



<https://doi.org/10.22067/ijpr.2026.97257.1126>

Evaluation of the Compatibility and Stability of Pinto Bean (*Phaseolus vulgaris* L.) Genotypes using AMMI and REML/BLUP Methods

Behrouz Asadi¹, Seyedeh Soudabeh Shobeiri², Ali Akbar Asadi^{2*}, Foroud Salehi³, Hossein Astaraki⁴

Received: 30 December 2025
Revised: 21 April 2026
Accepted: 22 April 2026
Available Online: 22 April 2026

Cite this article:

Asadi, B., Shobeiri, S. S., Asadi, A. A., Salehi, F., & Astaraki, H. (2026). Evaluation of the compatibility and stability of Pinto bean (*Phaseolus vulgaris* L.) genotypes using AMMI and REML/BLUP methods. *Iranian Journal of Pulses Research*, 17(1), 31-47. (In Persian). <https://doi.org/10.22067/ijpr.2026.97257.1126>

Introduction

In bean (*Phaseolus vulgaris* L.) breeding programs, the ultimate goal of researchers is to produce varieties with high yield potential to increase production in different environments. Due to the differences in the adaptability of genotypes in different environments, the yield of genotypes fluctuates in different environments, which is known as the genotype $\times$ environment interaction (GEI) and is the result of the different phenotypic responses of genotypes to environmental changes. It is of particular importance to understand the type and nature of the interaction and to obtain the figures that show the least reaction to the interaction. To account for GEI, breeders evaluate genotypes in multiple environments to identify genotypes with high yield and stability and genotypes that have a non-significant GEI are considered stable genotypes. There are various methods, such as parametric and nonparametric methods, to evaluate interaction effects but the best result is achieved when a genotype shows similar results of stability with different evaluation methods. Therefore, identifying and developing stable, high-yielding cultivars that perform consistently across diverse environmental conditions is a major objective of pinto bean breeding programs. To this end, the present study evaluated the yield stability of 13 pinto bean genotypes across multiple environments using multivariate stability analysis.

Materials and Methods

In order to compare the yield and study the compatibility of bean genotypes, 12 bean genotypes along with the Kosha cultivar (check) were studied in a randomized complete block design with three replications in four regions: Khosha, Boroujerd, Shahrekord, and Zanjan for 2 years. The F-test of sources of variation was performed based on the arithmetic Mean of squares expectation, assuming randomness of years and locations (environments) and fixed genotypes. To determine the stability and compatibility of genotypes, AMMI multivariate methods and BLUP-based linear mixed model were used, and WAASBi and WAASBYi stability quantities were calculated to quantify stability.

Results and Discussion

A combined analysis of variance was performed assuming randomness of years and locations (environments) and fixed genotypes and it showed that the interaction effects of genotype $\times$ location, year $\times$ location and genotype $\times$ year $\times$ location were significant. The main effect of genotype, the main effect of environment (sum of main effects and interaction effect), and the interaction effect of genotype $\times$ environment (sum of dual and triple effects) explained 15, 39, and 40 percent of the total sum of squares, respectively. AMMI analysis of variance showed that the first to seventh principal components were significant and together explained nearly 100% of the variation in the genotype $\times$ environment interaction. The first and second principal components explained nearly 76% of the sum of squares of the GEI. Genotypes G11, G9 and G6 had the lowest values of the IPCA1, and among them, only genotype G9 had a yield higher than the average total yield,

1- Crop and Horticultural Science Research Department, Arak Agriculture and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Arak, Iran

2- Crop and Horticultural Science Research Department, Zanjan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Zanjan, Iran

3- Crop and Horticultural Science Research Department, Isfahan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Isfahan, Iran

4- Crop and Horticultural Science Research Department, Lorestan Agriculture and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Lorestan, Iran

* Corresponding Author: asadipm@gmail.com



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

which was introduced as a stable genotype with high general adaptability to all environments. Genotypes G8, G6, and G11 had the lowest values of the second principal component of IPCA2; therefore, considering the yield, genotype G6 can also be introduced as a stable genotype in all environments. AMMI2 biplot showed compatibility of genotype G12 with Shah1 and Zan2, genotypes G2, G3 and G4 with Boro1, genotypes G9 and G13 with Khom1 and Khom2 and genotypes G1 and G8 with Boro2 environments. Based on the simultaneous selection criterion based on average grain yield and WAASB stability index, genotypes G7, G9, G8, G6, G1 and G3 with the highest WAASBY value were stable genotypes with high grain yield. Based on the biplot of grain yield versus weighted average absolute scores (WAASB), genotypes G7, G8, and G9 located in the fourth quartile had higher yields than the average yield of genotypes and were more stable than other genotypes. Finally, based on equal importance for yield and stability, G11 and G4 are stable and low-yielding genotypes, G6, G7, G8 and G9 are stable and high-yielding genotypes, G1, G3 and G5 are unstable and high-yielding genotypes, and finally G10, G12, G13, G20 and G2 are unstable and high-yielding genotypes.

Conclusions

Because the WAASBY index incorporates mixed-model analysis and all relevant components of genotype performance, it appears to provide a more comprehensive assessment of genotype stability and adaptability than the other indices evaluated. Based on the WAASBY index, genotypes G9, G7, G8, and G6 were ranked first through fourth, respectively, and were identified as the most promising genotypes.

Keywords: AMMI Analysis, Mixture model, Yield stability index



ارزیابی سازگاری و پایداری عملکرد ژنوتیپ‌های لوبیا چیتی (*Phaseolus vulgaris* L.) با استفاده از روش‌های AMMI و REML/BLUP

بهروز اسدی^{۱*}، سیده سودابه شبیری^۲، علی اکبر اسدی^۳، فرود صالحی^۴، حسین استرکی^۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۰۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۰۲

چکیده

شناسایی و معرفی ارقام پایدار با عملکرد دانه بالا در شرایط محیطی متفاوت از اولویت‌های برنامه‌های اصلاحی لوبیا (*Phaseolus vulgaris* L.) می‌باشد. روش‌های مختلفی جهت ارزیابی اثر متقابل ژنوتیپ × محیط وجود دارد، ولی بهترین نتیجه زمانی حاصل می‌شود که یک ژنوتیپ با روش‌های مختلف ارزیابی، نتیجه مشابهی از نظر پایداری نشان دهد. به همین منظور، جهت مقایسه عملکرد دانه و سازگاری ژنوتیپ‌های لوبیا، ۱۲ ژنوتیپ لوبیا چیتی به همراه رقم کوشا در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در چهار منطقه خمین، بروجرد، شهرکرد و زنجان به مدت دو سال کشت شدند. جهت تعیین پایداری و سازگاری ژنوتیپ‌ها از روش‌های چندمتغیره AMMI و مدل مخلوط خطی مبتنی بر BLUP و محاسبه کمیت‌های پایداری WAASBi و WAASBYi برای کمی‌سازی پایداری استفاده گردید. تجزیه واریانس مرکب نشان داد که اثرات متقابل ژنوتیپ × مکان، سال × مکان و ژنوتیپ × سال × مکان معنی‌دار بودند. اثر اصلی ژنوتیپ، اثر اصلی محیط و اثر متقابل ژنوتیپ × محیط به ترتیب ۱۵، ۳۹ و ۴۰ درصد از مجموع مربعات کل را تبیین کردند. تجزیه واریانس AMMI نشان داد که اولین و دومین مؤلفه اصلی ۷۶ درصد از مجموع مربعات اثر متقابل ژنوتیپ × محیط را تبیین کردند. ژنوتیپ‌های G6، G9 و G11 دارای IPCA1 نزدیک به صفر بودند و از بین آن‌ها ژنوتیپ G9 دارای عملکرد بالاتر از میانگین عملکرد کل بود که به عنوان ژنوتیپ پایدار با سازگاری عمومی بالا برای تمامی محیط‌ها معرفی شد. ژنوتیپ‌های G6، G8 و G11 دارای کمترین مقادیر IPCA2 بودند؛ بنابراین با توجه به عملکرد ژنوتیپ‌ها، ژنوتیپ G6 را نیز می‌توان به عنوان ژنوتیپ پایدار در تمامی محیط‌ها معرفی کرد. براساس بای‌پلات AMMI2، ژنوتیپ G12 با محیط Shah1 و Zan2، ژنوتیپ‌های G2، G3 و G4 با محیط Boro1، ژنوتیپ‌های G9 و G13 با محیط‌های Khom1 و Khom2 و ژنوتیپ‌های G1 و G8 با محیط Boro2 سازگاری نشان دادند. براساس معیار گزینش هم‌زمان مبتنی بر میانگین عملکرد دانه و شاخص پایداری WAASB، ژنوتیپ‌های G7، G9، G8، G6 و G1 با داشتن بیشترین مقدار WAASBY ژنوتیپ‌های پایدار و دارای عملکرد دانه بالا بودند. براساس بای‌پلات عملکرد دانه در برابر میانگین وزنی نمرات مطلق (WAASB)، ژنوتیپ‌های G7، G8 و G9 در چارک چهارم جای گرفته و دارای عملکرد بیشتر از متوسط عملکرد ژنوتیپ‌ها و پایداری بیشتری نسبت به ژنوتیپ‌های دیگر بودند. در نهایت بر مبنای اهمیت یکسان برای عملکرد و پایداری، ژنوتیپ‌های G6، G7، G8 و G9 به عنوان ژنوتیپ‌های پایدار با عملکرد بالا معرفی شدند.

واژه‌های کلیدی: تجزیه AMMI، شاخص پایداری عملکرد، مدل مخلوط

مقدمه

لوبیای معمولی (*Phaseolus vulgaris* L.) گیاهی یک‌ساله و خودگشن به عنوان یک غذای اصلی و تأمین‌کننده بخشی از پروتئین مورد نیاز در جیره غذایی انسان‌ها به شمار می‌رود. این گیاه زراعی دارای ارزش غذایی زیادی بوده و مهم‌ترین منبع غذایی سرشار از پروتئین (۱۱ تا ۳۳ درصد) می‌باشد (Bagheri et al., 2002). سطح زیرکشت این محصول در جهان حدود ۳۴/۸ میلیون هکتار و میزان تولید آن ۲۷/۵ میلیون تن با متوسط عملکرد ۷۹۱ کیلوگرم در هکتار

است (FAO, 2020). در ایران سطح زیرکشت لوبیا ۸۹۸۹۸ هکتار و مقدار تولید آن ۲۰۷۳۵۹ تن با عملکرد ۲۳۰۷ کیلوگرم در هکتار می‌باشد (Ahmadi et al., 2021).

در برنامه‌های اصلاحی تولید ارقام با پتانسیل عملکرد بالا، هدف نهایی محققان افزایش تولیدات محصولات کشاورزی است. از آنجاکه بخشی از بیان ژن در قالب محیط القاء تنظیم می‌شود، آزمایش ژنوتیپ‌ها در محیط‌های مختلف می‌تواند به شناسایی ژنوتیپ‌های برتر کمک کند. به تغییری که در عملکرد نسبی ژنوتیپ‌ها در محیط‌های

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

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

۳- بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی چهارمحال و بختیاری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اصفهان، ایران

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

(*- نویسنده مسئول: asadipm@gmail.com)

مختلف پدید می‌آید، اثر متقابل ژنوتیپ × محیط گفته می‌شود که دلیل عمده آن نیز تفاوت سازگاری ژنوتیپ‌ها در محیط‌های مختلف می‌باشد (Peterson et al., 1997; Cleveland, 2001). اثر متقابل ژنوتیپ × محیط ممکن است باعث کاهش همبستگی بین ارزش‌های ژنوتیپی (ارزش اصلاحی) و فنوتیپی شده و کارایی گزینش را کاهش دهد (Brandle & Mcverty, 1994; Ebdon & Gauch, 2002). اثر متقابل ژنوتیپ × محیط، از یک طرف همبستگی بین اثرات ژنوتیپی و فنوتیپی و از طرف دیگر، پیشرفت در گزینش ژنوتیپ‌ها را به‌ویژه در شرایط تنش کاهش می‌دهد (Kaya et al., 2006; Yan & Tinker, 2006). اثر متقابل ژنوتیپ × محیط (Genotype × environment interaction) اهمیت زیادی برای به‌نژادگران لوبیا دارد که به‌عنوان پاسخ فنوتیپی ژنوتیپ‌ها به تغییرات محیطی تعریف می‌شود (Yan & Kang, 2003). به‌منظور محاسبه اثر متقابل ژنوتیپ × محیط، به‌نژادگران ژنوتیپ‌ها را در چندین محیط ارزیابی می‌کنند تا ژنوتیپ‌های با عملکرد و پایداری بالا شناسایی شوند و ژنوتیپ‌هایی که اثر متقابل ژنوتیپ × محیط غیرمعنی‌دار دارند به‌عنوان ژنوتیپ‌های پایدار در نظر گرفته می‌شوند (Semakula & Dixon, 2007). بنابراین انتخاب ژنوتیپ‌های پایدار از جمله روش‌های کاهش اثرات متقابل محیط و ژنوتیپ است. در صورتی که پایداری یک ژنوتیپ با عوامل ژنتیکی کنترل شود، انتخاب ژنوتیپ‌های پایدار موفقیت‌آمیز خواهد بود (Farshadfar, 1998). با این حال متخصصان اصلاح نباتات با روش‌های متفاوت، همگی معتقد به پایداری بالای عملکرد هستند، اما توافق واحدی بر روی تعریف پایداری و روش‌های اندازه‌گیری آن وجود ندارد (Kang & Magari, 1995).

شناخت نوع و ماهیت اثر متقابل و دستیابی به ارقامی که کمترین واکنش را نسبت به اثرات متقابل نشان دهند از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. روش‌های مختلفی برای ارزیابی اثرات متقابل معرفی شده است که هر یک ماهیت اثر متقابل را از دیدگاه مشخصی بررسی می‌کند. نتایج روش‌های مختلف ممکن است با هم یکسان نباشند، اما بهترین نتیجه زمانی حاصل می‌شود که یک ژنوتیپ با روش‌های مختلف ارزیابی، نتیجه مشابهی از نظر پایداری نشان دهد (Dorri et al., 2014). از جمله این روش‌ها می‌توان به روش اثرات اصلی جمع‌پذیر و اثر متقابل ضرب‌پذیری روش AMMI و روش گرافیکی GGE Biplot اشاره کرد (Gauch & Zobel, 1996). روش تجزیه AMMI توسط محققان مختلفی مورد استفاده قرار گرفته و مشخص شده است که این روش می‌تواند برای تعیین ژنوتیپ‌های دارای سازگاری عمومی و خصوصی و برای مکان‌های مختلف مورد استفاده قرار گیرد (Elakhdar et al., 2017; Mohammadi & Esmailzadeh Moghaddam et al., 2011; Amri, 2013). فیلیپو و همکاران (Philipo et al., 2021) با ارزیابی

۹۹ ژنوتیپ مختلف لوبیا در سه منطقه مشاهده کردند که هر سه اثر ژنوتیپ، محیط و اثر متقابل ژنوتیپ × محیط بسیار معنی‌دار بوده و اثر اصلی ژنوتیپ ۳۹/۳، اثر اصلی محیط ۲۶/۸ درصد و اثر متقابل ژنوتیپ × محیط ۳۱/۴ درصد از مجموع مربعات کل را تبیین کردند. مکبیب (Mekbib, 2004) پس از انجام تجزیه پایداری با مقایسه روش‌های مختلف پایداری برای انتخاب ارقام پایدار و پرمحصول لوبیای معمولی نتیجه‌گیری کرد که معیارهای واریانس درون مکانی، اکی والانس ریک و واریانس پایداری موجب انتخاب ارقام پایدار و پرمحصول می‌شوند. نتایج آن‌ها نشان داد که روش اکی والانس و واریانس پایداری را به‌خاطر انتخاب ارقام پایدار پرمحصول در لوبیا و سایر حبوبات می‌توان به‌عنوان معیار مناسب پایداری توصیه نمود. اسدی و همکاران (Asadi et al., 2024) با استفاده از تجزیه‌های چند متغیره مانند AMMI جهت تجزیه پایداری ژنوتیپ‌های لوبیا چیتی از بین ژنوتیپ‌های ناشی از برنامه‌های اصلاحی، چهار ژنوتیپ پایدار و با عملکرد بالا را معرفی نمودند. کوشکی و همکاران (Kooshki et al., 2017) در تجزیه پایداری ژنوتیپ‌های لوبیا سفید با استفاده از تجزیه AMMI نشان دادند که اثر متقابل ژنوتیپ × محیط مهم‌تر از اثر اصلی ژنوتیپ برای عملکرد دانه بود و شش مؤلفه اصلی در تجزیه AMMI معنی‌دار شدند. همچنین دو مؤلفه اصلی اول و دوم در مجموع ۷۱ درصد واریانس کل را توجیه می‌کردند و براساس مقادیر اولین مؤلفه اصلی معنی‌دار، ارزش پایداری AMMI (ASV) و شاخص پایداری ژنوتیپ (GSI)، ژنوتیپ DANESHKADEH/11805 به‌عنوان ژنوتیپ با عملکرد و پایداری عملکرد بالا شناخته شد. دانیالی و همکاران (Danyali et al., 2012) با ارزیابی ۱۷ ژنوتیپ نخود (*Cicer arietinum*) در ۱۶ محیط نشان دادند که دو مؤلفه اصلی اول و دوم به‌ترتیب ۴۷/۴۹ و ۲۵/۲۵ درصد از اثر متقابل ژنوتیپ × محیط را توجیه کردند.

مدل اثرات مختلط خطی LMM و روش برآوردگر حداکثر درست‌نمایی محدودشده REML، از جمله روش‌های مهم دیگری هستند که برای تجزیه داده‌های آزمایش‌های چند محیطی پیشنهاد شده‌اند (Olivoto, Lúcio, da Silva, Marchioro et al., 2019). اثر متقابل معنی‌دار ژنوتیپ × محیط بیانگر این است که عملکرد ژنوتیپ‌ها از محیطی به محیط دیگر دارای نوسان است، بنابراین برآورد بهترین پیش‌بینی‌های نااریب خطی BLUP و انجام تجزیه AMMI بر روی آن‌ها، می‌تواند به شناسایی پایدارترین ژنوتیپ‌ها کمک کند (Olivoto, Lúcio, da Silva, Marchioro et al., 2019). در این روش، برای بهره‌گیری از مزایای دو روش AMMI و BLUP با مدل مخلوط خطی مبتنی بر BLUP، یک ماتریس اثر متقابل ژنوتیپ × محیط به دست می‌آید و از تجزیه این ماتریس با تجزیه ارزش منفرد SVD، که پایه تجزیه AMMI است، یک معیار

ژنوتیپ در محیط روی ۱۳ ژنوتیپ لوبیا چیتی با استفاده از روش‌های تک متغیره پارامتری و ناپارامتری بود.

مواد و روش‌ها

به منظور مقایسه عملکرد و بررسی سازگاری ژنوتیپ‌های لوبیا، تعداد ۱۲ ژنوتیپ لوبیا چیتی به همراه رقم کوشا در مجموع ۱۳ ژنوتیپ (جدول ۱)، در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در چهار منطقه خمین، بروجرد، شهرکرد و زنجان به مدت دو سال بررسی شدند. بنابراین تعداد ۱۳ ژنوتیپ در هشت محیط مورد بررسی قرار گرفتند. با توجه به اینکه کشور ایران در منطقه خشک و نیمه‌خشک جهان قرار دارد و لوبیا نیز یکی از محصولات با نیاز آبی بالا می‌باشد، دستیابی لاین‌ها و ارقامی با دوره رشد کوتاه‌تر و عملکرد بالا می‌تواند حداقل سه مرحله آبیاری را در لوبیا کاهش دهد و باعث افزایش کارایی مصرف آب شود. همچنین در مناطقی از کشور که سرما و بارندگی‌های زودهنگام پاییزه وجود دارد، امکان کاشت ارقام و لاین‌های زودرس وجود خواهد داشت. آمارهای هواشناسی چهار منطقه مورد بررسی در طول دو سال زراعی در جدول ۲ نشان داده شده است. لاین‌های مورد بررسی از مرکز بین‌المللی تحقیقات کشاورزی مناطق گرمسیری (CIAT) وارد شده و در قالب دو پروژه تحقیقاتی فوق‌الذکر مورد ارزیابی قرار گرفته و لاین‌هایی که دارای دوره رسیدگی کوتاه‌تر و عملکرد مناسب و بازارپسندی دانه خوبی بیشتری برخوردار بودند، گزینش و در پروژه سازگاری با رقم کوشا در چهار منطقه کشور مقایسه گردید.

پایداری ژنوتیپی به نام شاخص پایداری میانگین وزنی نمرات مطلق WAASB به دست می‌آید که حاصل تلفیق دو روش AMMI و BLUP است (Olivoto, Lúcio, da Silva, Sari et al., 2019). در این روش از شاخص پایداری میانگین وزنی نمرات مطلق بهترین پیش‌بینی‌های ناریب خطی WAASB و میانگین وزنی شاخص پایدار WAASB و متغیر وابسته WAASBY استفاده می‌شود (Olivoto, Lúcio, da Silva, Sari et al., 2019). محققان مختلفی از این روش در شناسایی ژنوتیپ‌ها و ارقام پایدار حبوبات استفاده کرده‌اند (Pezeshkpour et al., 2025; Pezeshkpour & Karimizadeh, 2023; Amiri et al., 2023; Sharifi et al., 2022; Sellami et al., 2021). پزشک‌پور و همکاران (Pezeshkpour et al., 2024) با استفاده از شاخص پایداری میانگین وزنی نمرات مطلق بهترین پیش‌بینی ناریب خطی سه ژنوتیپ پرمحصول پایدار را در نخود معرفی نمودند.

با توجه به قرار گرفتن ایران در منطقه خشک و نیمه‌خشک جهان و نیاز آبی بالای لوبیا، دستیابی به لاین‌ها و ارقامی با دوره رشد کوتاه‌تر و عملکرد بالاتر می‌تواند باعث کاهش مصرف آب در کشت این محصول شود. همچنین در مناطقی که سرما و بارندگی‌های زودهنگام پاییزه وجود دارد، امکان کاشت ارقام و لاین‌های زودرس وجود خواهد داشت. لذا شناسایی و معرفی ارقامی با عملکرد دانه بالا و پایدار در شرایط محیطی متفاوت از اولویت‌های برنامه‌های اصلاحی این محصول می‌باشد. بنابراین هدف از این تحقیق بررسی اثر متقابل

جدول ۱- کد و فهرست لاین‌های لوبیا چیتی مورد ارزیابی

Table 1- Code and list of evaluated pinto bean genotypes

ردیف Row	کد ژنوتیپ Genotypes code
G1	KS21331
G2	KS21195
G3	KS21318
G4	KS21168
G5	KS21373
G6	KS21579
G7	KS21583
G8	KS21565
G9	کوشا Kosha
G10	KS21488
G11	KS21284
G12	KS21359
G13	KS21583

در سطح احتمال یک درصد، آزمون $F_{\max}$ هارتلی غیرمعنی‌دار و آزمون بارتلت معنی‌دار شد. با توجه به معنی‌دار شدن آزمون بارتلت، اطمینان کاملی از یکنواختی واریانس اشتباه آزمایش‌های جداگانه وجود نداشت. پیشنهاد می‌شود که از چندین روش جهت ارزیابی یکنواختی واریانس خطاها استفاده شود و در صورت غیرمعنی‌دار شدن تنها یک روش، واریانس خطاها یکنواخت فرض شوند (Valizadeh & Moghaddam, 2010). تبدیل داده‌ها به دلیل اینکه منجر به از دست رفتن قسمتی از اطلاعات و نتیجه‌گیری نادرست در تجزیه پایداری می‌شود (Hugh & Guch, 1988; Haider Shah et al., 2009)، صورت نگرفت. معنی‌دار نشدن آزمون بارتلت و استفاده نکردن از تبدیل داده‌ها توسط محققان دیگری نیز گزارش شده است (Esmailzadeh Moghaddam et al., 2018; Zarei et al., 2012). با این حال و به منظور تصمیم‌گیری درست در کنار روش AMMI و استفاده از پارامترهای پایداری تجزیه AMMI، از مدل روش REML/BLUP نیز استفاده شد.

تجزیه واریانس

تجزیه واریانس مرکب نشان داد که اثرات متقابل ژنوتیپ $\times$ مکان، سال $\times$ مکان و ژنوتیپ $\times$ سال $\times$ مکان در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۴). این امر دلیل بر وجود اختلاف شرایط محیطی در مناطق و سال‌های مورد آزمایش می‌باشد. معنی‌دار شدن اثر سال $\times$ مکان، تأثیر زیاد آن را در معنی‌دار شدن اثر متقابل سه‌گانه نشان می‌دهد. همچنین معنی‌دار شدن اثر متقابل سه‌گانه ژنوتیپ $\times$ سال $\times$ مکان (محیط) نیز نشان می‌دهد که ژنوتیپ‌ها در محیط‌های مختلف پاسخ‌های متفاوتی نشان می‌دهند. به عبارت دیگر، اختلاف بین ژنوتیپ‌ها از محیطی به محیط دیگر یکسان نیست (Amini et al., 2023). در این مورد، علاوه بر تفاوت‌های ژنتیکی بین ژنوتیپ‌ها (علی‌رغم معنی‌دار نشدن اختلاف بین ژنوتیپ‌ها)، تفاوت واکنش آن‌ها نسبت به عوامل جغرافیایی و اقلیمی حاکم بر محیط‌های مختلف نیز مؤثر بوده است، به طوری که تفاوت بین محیط‌ها را می‌توان به تفاوت‌های اقلیمی، خاک و مدیریت زراعی در سال‌ها و مکان‌های مختلف طی دوره رشد گیاه نسبت داد. واکنش ژنوتیپ‌های مختلف به طور معمول به دلیل پاسخ متفاوت ژن‌ها و یا قدرت تظاهر متفاوت آن‌ها در محیط‌های مختلف می‌باشد (Jafari & Farshadfar, 2018). اثر اصلی محیط (مجموع اثرات اصلی و اثر متقابل) و اثر متقابل ژنوتیپ $\times$ محیط (مجموع اثرات دوگانه و سه‌گانه) به ترتیب با ۳۹ و ۴۰ درصد، بیش‌ترین سهم را از مجموع مربعات کل مشاهده‌شده در آزمایش‌ها داشتند. سهم ژنوتیپ از مجموع مربعات کل نیز ۱۵ درصد بود (جدول ۴). بررسی میانگین عملکرد دانه ژنوتیپ‌ها نشان داد که ژنوتیپ‌های G7، G8، G9 و G10 به ترتیب بیش‌ترین و

عملیات آماده‌سازی زمین شامل شخم عمیق پاییزه، شخم سطحی بهار، دیسک و لولر صورت گرفت. عناصر غذایی ماکرو و میکرو براساس آزمون خاک به زمین داده شد. به منظور مهار علف‌های هرز، قبل از کاشت از علف‌کش پیش‌کاشت تریفلورالین به میزان ۱/۵ لیتر در هکتار استفاده گردید. پس از ایجاد جوی و پشته به فواصل ۵۰ سانتی‌متر، نقشه آزمایشی مورد نظر روی زمین اجرا گردید. فواصل بوته‌ها روی ردیف پنج سانتی‌متر در نظر گرفته شد. بین هر کرت آزمایشی (تیمار) یک خط نکاشت لحاظ گردید. بذور هر یک از لاین‌ها روی چهار خط به طول پنج متر کشت شدند. آبیاری با استفاده از نوارهای تیپ انجام گردید. در طول دوران رشد و نمو، مراقبت‌های زراعی شامل مبارزه با آفات و بیماری‌ها و مهار علف‌های هرز صورت گرفت. در زمان رسیدن، تمامی بوته‌های هر کرت به صورت جداگانه برداشت و عملکرد هر کرت پس از خرم‌کوبی تعیین شد.

قبل از تجزیه و تحلیل داده‌ها و محاسبه پارامترهای پایداری، آزمون یکنواختی واریانس خطاهای آزمایشی (آزمون بارتلت) تأیید و سپس تجزیه مرکب داده‌ها انجام شد. آزمون F منابع تغییر براساس امید ریاضی میانگین مربعات و با فرض تصادفی بودن سال‌ها و مکان‌ها (محیط‌ها) و ثلث بودن ژنوتیپ‌ها انجام شد. با توجه به معنی‌دار بودن اثر متقابل ژنوتیپ $\times$ محیط، برای تعیین سازگاری و پایداری ژنوتیپ‌ها از روش تجزیه چند متغیره AMMI استفاده گردید. ضمن انجام تجزیه واریانس AMMI، مقادیر مؤلفه‌های اصلی برای هر ژنوتیپ و محیط، استخراج و با ترسیم بای‌پلات‌های مربوطه، سازگاری عمومی و خصوصی ژنوتیپ‌ها تعیین شد (Rodriguez et al., 2007). در ادامه برای تعیین کمیت پایداری ژنوتیپ‌ها، از تجزیه مقادیر منفرد (SVD: Singular value decomposition) بر روی ماتریس بهترین پیش‌بینی‌های ناآریب خطی (BLUPs) اثرات متقابل ژنوتیپ $\times$ محیط با یک مدل اثر مختلط خطی استفاده گردید و در نهایت چون هدف انتخاب هم‌زمان ژنوتیپ پایدار و پرمحصول بود از کمیت‌های پایداری WAASB و WAASBY برای کمی‌سازی پایداری با معادلات استفاده گردید (Olivoto, Lúcio, da Silva, Marchioro et al., 2019). ژنوتیپ با کمترین مقدار WAASB پایدار در نظر گرفته شد (Yan et al., 2000). برای تجزیه مرکب داده‌ها و آزمون یکنواختی واریانس خطاهای آزمایشی از نرم‌افزار SAS و برای تجزیه AMMI از بسته تجزیه آزمایش‌های چند محیطی با نام studio استفاده گردید (Olivoto, 2019).

نتایج و بحث

به منظور انجام آزمون‌های بارتلت و $F_{\max}$ هارتلی، ابتدا تجزیه واریانس ساده روی عملکرد دانه ژنوتیپ‌ها در هر محیط انجام شد (جدول ۳).

ژنوتیپ‌های G11، G4، G2 و G13 کم‌ترین مقدار عملکرد دانه را داشتند. با توجه به معنی‌دار شدن اثرات متقابل ژنوتیپ × مکان و ژنوتیپ × سال × مکان (ژنوتیپ × محیط) در این آزمایش، صرفاً نمی‌توان براساس میانگین‌ها، ژنوتیپ‌های با عملکرد دلنه بیش‌تر را

انتخاب کرد، بلکه لازم است با انجام تجزیه پایداری، ضمن شناسایی ژنوتیپ‌های با عملکرد دانه بالا، ژنوتیپ‌های با نوسانات عملکرد کم‌تر و سازگار با مناطق مختلف تعیین شوند.

جدول ۲- آمار هواشناسی ایستگاه‌های زنجان، بروجرد، خمین و شهرکرد در دو سال زراعی مورد بررسی

Table 2- Meteorological statistics of the Zanjan, Borojerd, Khomein and Shahrekord stations in the two crop years studied		۱۳۹۹-۱۴۰۰				۱۳۹۹-۱۳۹۸			
		2021-2022				2020-2021			
ماه	ایستگاه	بارندگی (میلی‌متر)	حداقل دما	حداکثر دما	متوسط دما	بارندگی (میلی‌متر)	حداقل دما	حداکثر دما	متوسط دما
Moos	Station	Rain (mm)	Minimum temperature (°C)	Maximum temperature (°C)	average temperature (°C)	Rain (mm)	Minimum temperature (°C)	Maximum temperature (°C)	average temperature (°C)
خرداد	بروجرد	0	10.2	36.6	23.2	5.3	9	41.4	23.6
	Borojerd								
	زنجان	6.9	8.1	29.4	18.7	12.4	9.0	30.8	30.8
	Zanjan								
	خمین	0	16.5	31	24.7	8.5	17.3	32.6	25.9
تیر	Khomein								
	شهرکرد	0	9.8	30.9	20.3	0.8	11	32.5	21.7
	Shahre Kord								
	بروجرد	0	12.8	38.8	26	0	12.6	41	27.2
	Borojerd								
مرداد	زنجان	5.2	13.5	27.9	20.7	6.7	12.6	33.5	17.0
	Zanjan								
	خمین	0	19.1	32.9	26.8	0	20.5	34.9	28.6
	Khomein								
	شهرکرد	0.3	13.5	32.2	22.8	0.1	14.5	34.2	24.3
شهریور	Shahre Kord								
	بروجرد	0	12.6	40.4	27.1	0	13.8	41.6	27.3
	Borojerd								
	زنجان	6.4	14.3	27.9	21.8	36.9	14.0	30.9	22.4
	Zanjan								
مهر	خمین	0	20.4	35.1	28.3	0	20.5	33.9	28.1
	Khomein								
	شهرکرد	0.2	14.8	35.2	25	0.1	14.9	33.1	24
	Shahre Kord								
آبان	بروجرد	0	10	36	23.5	0	7.4	38	24.2
	Borojerd								
	زنجان	0.0	8.7	28.6	18.7	0.2	8.4	30.8	19.6
	Zanjan								
	خمین	0	16.5	29.7	23.6	0	17.7	32.1	25.5
آذر	Khomein								
	شهرکرد	0	10.3	29.8	20	0	10.8	31.4	21.1
	Shahre Kord								
	بروجرد	0	10.3	29.8	20	0	10.8	31.4	21.1
	Borojerd								

جدول ۳- واریانس خطای آزمایشات لوبیا در محیط‌های مختلف به همراه آزمون‌های $F_{\max}$ هارتلی و بارتلت جهت بررسی یکنواختی واریانس‌ها

Table 3- Variance of bean experimental error in different environments along with the $F_{\max}$ Hartley and Bartlett's tests to evaluate the uniformity of variances

سال Year	خمین Khomein	بروجرد Borujerd	زنجان Zanjan	شهرکرد Shahre Kord
سال اول Year 1	55945.83	47991.45	96804.7	50627.46
سال دوم Year 2	52911.86	55511.85	92694.3	52939.74
تست بارتلت Bartlets test		31.039**		
$F_{\max}$ هارتلی $F_{\max}$ Hartley		2.02 ^{ns}		

ns و **: به ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح یک درصد

ns and **: non significant and significant at 1% probability levels, respectively

جدول ۴- تجزیه واریانس مرکب عملکرد دانه ژنوتیپ‌های لوبیا

Table 4- Combined analysis of variance of grain yield of bean genotypes

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی df	مجموع مربعات Sum of square	میانگین مربعات Mean of squares	درصد مجموع مربعات Percentage of sum of square
سال Year	1	31370956.70	31370956.70	0.12
مکان Location	3	44158208.68	14719402.89	0.17
سال × مکان Year × location	3	26914689.96	8971563.32**	0.10
خطای ۱ Error1	16	2110631.64	131914.48	0.01
ژنوتیپ Genotype	12	39005923.08	3250493.59	0.15
ژنوتیپ × سال Genotype × year	12	9587554.43	798962.87	0.04
ژنوتیپ × مکان Genotype × location	36	64202448.53	1783401.35**	0.25
ژنوتیپ × سال × مکان Genotype × year × location	36	26951173.08	748643.70**	0.11
خطای ۲ Error2	192	12130253	61378.4	0.05
ضریب تغییرات CV (%)			10.37	

* و **: به ترتیب معنی‌دار در سطح یک و پنج درصد

* and **: Significant at 5% and 1% probability levels, respectively.

تجزیه AMMI

تجزیه واریانس AMMI (جدول ۵) نشان داد که هفت مؤلفه اصلی اول تا هفتم در سطح یک درصد معنی‌دار بودند و در مجموع نزدیک به ۱۰۰ درصد تغییرات اثر متقابل ژنوتیپ × محیط را توجیه کردند. اولین و دومین مؤلفه اصلی بیشترین سهم (۷۶٪) را در تبیین اثر متقابل ژنوتیپ × محیط نشان دادند. استفاده از ضرایب دو مؤلفه اول

اثر متقابل به‌عنوان ساده‌ترین پارامترهای پایداری جهت انتخاب ژنوتیپ‌ها توسط محققان متعددی انجام گرفته است (Amini et al., 2023; Taherian et al., 2019). بزرگی درصد توجیه واریانس کل، توسط هریک از مؤلفه‌ها نشان‌دهنده قدرت تفکیک بهتر مؤلفه‌ها در تبیین اثر متقابل ژنوتیپ در محیط و اعتبار روابط مشاهده‌شده است. آقایی سرریزه و همکاران (Aghaee Sarbezeh et al., 2012) و

کریم‌زاده و همکاران (Karimzadeh et al., 2020) سهم پایین دو مؤلفه اصلی را در توجیه تغییرات اثر متقابل ژنوتیپ در محیط گزارش کردند. در مقابل، سهم بالای مؤلفه اصلی اول در توجیه اثر متقابل ژنوتیپ در محیط توسط محققان دیگری گزارش شده است که با نتایج تحقیق حاضر مطابقت داشت (Najafi Mirak et al., 2019; 2021).

ژنوتیپ‌های دارای مقادیر بزرگ (مثبت یا منفی) مؤلفه اصلی اول (IPCA1) دارای اثر متقابل بالایی با محیط بودند. در مقابل، ژنوتیپ‌های دارای مقادیر نزدیک به صفر اثر متقابل پایینی داشتند. بر این اساس، ژنوتیپ‌های G6، G9، G11 و G6 دارای مقادیر مؤلفه اصلی اول (IPCA1) نزدیک به صفر بودند و از بین آن‌ها تنها ژنوتیپ G9 دارای عملکرد بالاتر از میانگین عملکرد کل بود که می‌تواند به عنوان ژنوتیپ پایدار با سازگاری عمومی بالا برای تمامی محیط‌ها معرفی شود (جدول ۶ و شکل ۱). از طرف دیگر، محیط‌های Shah2، Khom1، Khom2 و Zan1 دارای کمترین مقدار در اولین محور مؤلفه اصلی (IPCA1) و اثر متقابل ژنوتیپ × محیط بودند و نسبت به محیط‌های دیگر پایداری عملکرد بهتری داشتند و از بین این محیط‌ها، Shah2 و Khom2 میانگین عملکرد بیشتری نسبت به میانگین کل داشتند (جدول ۶). چون مؤلفه اصلی اول ۵۶/۳ درصد از

مجموع مربعات کل را تبیین کرد از مؤلفه اصلی دوم (IPCA2) با میزان تبیین ۱۹/۶۵ درصد نیز استفاده شد. ژنوتیپ‌های G8، G6 و G11 دارای کمترین مقادیر مؤلفه اصلی دوم IPCA2 بودند؛ بنابراین با توجه به عملکرد ژنوتیپ‌ها، ژنوتیپ G6 را نیز می‌توان به عنوان ژنوتیپ پایدار در تمامی محیط‌ها معرفی کرد (جدول ۶ و شکل ۱). در این بای‌پلات ژنوتیپ‌هایی که در نزدیکی یک محیط قرار داشته باشند، سازگاری خصوصی با آن محیط دارند و ژنوتیپ‌هایی که نزدیک به مبدأ مختصات باشند از سازگاری عمومی برخوردارند. محیط Zan1 تا حدودی دارای مقادیر مؤلفه‌های اول و دوم نزدیک به مبدأ مختصات بودند که نشان می‌دهد پتانسیل ایجاد اثر متقابل را دارا نبودند. ژنوتیپ‌هایی که دور از مرکز بای‌پلات هستند به‌ویژه آن‌هایی که در رأس چندضلعی بای‌پلات قرار می‌گیرند، از پایداری عملکرد ضعیفی برخوردار بوده، ولی دارای سازگاری خصوصی با مکان‌هایی هستند که کمترین زاویه را با بردار آن‌ها در بای‌پلات دارند (Gauch 1997; Zobel & Zobel, 1997)؛ بنابراین می‌توان به سازگاری ژنوتیپ G12 با محیط‌های Shah1 و Zan2، ژنوتیپ‌های G2، G3 و G4 با محیط Boro1، ژنوتیپ‌های G9 و G13 با محیط‌های Khom1 و Khom2 و ژنوتیپ‌های G1 و G8 با محیط Boro2 اشاره کرد.

جدول ۵- تجزیه AMMI برای عملکرد دانه ژنوتیپ‌های امیدبخش لوبیا
Table 5- AMMI analysis for grain yield of promising bean genotypes

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean of squares	درصد مجموع مربعات Percentage of sum of square	درصد تجمعی مجموع مربعات Accumulative percentage of sum of square
ENV	7	14634917.85**		
REP(ENV)	16	131904.4		
GEN	12	3250351.14**		
GEN:ENV	84	1199306.21**		
PC1	18	3152809.23**	56.3	56.3
PC2	16	1236961.31**	19.6	76
PC3	14	837710.93**	11.6	87.6
PC4	12	523106.94**	6.2	93.9
PC5	10	320207.07**	3.2	97
PC6	8	221996.51**	1.8	98.8
PC7	6	202749.29**	1.2	100
باقی‌مانده Residuals	192	63174.78		
کل Total	395	904233.19		

* و **: به ترتیب معنی‌دار در سطح یک و پنج درصد

* and **: Significant at 5% and 1% probability levels, respectively.

جدول ۶- مؤلفه‌های اصلی اول تا هفتم برای ژنوتیپ‌های لوبیا

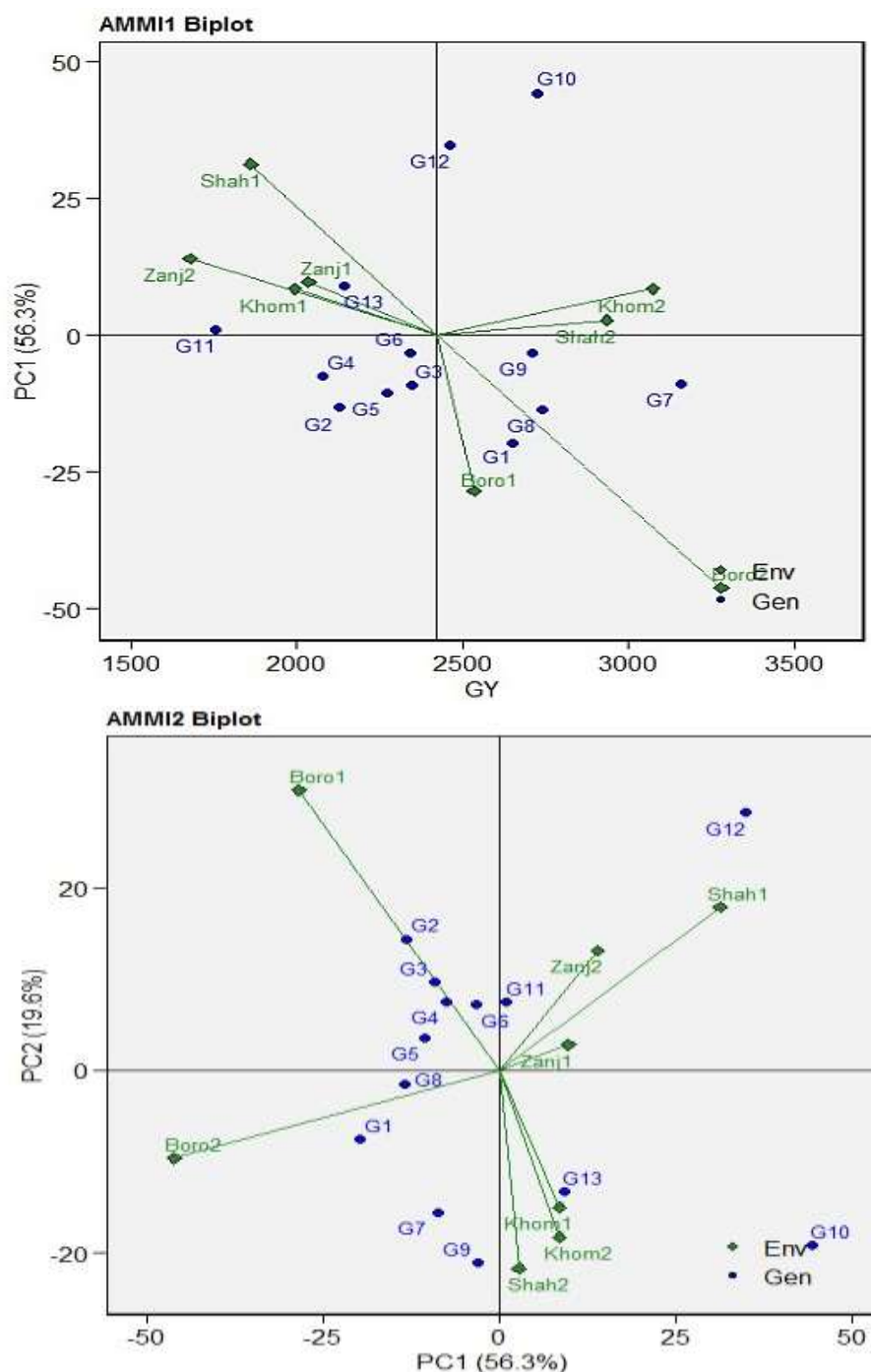
Table 6- First to seventh principal components for bean genotypes

کد Code	عملکرد Yield	مؤلفه اول PC1	مؤلفه دوم PC2	مؤلفه سوم PC3	مؤلفه چهارم PC4	مؤلفه پنجم PC5	مؤلفه ششم PC6	مؤلفه هفتم PC7
G1	2651	-19.8	-7.59	-8.04	-7.02	-9.51	2.8	-4.55
G2	2129	-13.2	14.42	-2.05	-3.06	-11.15	-6.88	-9.35
G3	2345	-9.2	9.68	9.08	5.05	16.13	-5.74	-8.75
G4	2079	-7.6	7.59	-14.5	8.08	4.34	-1.7	-5.08
G5	2270	-10.54	3.55	-20.25	-10.46	-4.58	-2.95	6.99
G6	2343	-3.31	7.2	13.94	-10.48	-4.98	-3.98	12.01
G7	3154	-8.79	-15.6	22.78	-14.91	7.73	-2.88	-2.56
G8	2737	-13.51	-1.49	-1.73	4.61	5.67	21.55	-1.06
G9	2711	-3.16	-21.08	5.28	6.79	-5.54	5.53	5.37
G10	2724	44.21	-19.13	-14.34	-10.57	4.91	-1.78	-5.19
G11	1755	0.99	7.48	-8.74	8.1	13.97	-4.82	13.02
G12	2461	34.8	28.26	11.17	-0.84	-6.56	8.31	-0.57
G13	2143	9.1	-13.29	7.41	24.7	-10.43	-7.44	-0.28
Boro1	2533	-28.41	30.73	19.27	-4.27	-4.56	-8.17	-3.03
Boro2	3278	-46.13	-9.63	-24.39	0.62	0.368	5.62	2.19
Khom1	1995	8.46	-14.99	-3.13	5.21	9.83	-21.43	6.02
Khom2	3073	8.43	-18.29	5.86	14.71	-21.02	0.16	-9.24
Shah1	1862	31.23	17.92	-23.86	-16.02	-7.63	-0.89	-1.42
Shah2	2932	2.76	-21.71	19.12	-24.08	1.42	7.13	4.78
Zanj1	2035	9.73	2.83	1.71	6.27	20.29	7.11	-15.08
Zanj2	1679	13.93	13.13	5.41	17.57	1.3	10.47	15.78

روش REML/BLUP

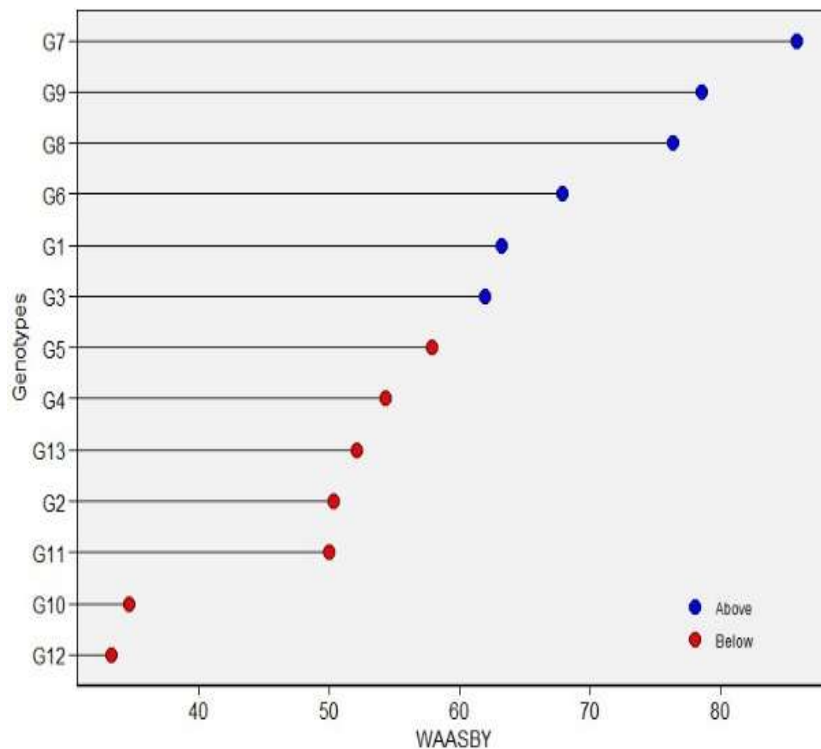
در شکل ۲، رتبه‌بندی ژنوتیپ‌ها با مقادیر WAASBY انجام شده است که نوعی معیار گزینش هم‌زمان مبتنی بر میانگین عملکرد دانه و شاخص پایداری WAASB است. در این نمودار از وزن‌دهی یکسان برای هر دو شاخص عملکرد دانه و شاخص پایداری WAASB استفاده شد که بیانگر اهمیت یکسان هر دو شاخص در گزینش یک ژنوتیپ است. براساس وزن‌دهی ۵۰:۵۰ برای عملکرد و پایداری، ژنوتیپ‌های G1، G3، G6، G7، G8، G9 با داشتن بیشترین مقدار WAASBY ژنوتیپ‌های پایدار و دارای عملکرد دانه بالا بودند. در شکل ۳، این ژنوتیپ‌ها در چارک‌های دوم (G1 با عملکرد بالا، اما ناپایدار)، سوم (G3 و G6 با عملکرد کمتر از میانگین کل، اما پایدار) و چهارم (G7، G8 و G9 پرمحصول و پایدار) جای داشتند. بنابراین به نظر می‌رسد که بسته به وزن دو شاخص پایداری و میانگین عملکرد، می‌توان با مقایسه این دو نمودار به یک ارزیابی فراگیر از پایداری

ژنوتیپ‌ها دست یافت. با توجه به پایین بودن نمرات برخی از ژنوتیپ‌ها در دو IPCA اول، گزینش یا حذف این ژنوتیپ‌ها برپایه آماره‌های مبتنی بر دو مؤلفه اصلی اول ممکن است نتایج اشتباهی را در پی داشته باشد (به‌عنوان مثال ژنوتیپ G11 در تجزیه AMMI نمرات پایینی در هر دو مؤلفه اصلی اول و دوم نشان داد)، از این‌رو شاخص WAASB مبتنی بر ماتریس BLUP می‌تواند مفید باشد. بسیاری از پژوهشگران، ارزش پایداری AMMI یا ASV را برای گزینش و توصیه ژنوتیپ‌های پایدار به کار برده‌اند؛ اما اگر سهم این مؤلفه‌ها در اثر متقابل ژنوتیپ در محیط پایین باشد، تفسیر نتایج باید با احتیاط انجام گردد، زیرا تنها بخش ساده GEI را می‌توان در مؤلفه‌های اصلی نخست مشاهده کرد و ممکن است بخش پیچیده GEI در این بای‌پلات‌ها حذف شده باشد (Olivoto, Lúcio, da Silva, Sari et al., 2019). در چنین مواقعی، نمودار WAASBY (شکل ۲) یا بای‌پلات (شکل ۳) برای شناسایی ژنوتیپ‌های پرمحصول و با پایداری گسترده می‌تواند بهتر باشد.



شکل ۱- نمودار پراکنش ژنوتیپ‌ها و محیط‌های مورد آزمایش با استفاده از میانگین عملکرد و اولین مؤلفه اصلی اثر متقابل (AMMI1) و دو مؤلفه اصلی اول و دوم (AMMI2) براساس مدل AMMI

Figure 1- Scatter plot of genotypes and environments tested using mean yield and IPCA1 (A) and tIPCA1 and IPCA2 (B) based on the AMMI model



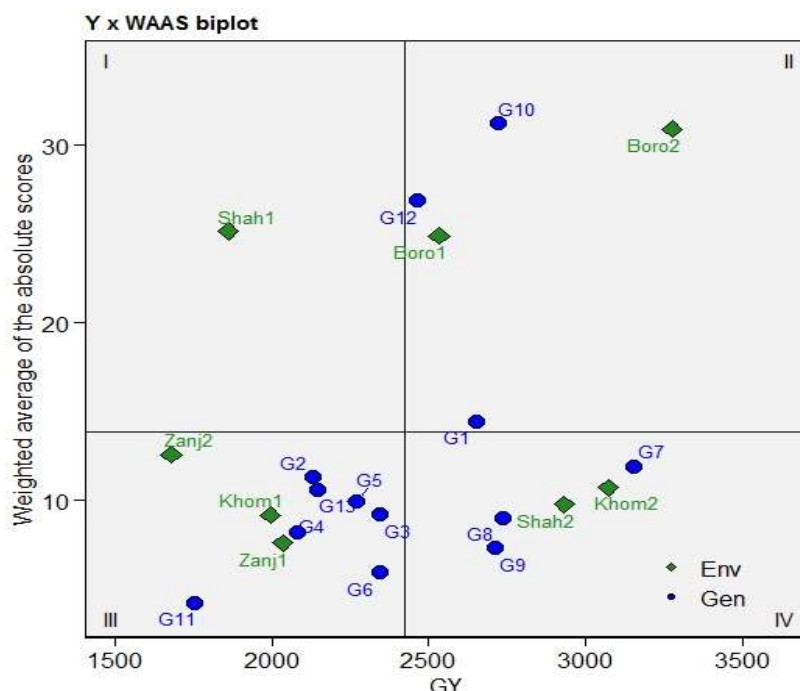
شکل ۲- معیار گزینش هم‌زمان مبتنی بر میانگین عملکرد دانه و شاخص پایداری WAASB برای ۱۳ ژنوتیپ لوبیا با توجه به وزن در نظر گرفته‌شده ۵۰:۵۰ برای عملکرد و پایداری

Figure 2- Simultaneous selection criteria based on average grain yield and WAASB sustainability index for 13 bean genotypes considering the weighting of 50:50 for yield and stability

Boro2 با عملکرد بالا و طولانی جداکنندگی بالا)، محیط ۳ (شامل محیط‌های Zan2 با عملکرد پایین و جداکنندگی بالا و Khom1 و Zan1 با عملکرد پایین و جداکنندگی متوسط) و محیط ۴ (شامل محیط‌های Khom2 و Shah2 با عملکرد بالا و جداکنندگی بالا) بودند. از آنجاکه این نمودار (شکل ۳) براساس شاخص WAASB ترسیم شده است و در محاسبه آن از تمامی مؤلفه‌های اصلی معنی‌دار استفاده شده است، پایداری ژنوتیپ‌ها و همچنین توانایی نمایندگی و جداکنندگی محیط‌ها را به‌خوبی نشان می‌دهد و ژنوتیپ‌های برگزیده با آن، دارای پایداری بهتری هستند (Olivoto, Lúcio, da Silva, Marchioro et al., 2019).

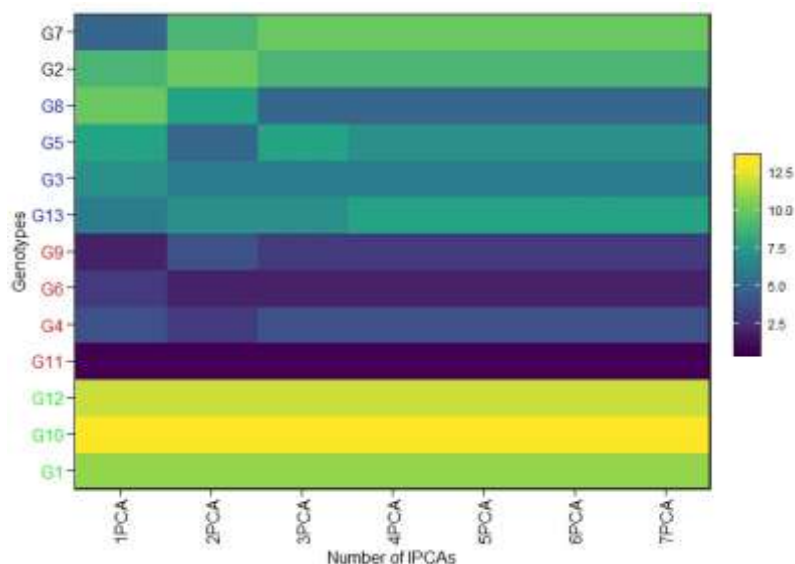
رتبه‌بندی ژنوتیپ‌ها بسته به تعداد محورهای مؤلفه اصلی مورد استفاده برای تخمین شاخص WAASB در شکل ۴ نشان داده شده است. در این نمودار از دندروگرام مبتنی بر فاصله اقلیدسی، برای گروه‌بندی ژنوتیپ‌ها براساس رتبه آن‌ها استفاده شده است. بر این اساس، ژنوتیپ‌های G9، G6، G4 و G11 بر مبنای کلیه مؤلفه‌های اصلی مورد استفاده در محاسبه شاخص WAASB به‌عنوان ژنوتیپ‌های پایدار انتخاب می‌شوند.

بای‌پلات عملکرد دانه در برابر میانگین وزنی نمرات مطلق (WAASB) برای ارزیابی هم‌زمان ژنوتیپ‌ها از نظر میانگین عملکرد دانه و پایداری با شاخص WAASB به کار گرفته شد. در چارک اول این نمودار، هیچ ژنوتیپی قرار نگرفت. ژنوتیپ‌های G1، G10 و G12 در چارک دوم، با آنکه دارای عملکرد بالاتر از میانگین عملکرد کل بودند، اما به دلیل مقدار بالای WAASB ناپایدار بودند. البته ژنوتیپ G1 در این ناحیه با عملکردی بالاتر از میانگین کل، در نزدیک مبدأ بای‌پلات، ژنوتیپی با پایداری عمومی بالا بود. محیط Boro2 با توجه به سهم بالا در اثر متقابل ژنوتیپ × محیط، محیطی با طولانی‌شناسایی بالا بود و بهتر می‌تواند ژنوتیپ‌های پایدار را از یکدیگر جدا کند (Yan & Kang, 2003). ژنوتیپ‌های G2، G5، G13، G3، G11 و G6 در چارک سوم با وجود عملکرد کمتر از میانگین کل، به دلیل مقادیر پایین WAASB پایدار بودند. ژنوتیپ‌های G7، G8 و G9 واقع‌شده در چارک چهارم، دارای عملکرد بیشتر از متوسط عملکرد ژنوتیپ‌ها و پایداری بیشتری نسبت به ژنوتیپ‌های دیگر بودند. محیط‌ها در این بای‌پلات، به‌روشنی به چهار محیط بزرگ تقسیم شدند که شامل محیط ۱ (محیط Shah1 با عملکرد پایین و توانایی جداکنندگی بالا)، محیط ۲ (شامل محیط‌های Boro1 و



شکل ۳- بای پلات عملکرد دانه در مقابل میانگین وزنی نمرات مطلق برای بهترین پیش‌بینی‌های ناریب خطی از اثر متقابل ژنوتیپ‌ها با محیط (WAASB)

Figure 3- Biplot of grain yield versus weighted average absolute scores for the best linear unbiased predictions of genotype-by-environment interaction (WAASB)



شکل ۴- گروه‌بندی ۱۳ ژنوتیپ لوبیا با در نظر گرفتن تمامی مؤلفه‌های اصلی

Figure 4- Grouping of 13 bean genotypes considering all principal components

عملکرد دانه و شاخص پایداری WAASB، وزن‌های متفاوتی داده شده است، به‌طوری که در محور X آن، در سمت چپ وزن ۱۰۰ به شاخص پایداری WAASB و صفر به متغیر عملکرد دانه داده شده است و در نخستین ستون سمت چپ این نمودار، رتبه‌بندی فقط

یکی از مزیت‌های شاخص WAASBY این است که بسته به هدف برنامه به‌نژادی، می‌توان در محاسبه آن به هر یک از دو جزء عملکرد و پایداری عملکرد، وزن‌های متفاوت داد تا سهم هر جزء پررنگ‌تر یا کم‌رنگ‌تر شود. در شکل ۵ به دو شاخص متغیر وابسته

دارای رتبه‌های بالای گزینش هم‌زمان با پایداری و عملکرد دانه WAASBY با وزن برابر برای دو شاخص قرار داشتند.

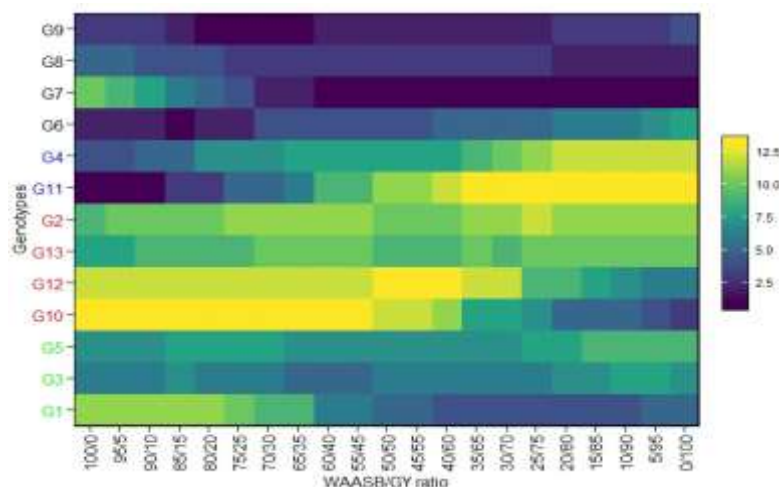
نتیجه‌گیری

در این تحقیق، تجزیه AMMI نشان داد که ۵۶/۳ درصد از واریانس اثر متقابل ژنوتیپ $\times$ محیط توسط مؤلفه اصلی اول توجیه شد که میزان قابل قبولی است. با این حال، با در نظر گرفتن تعداد بیشتری از مؤلفه‌ها، نتایج دقیق‌تر و تفسیر آن‌ها نیز با قابلیت اطمینان بیشتری همراه است. مطالعات متعدد نیز نشان داده‌اند که هرچه در تجزیه AMMI از مؤلفه‌های اصلی بیشتری استفاده شود، نتایج به‌دست‌آمده به شاخص WAASBY نزدیک‌تر می‌شوند و این به‌نوبه خود از برتری ارزیابی با شاخص WAASBY در مقایسه با AMMI ناشی می‌شود. با توجه به نتایج تجزیه AMMI، ژنوتیپ‌های G9 و G6 حدودی SY $\times$ به‌عنوان پایدارترین ژنوتیپ‌ها انتخاب شدند. بای‌پلات SY $\times$ WAASB ژنوتیپ‌های G7، G8 و G9 را به‌عنوان ژنوتیپ‌های پایدار با عملکرد دانه بالا معرفی کرد. در نهایت، برای یک نتیجه‌گیری با اطمینان بالا، استفاده از نمودار WAASBY با وزن‌دهی متغیر از ۵۰:۵۰ برای شاخص WAASB و میانگین عملکرد دانه به نتایج مطمئن‌تری از تجزیه پایداری جهت شناسایی ژنوتیپ‌های منتخب منجر شد. با توجه به اینکه از مدل مخلوط و همچنین تمام مؤلفه‌ها در محاسبه شاخص WAASBY استفاده شد، به نظر می‌رسد که این شاخص، برتر از سایر شاخص‌ها باشد. بنابراین ژنوتیپ‌های G7، G9، G8 و G6 به‌ترتیب در رتبه‌های برتر قرار گرفتند و به‌عنوان ژنوتیپ‌های برتر انتخاب شدند.

براساس شاخص پایداری WAASB انجام شده است. در این نمودار از چپ به راست، در هر ستون به وزن متغیر پاسخ (عملکرد دانه) پنج درصد افزوده و از وزن شاخص پایداری WAASB، پنج درصد کاسته شده است و در آخرین ستون سمت راست، رتبه‌بندی ژنوتیپ‌ها فقط براساس عملکرد دانه (با وزن ۱۰۰ درصد) انجام شده است. نتیجه رتبه‌بندی ۵۰:۵۰ همچون شکل قبلی است که در آن به شاخص پایداری WAASB و متغیر وابسته عملکرد دانه هر دو وزن ۵۰ داده شده بود. در وضعیت ۵۰:۵۰ دیده می‌شود که ژنوتیپ‌های G7، G9، G8 و G6 به‌ترتیب در رتبه‌های برتر قرار گرفتند.

در نخستین ستون سمت چپ، ژنوتیپ‌های G11، G6، G9، G1، G4 و G8 پایدارترین هستند و ژنوتیپ‌های G10، G128، G11 و G7 کمترین پایداری را دارند. البته از آنجاکه در این رتبه‌بندی هیچ‌گونه توجهی به عملکرد دانه ژنوتیپ‌ها نشده است، چنین رتبه‌بندی نمی‌تواند از اعتبار بالایی برخوردار باشد. در آخرین ستون سمت راست هم که رتبه‌بندی فقط براساس عملکرد دانه و بدون توجه به پایداری انجام شده است، ژنوتیپ‌های G7، G8، G9 و G1 برترین ژنوتیپ‌ها از نظر عملکرد دانه بودند و ژنوتیپ‌های G11، G4، G2 و G13 کمترین عملکرد دانه را داشتند.

تقسیم‌بندی ژنوتیپ‌ها براساس رنگ، برای شناسایی گروه‌های ژنوتیپی با نمود مشابه پایداری و عملکرد به کار برده می‌شود. بر این اساس، ژنوتیپ‌های G11 و G4 (رنگ آبی)، ژنوتیپ‌های پایدار کم‌محصول هستند. ژنوتیپ‌های G6، G7، G8 و G9 (رنگ سیاه) ژنوتیپ‌های پایدار پرمحصول هستند. ژنوتیپ‌های G1، G3 و G5 (رنگ سبز)، ژنوتیپ‌های ناپایدار پرمحصول و در انتها ژنوتیپ‌های G10، G12، G13، G20 و G2 (رنگ قرمز) قرار دارند که ناپایدار پرمحصول هستند که براساس شکل ۵ نیز در ژنوتیپ‌های رنگ سیاه



شکل ۵- رتبه‌های ۱۳ ژنوتیپ لوبیا با در نظر گرفتن وزن‌های مختلف برای پایداری و عملکرد

Figure 5- Ranks of 13 bean genotypes considering different weights for stability and yielding

References

- Aghaee-Sarbarzeh, M., Dastfal, M., Farzadi, H., Andarzian, B., Shahbazzpour-Shahbazi, A., Bahari, M., & Rostami, H. (2012). Evaluation of durum wheat genotypes for yield and yield stability in warm and dry areas of Iran. *Seed and Plant Improvement Journal*, 2, 315-325. (In Persian).
- Ahmadi, K., Ebadzadeh, H. R., Hatami, F., Mohammadnia Afrozi, S., Esfandiaripour, E. & Abbastaghani, R. (2021). Agricultural Statistics for the Agricultural Year 1398-99. Volume 1: Crops. Ministry of Agricultural Jihad, Deputy for Planning and Economics, Information and Communication Technology Center.
- Amini, A., Asadi, A. A., Chaichi, M., Ezz-Ahmadi, M., Ghasemi Kalkhoran, M., Eivazi, A. R., Hosseinibay, S. K., Salehi, P., Babaei, T., Godsi, M., & Mirfakhraee, N. (2023). Investigating the stability of promising bread wheat genotypes in cold climate using AMMI and GGE biplot analysis. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 54(3), 119-134. (In Persian). <https://doi.org/10.22059/ijfcs.2023.348569.654940>
- Amiri, S., Arminian, A., & Hosseinian Khoshrou, H. (2023). Evaluation of compatibility and stability of grain yield and evaluation of some agronomic characteristics of chickpea (*Cicer arietinum* L.) genotypes in rainfed conditions. *Journal of Crop Breeding*, 15(45), 219-233. <https://doi.org/10.61186/jcb.15.45.219>
- Asadi, B., Shobeiri S. S., & Asadi, A. A. (2024). Analysis of the genotype $\times$ environment interaction effect for grain yield in red bean genotypes using AMMI and GGE biplot methods. *Journal of Crop Breeding*, 16(1), 86-102. (In Persian). <https://doi.org/10.61186/jcb.16.49.86>
- Bagheri, A., Mahmoudi, A. & Ghezeli, F. (2002). Common Beans: Research for Crop Improvement. Van Schoonhoven, A. & Voysest, O. (Eds.). Wallingford, UK: CAB International. (Persian translation by Academic Center for Education, Culture and Research (ACECR), Mashhad Branch, Iran).
- Brandle, J. E., & Mcverty, P. B. E. (1994). Genotype $\times$ environment interaction and stability of seed yield of oil rapeseed corn-in Manitoba, *Canadian Journal of Plant Science*, 21, 233-240. <https://doi.org/10.4141/cjps88-049>
- Cleveland, D. A. (2001). Is plant breeding science objective truth or social construction? The case of yield stability, *Agriculture and Human Values*, 18, 251-270. <https://doi.org/10.1023/A:1011923222493>
- Danyali, S. F., Razavi, F., Ebadi Segherloo, A., Dehghani, H., & 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), 46-61.
- Dorri, H. R., Lak, M. R., & Assadi, B. (2014). Stability of bean (*Phaseolus vulgaris* L.) genotypes in common bacterial blight condition using regression analysis, the additive main effects and multiplicative interactions (AMMI) and Muir methods, *Iranian Journal of Pulses Research*, 5(2), 119-130. (In Persian). <https://doi.org/10.22067/ijpr.v1393i2.47083>
- Ebdon, J. S., & Guach, H. G. (2002). Additive main effect and multiplicative interaction analysis of national turf grass performance trials. II cultivar recommendations. *Crop Science*, 42, 489-496. <https://doi.org/10.2135/cropsci2002.4890>
- Elakhdar, A., Kumamaru, T., Smith, K. P., Brueggeman, R. S., Capo-chichi, L. J. A., & Solanki, S. (2017). Genotype by environment interactions (GEIs) for barley grain yield under salt stress condition. *Journal of Crop Science and Biotechnology*, 20(3), 193-204. <https://doi.org/10.1007/s12892-017-0016-0>
- Esmailzadeh Moghaddam, M., Tahmasebi, S., Ayeneh, G. A. L. A., Akbari Moghaddam, H., Mahmoudi, K., Sayyahfar, M., Tabib Ghaffari, S. M., & Zali, H. (2018). Yield stability evaluation of bread wheat promising lines using multivariate methods. *Cereal Research*, 8(3), 333-344. (In Persian). <https://doi.org/10.22124/c.2018.10654.1405>
- Esmailzadeh Moghaddam, M., Zakizadeh, M., Akbari Moghaddam, H., Abedini Esfahlani, M., Sayahfar, M., Nikzad, A. R., Tabib Ghafari, S. M., & Lotfali Ayeneh, G. A. (2011). Genotype $\times$ environment interaction and stability of grain yield of bread wheat genotypes in dry and warm areas of Iran. *Seed and Plant Improvement Journal*, 27(2), 257-273. (In Persian).
- FAOSTAT, (2020). FAOSTAT. Food and Agricultural Organization of the United Nations. Available at <https://www.fao.org/3/cc2211en/cc2211en.pdf>.
- Farshadfar, E. (1998). Application of Biometric Genetics in Plant Breeding. Taghe - Bostan Press, Razi University, Kermanshah, Iran, 396 pp. (In Persian).
- Gauch, H. G., & Zobel, R. W. (1996). AMMI analysis of yield trials. p. 85-122. In Kang M.S. & Gauch, H.G. (Eds.) Genotype by Environment Interaction, 1-14 pp. CRC Press. Boca Raton.
- Gauch, H. G., & Zobel, R.W. (1997). Identifying mega-environments and targeting genotypes. *Crop Science*, 31, 311-326. <https://doi.org/10.2135/cropsci1997.0011183X003700020002x>
- Haider Shah, S., Munavar Shah, S., Inayat Khan, M., Ahmed, M., Hussain, I., & Eskridge, K. M. (2009). Non parametric methods in combined heteroscedastic experiments for assessing stability of wheat genotypes in Pakistan. *Pakistan Journal of Botany*, 41, 711-730.

- Hugh, G., & Gauch, G. H. (1988). Model selection and validation for yield trials with interaction. *Biometrics*, 44, 705-715. <https://doi.org/10.2307/2531585>
- Jafari, T., & Farshadfar, E. (2018). Stability analysis of bread wheat genotypes (*Triticum aestivum* L.) by GGE biplot. *Cereal Research*, 8(2), 199-208. (In Persian). SID. <https://sid.ir/paper/367197/en>. <https://doi.org/10.22124/c.2018.6232.1243>
- Kang, M. S., & Magari, R. (1995). Stable: A basic program for calculating stability and yield-stability statistics. *Agronomy Journal*, 87, 276-277. <https://doi.org/10.2134/agronj1995.00021962008700020023x>
- Karimzadeh, R., Hosseinpour, T., Sharifi, P., Alt Jafarby, J., Shahbazi Homonlo, K., & Keshavarzi, K. (2020). Grain yield stability of durum wheat genotypes in semi-warm rainfed regions, *Cereal Research*, 10(2), 135-147. (In Persian). <https://doi.org/10.22124/cr.2020.16274.1589>
- Kaya, Y., Akcura, M., & Taner, S. (2006). GGE-bi-plot analysis of multi environment yield trials in bread wheat. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 30, 325-337.
- Kooshki, M., Ghaedrahmati, M., Assadi, B., Kamel, M., Khorshidi Benam, M., & Dorri, H. (2017). Analysis of yield stability of some white bean (*Phaseolus vulgaris* L.) genotypes using AMMI method. *Seed and Plant Journal*, 32(4), 557-573. <https://doi.org/10.22092/spij.2017.113089>
- Mekbib, F. (2004). Yield stability in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) genotypes. *Biomedical and Sciences*, 130, 147-153. <https://doi.org/10.1023/A:1022878015943>
- Mohammadi, R., & Amri, A. (2013). Genotype $\times$ environment interaction and genetic improvement for yield and yield stability of rainfed durum wheat in Iran. *Euphytica*, 192(2), 227-249. <https://doi.org/10.1007/s10681-012-0839-1>
- Najafi Mirak, T., Agaee Sarbarzeh, M., Moayedi, A., Kaffashi, A., & Sayahfar, M. (2021). Yield stability analysis of durum wheat genotypes using AMMI method. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 31(2), 17-28. <https://doi.org/10.22034/saps.2021.13087>
- Najafi Mirak, T., Moayedi, A. A., Sasani, S., & Ghandi, A. (2019). Evaluation of adaptation and grain yield stability of durum wheat (*Triticum turgidum* L.) genotypes in temperate agro-climate zone of Iran, *Iranian Journal of Crop Sciences*, 21, 127-138. (In Persian). <https://doi.org/10.29252/abj.21.2.127>
- Olivoto, T., Lúcio, A. D., da Silva, J. A., 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>
- Olivoto, T., Lúcio, A. D., da Silva, J. A., Sari, B. G., & Diel, M. I. (2019). Mean performance and stability in multi-environment trials II: Selection based on multiple traits. *Agronomy Journal*, 111(6), 2961-2969. <https://doi.org/10.2134/agronj2019.03.0221>
- Olivoto, T. (2019). Metan: multi environment trials analysis. R package version 1.1.0. <https://github.com/TiagoOlivoto/metan> (accessed 24 June 2019) <https://doi.org/10.1101/2020.01.14.906750>
- Peterson, C. J., Moffatt, J. M., & Erickson, J. R. (1997). Yield stability of hybrid vs. pure line hard winter wheats in regional performance trials. *Crop Science*, 37, 116-120. <https://doi.org/10.2135/cropsci1997.0011183X003700010019x>
- Pezeshkpour, P., Amiri, R., & Jahangiri, A. (2025). Evaluation of performance stability of chickpea genotypes using AMMI, BLUP, MTSI and MGIDI Indexes. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 35(2), 43-62. <https://doi.org/10.22034/saps.2024.60435.3177>
- 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>
- Pezeshkpour, P., & Karimizadeh, R. (2023). Evaluation of the mean performance and stability of chickpea genotypes by integration AMMI and BLUP models and selection based on Multi-Trait Stability Index (MTSI). *Journal of Crop Breeding*, 15(46), 73-83. (In Persian).
- Philipo, M., Ndakidemi, P. A., & Mbega, E. R. (2021). Environmentally stable common bean genotypes for production in different agro-ecological zones of Tanzania. *Heliyon*, 7(21), 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e05973>
- Rodriguez, M., Rau, D., & Papa, R. (2007). Genotype by environment interactions in barley (*Hordeum vulgare* L.): different responses of landraces, recombinant inbred lines and varieties to Mediterranean environment. *Euphytica*, 163(2), 231-247. <https://doi.org/10.1007/s10681-007-9635-8>
- Sellami, M. H., Pulvento, C., & Lavini, A. (2021). Selection of suitable genotypes of lentil (*Lens culinaris* Medik.) under rainfed conditions in south Italy using multi-trait stability index (MTSI). *Agronomy*, 11(9), 1807. <https://doi.org/10.3390/agronomy11091807>

- Semakula, G., & Dixon, A. (2007). Genotype $\times$ environment interaction, stability and agronomic performance of carotenoid -rich cassava clones. *Scientific Research and Essays*.
- Sharifi, P., Sheikh, F., Miri, K., Sekhvat, R., & Asteraki, H. (2022). Evaluation of seed yield stability of faba bean genotypes by linear mixed-effects models (LMM). *Iranian Journal of Field Crop Science*, 53(2), 97-107. (in Persian).
- Taherian, M., Bihamta, M. R., Peyghambari, S. A., Alizadeh, H., & Rasoulnia, A. (2019). Stability analysis and selection of salinity tolerant barley genotypes. *Journal of Crop Breeding*, 11(29), 93-103. (In Persian). <https://doi.org/10.29252/jcb.11.29.93>
- Valizadeh, M., & Moghadam, M. (2010). *Experimental Designs in Agriculture*. Fourth Edition. Privar Publishers, Iran. (in Persian).
- Yan, W., & Tinker, N. A. (2006). Biplot analysis of multi-environment trial data: Principles and applications. *Canadian Journal of Plant Science*, 86, 623-645. <https://doi.org/10.4141/P05-169>
- Yan, W., & Kang, M. S. (2003). *GGE biplot analysis: A graphical tool for breeders, Geneticists and Agronomists*. CRC Press. Boca Raton. FL. USA. 271 p.
- Yan, W., Hunt, L. A., Sheng, Q., & Szlavnic, Z. (2000). Cultivar evaluation and mega environment investigations based on the GGE- biplot. *Crop Science*, 40, 597-605. <https://doi.org/10.2135/cropsci2000.403597x>
- Zarei, L., Farshadfar, E., Haghparast, R., Rajabi, R., Mohammadi Sarab Badieh, M., & Zali, H. (2012). Comparison of different methods of stability evaluation in bread wheat genotypes under drought stress conditions. *Electronic Journal of Crop Breeding*, 5(3), 81-97. (In Persian)