‌که محیط‌های دیگر که درون چندضلعی جای داشتند و بردارهای

در هر کدام از بخش‌های این بای پلات، می‌توان ژنوتیپ‌های سازگار با برخی از محیط‌ها را شناسایی نمود. بر این اساس، ژنوتیپ ۱۳ به عنوان ژنوتیپ رأسی و ژنوتیپ‌های شماره ۵، ۶، ۱۰، ۲ و ۹ درون آن بخش‌ها، بهترین ژنوتیپ‌ها برای محیط‌های شماره ۱ و ۲ (E1 و E2) بودند. در بخش بعدی این چند ضلعی، ژنوتیپ‌های شماره ۳، ۱۰، ۱۴، ۱۲ و ۴ بهترین ژنوتیپ‌ها برای محیط سوم (E3) بودند. ژنوتیپ‌های شماره ۶، ۱، ۲، ۸، ۱۵ و ۱۲ تا حدودی ژنوتیپ‌های شماره ۹ و ۱۰ دارای پایداری

کوتاه‌تری داشتند، کمترین توانایی جداکنندگی را بین ژنوتیپ‌ها داشتند و اطلاعات کمی درباره ژنوتیپ‌ها فراهم می‌آوردند.

دو محور افقی و عمودی بای پلات نوع اول AMMI (عملکرد دانه در برابر مؤلفه اصلی اول)، به ترتیب به عملکرد دانه (به عنوان نمود یا بیان فنوتیپی یک ژنوتیپ) و نخستین مؤلفه اصلی برهم‌کنش ژنوتیپ × محیط (IPC1) اختصاص داده می‌شوند و بر مبنای بزرگی (مثبت یا منفی) و کوچکی (نزدیک به صفر و مبدأ مختصات) ضرایب ژنوتیپ‌ها و محیط‌ها در این مؤلفه اصلی، پایداری آن‌ها شناسایی می‌شود. ژنوتیپ‌های دارای مقادیر اولین مؤلفه اصلی بزرگ (مثبت یا منفی)، برهم‌کنش بالایی با محیط دارند، درحالی‌که ژنوتیپ‌ها و محیط‌های دارای مقادیر اولین مؤلفه اصلی نزدیک به صفر، دارای برهم‌کنش پایینی هستند. بنابراین بر این اساس، ژنوتیپ‌های شماره ۲، ۸، ۶، ۱۴، ۱ و ۴ دارای کمترین مقادیر IPCA1 بودند، اما فقط میانگین عملکرد دانه ژنوتیپ‌های شماره ۲، ۸ و ۶ بیشتر از میانگین کل (۱۲۳۵/۷ کیلوگرم در هکتار) بود و به عنوان ژنوتیپ‌های پایدار با سازگاری عمومی بالا معرفی شدند (شکل ۱). از سوی دیگر، ژنوتیپ‌های شماره ۱۵ و ۷ دورترین ژنوتیپ‌ها از مبدأ بای پلات (دارای بیشترین ضرایب در مؤلفه اصلی اول) بودند و براساس این شاخص، ناپایدار بودند (شکل ۱)، البته بیشتر ژنوتیپ‌ها در اطراف محور عمودی پراکنده بودند و کمترین فاصله را از این محور داشتند. بر پایه بای پلات AMMI2، ژنوتیپ‌های ۶، ۸، ۱ و ۱۲ علاوه بر پایداری عمومی بالا، دارای میانگینی بالاتر از میانگین کل بودند.

آماره‌های SSIZA، SSISIPC، SSIEV، SSIDIST، SSIAV و SSIWAAS، SSIEV رابطه مثبتی با یکدیگر و رابطه منفی با عملکرد دانه داشتند. بنابراین این پارامترها دارای مفهوم ایستا (بیولوژیکی) از پایداری هستند. گروه دوم شامل ASV، SIPC، EV، Za و WAAS هستند که همبستگی مثبتی با همدیگر دارند ولی با عملکرد دانه همبستگی منفی نشان دادند، که دارای مفهوم بیولوژیکی از پایداری هستند.

نتیجه‌گیری کلی

از آن‌جا که نتایج تجزیه واریانس مرکب گویای معنی‌دار بودن اثر محیط، ژنوتیپ و برهم‌کنش ژنوتیپ در محیط بود، تجزیه پایداری با شاخص‌ها و بای پلات‌های AMMI انجام شد. سهم محیط، ژنوتیپ و برهم‌کنش ژنوتیپ و محیط در مجموع

مربعات کل به ترتیب ۷۹/۱۸، ۶/۹۳ و ۴/۸۱ درصد بود. تجزیه واریانس AMMI نشان داد که دو مؤلفه اصلی اول، اثر معنی‌داری در برهم‌کنش ژنوتیپ و محیط داشتند. در بین ژنوتیپ‌های مطالعه شده، بیش‌ترین عملکرد دانه در ژنوتیپ شماره ۱۲ (۱۶۰۲ کیلوگرم در هکتار) و در پی آن در ژنوتیپ‌های شماره ۵، ۱۰ و ۸ دیده شد. براساس شاخص پایداری ASV، ژنوتیپ‌های ۱۴، ۶ و ۱؛ شاخص SIPC، ژنوتیپ‌های ۱۴، ۱ و ۲؛ شاخص EV، ژنوتیپ‌های ۱۴، ۱ و ۲؛ شاخص ZA نیز ژنوتیپ‌های ۱۴، ۶ و ۱ و شاخص WAAS، ژنوتیپ‌های ۱۴، ۶، ۱ و ۱۲ پلیدارترین ژنوتیپ‌ها بودند. ژنوتیپ‌های ۱، ۱۰، ۸ و ۱۲ بر مبنای شاخص انتخاب همزمان ssiASV به عنوان ژنوتیپ‌های برتر از نظر پایداری و عملکرد دانه شناسایی شدند. انتخاب همزمان ژنوتیپ‌ها براساس شاخص‌های ssiSIPC، ssiEV و ssiWAAS، ژنوتیپ‌های ۱۰، ۱ و ۸ را به عنوان برترین ژنوتیپ‌ها شناسایی کردند. بر پایه بای پلات AMMI1، ژنوتیپ‌های ۲، ۸ و ۱ با میانگین بیشتر از میانگین کل (۱۲۳۵/۷ کیلوگرم در هکتار) و کمترین مقادیر IPCA1، به عنوان ژنوتیپ‌های پایدار با سازگاری عمومی بالا بودند. بر پایه بای پلات AMMI2، ژنوتیپ‌های ۱، ۸ و ۱۲، علاوه بر پایداری عمومی بالا، دارای میانگینی بالاتر از میانگین کل بودند. این نمودار افزون بر شناسایی ژنوتیپ‌های با پایداری عمومی بالا، ژنوتیپ‌های سازگار برای هر محیط را نیز شناسایی کردند. 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 می‌گردد، 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 ۱۲، ۱۰، ۵ و ۸ برترین ژنوتیپ‌ها در محیط‌های مطالعه شده بودند. در مجموع و بر پایه شاخص‌های مختلف، ژنوتیپ‌های ۱، ۱۰، ۱۲ و ۸ در بسیاری از محیط‌ها (سال‌ها) و در بیشتر روش‌ها، دارای عملکرد و پایداری مطلوبی بودند و می‌توانند نامزد معرفی ارقام جدید باشند.

سپاسگزاری

تعارض منافع

نتایج این مقاله بخشی از یک پروژه ملی با شماره مصوب ۹۸۰۸۶۴-۰۲۵-۱۵-۱۵-۰ است که بدین‌وسیله از سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی سپاسگزاری می‌شود.

نویسندگان اظهار می‌نمایند که هیچ‌گونه تعارض منافی در رابطه با نشر این مقاله وجود ندارد.

References

- Azam, M.G., Iqbal, M.S., Hossain M.A. and Hossain, M.F., 2020. Stability investigation and genotype $\times$ environment association in chickpea genotypes utilizing AMMI and GGE biplot model. *Genetics and Molecular Research*, 19(3), 16039980.
- Danyali, S.F., Razavi, F., Ebadi Segherloo, A., Dehghani, H. and Sabaghpour, S.H., 2012. Yield stability in chickpea (*Cicer arietinum* L.) and study relationship among the univariate and multivariate stability parameters. *Research in Plant Biology*, 2(3), pp.46-61. <http://doi.org/10.22092/sppi.2021.124607>
- Erdemci, I., 2018. Investigation of genotype $\times$ environment interaction in chickpea genotypes using AMMI and GGE biplot analysis. *Turkish Journal of Field Crops*, 23(1), pp.20-26. <https://doi.org/10.17557/tjfc.414846>
- Farshadfar, E., Rashidi, M., Jowkar, MM. and Zali, H., 2012. GGE Biplot analysis of genotype $\times$ environment interaction in chickpea genotypes. *European Journal of Experimental Biology*. 3(1), pp.417-423.
- Farshadfar, E., Zali, H. and Mohammadi, R., 2011. Evaluation of phenotypic stability in chickpea genotypes using GGE-Ballot. *Annals of Biological Research*, 2(6), pp.282-292.
- Fikre, A., Funga, A., Korbu, L., Eshete, M., Girma, N., Zewdie, A., Bekele, D., Muhamed, R., Daba, K. and Ojiewo, C. O., 2018. Stability analysis in chickpea genotype sets as tool for breeding germplasm structuring strategy and adaptability scoping. *Ethiopian Journal of Crop Science*, 6(2), pp.19-37.
- Hajivand, A., Asghari, A., Karimizadeh, R., Mohammaddoust-Chamanabad, H.R. and 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 and Environmental Research*, 18(2), pp.2621-2636. https://doi.org/10.15666/aeer/1802_26212636
- Hasan, M.T. and Deb, A.C., 2017. Stability analysis of yield and yield components in chickpea (*Cicer arietinum* L.). *Horticultural International Journal*, 1(1), pp.4-14. <https://doi.org/10.15406/hij.2017.01.00002>
- Jahangiri, A., Sadeghzadeh-Ahari, D., Safikhani, M., Pezeshkpour, P., Saeid, A., Sarparast, R. and Mohammadi, M., 2015. Adel, a new rainfed chickpea cultivar for autumn planting under moderate cold and semi-warm regions of Iran. *Research Achievements for Field and Horticulture Crops*, 4(1), pp.1-13. [In Persian]. <https://doi.org/10.22092/rafhc.2015.106539>
- Kanouni, H., Farayedi, Y., Sabaghpour, S.H. and Saeid, A., 2016. Assessment of genotype $\times$ environment interaction effect on seed yield of chickpea (*Cicer arietinum* L.) lines under rainfed winter planting conditions. *Iranian Journal of Crop Sciences*, 18(1), pp.63-75. [In Persian with English Summary]. <https://dor.org/20.1001.1.15625540.1395.18.1.5.4>

- Kanouni, H., Farayedi, Y., Saeid, A. and Sabaghpour, S.H., 2015. Stability analyses for seed yield of chickpea (*Cicer arietinum* L.) genotypes in the western cold zone of Iran. *Journal of Agricultural Science*, 7(5), pp.219-230. <https://doi.org/10.5539/jas.v7n5p219>
- Karimizadeh, R., Pezeshkpour, P., Barzali, M., Mehraban, A. and 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]. <https://doi.org/10.52547/jcb.12.36.160>
- Kizilgeci, F., 2018. Assessing the yield stability of nineteen chickpea (*Cicer arietinum* L.) genotypes grown under multiple environments in south-eastern Anatolia, Turkey. *Applied Ecology and Environmental Research*, 16(6), pp.7989-7997. https://doi.org/10.15666/aeer/1606_79897997
- Liang, S., Ren, G., Liu, J., Zhao, X., Zhou, M., McNeil, D., Ye, G., 2015. Genotype- by- environment interaction is important for grain yield in irrigated Lowland rice. *Field Crops Research*, 180, pp.90-99. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.05.014>
- Lin, C.S. and Binns, M.R., 1988. A superiority measure of cultivar performance for cultivar x location data. *Canadian Journal of Plant Science*, 68(1), pp.193-198. <https://doi.org/10.4141/cjps88-018>
- Ministry of Agriculture Jihad., 2023. Agricultural Statistics for the Year 2022, Volume 1: Crops. Statistics, Information and Communication Technology Center. Deputy of Planning and Economic Affairs, *Ministry of Agriculture Jihad*. [In Persian].
- Olivoto, T., Lúcio, A.D., da Silva, J.A., Marchioro, V.S., de Souza, V.Q. and Jost, E., 2019a. Mean performance and stability in multi-environment trials I: combining features of AMMI and BLUP techniques. *Agronomy Journal*, 111(6), pp.2949-2960. <https://doi.org/10.2134/agronj2019.03.0220>
- Olivoto, T., Lúcio, A.D., da Silva, J.A., Sari, B.G. and Diel, M.I., 2019b. Mean performance and stability in multi-environment trials II: Selection based on multiple traits. *Agronomy Journal*, 111(6), pp.2961-2969. <https://doi.org/10.2134/agronj2019.03.0221>
- Pezeshkpour, P., Amiri, R., Karami, I. and Mirzaei, A., 2024. Grain yield stability analysis of lentil genotypes by AMMI Indices. *Journal of Crop Breeding*, 16(4), pp.1-12. <https://doi.org/10.61186/jcb.16.4.1>
- Pouresmael, M., Kanouni, H., Hajihassani, M., Astraki, H., Mirakhorli, A., Nasrollahi, M. and Mozaffari, J., 2018. Stability of chickpea (*Cicer arietinum* L.) landraces in national plant gene bank of Iran for drylands. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 20, pp.387-400
- Purchase, J.L., Hatting, H. and Van Deventer, C.S., 2000. Genotype× 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), pp.101-107. <https://doi.org/10.1080/02571862.2000.10634878>
- Sayar, M.S., Anlarsal, A.E. and Basbag, M., 2013. Genotype×environment interactions and stability analysis for dry-matter yield and seed yield in Hungarian vetch (*Vicia pannonica* Crantz.). *Turkish Journal of Field Crops*, 18(2), pp.238-246.
- Sharifi, P. 2020. Evolution, domestication, breeding methods and the latest breeding findings in rice. Agricultural and Natural Resources Engineering Organization of IRAN, IR, 254 pp. [In Persian].

- Sharifi, P., Aminpanah, H., Erfani, R., Mohaddesi, A. and Abbasian, A., 2017. Evaluation of genotype $\times$ environment interaction in rice based on AMMI model in Iran. *Rice Science*, 24(3), pp.173–180. <https://doi.org/10.1016/j.rsci.2017.02.001>
- Sneller, C.H., Kilgore-norquest, L. and Dombek, D., 1997. Repeatability of yield stability statistics in soybean. *Crop Science*, 7, pp.383–390. <https://doi.org/10.2135/cropsci2018.05.0321>
- Wright, K. and Laffont, J.L., 2018. R package for GGE biplot. Github Company, Newyork, USA.
- Zali, H., Farshadfar, E., Sabaghpour, S.H. and Karimizadeh, R., 2012. Evaluation of genotype $\times$ environment interaction in chickpea using measures of stability from AMMI model. *Annals of Biological Research*, 3, pp.3126–3136.
- Zobel, R.W., Wright, A.J. and Gauch, H.G., 1988. Statistical analysis of a yield trial. *Agronomy Journal*, 80(3), pp.388-393. <https://doi.org/10.2134/agronj1988.00021962008000030002x>