

Evaluation of the Compatibility and Stability of Pinto Bean Genotypes using AMMI and REML/BLUP Methods

Behrouz Asadi¹, Seyedeh Soudabeh Shobeiri², Ali Akbar Asadi³, Foroud Salehi⁴, Hossein Astaraki⁵

1- Seed and Plant improvement Institute, Arak Agriculture and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Arak, Iran

2- Dryland Agricultural Research Institute, 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, Zanjan Agriculture and Natural Resources Research and Education Center (AREEO), Zanjan, Iran

4- Seed and Plant improvement Institute, Chaharmahal and Bakhtiari Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Chaharmahal and Bakhtiari, Iran

5- Seed and Plant improvement Institute, Lorestan Agriculture and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Lorestan, Iran
asadipm@gmail.com

Introduction: In bean 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 introducing stable cultivars with high grain yield in different environmental conditions is one of the priorities of breeding programs for this crop. For this purpose, this study was conducted to investigate the stability of 13 pinto bean genotypes using multivariate methods.

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: Khomein, Boroujerd, Shahrekord, and Zanjan for 2 years. The F-test of sources of variation was performed based on the arithmetic mean square 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: 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, 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.

Conclusion: Due to the use of the mixed model and all components in calculating the WAASBY index, it seems that this index is better than other indices for calculating the stability and compatibility of genotypes. Therefore, using this index, genotypes G9, G7, G8, and G6 were ranked in the top ranks, respectively, and were selected as the best genotypes.

Keywords: AMMI decomposition, Mixture model, Pinto bean, Yield stability index

ارزیابی سازگاری و پایداری عملکرد ژنوتیپ های لوبیا چیتی با استفاده از روش های AMMI و REML/BLUP

بهروز اسدی^۱، سیده سودابه شبیری^۲، علی اکبر اسدی^{۳*}، فرود صالحی^۴، حسین استرکی^۵

۱- موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان

مرکزی، سازمان تحقیقات، آموزش

۲- موسسه تحقیقات کشاورزی دیم کشور، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی زنجان، سازمان

تحقیقات، آموزش و ترویج

۳- بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان زنجان،

سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، زنجان،

۴- موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی چهارمحال و

بختیاری، سازمان تحقیقات،

۵- موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان

لرستان، سازمان تحقیقات، آموزش

asadipm@gmail.com

چکیده:

شناسایی و معرفی ارقام پایدار با عملکرد دانه بالا در شرایط محیطی متفاوت از اولویت های برنامه های اصلاحی لوبیا می باشد. روش های مختلفی جهت ارزیابی اثر متقابل ژنوتیپ × محیط وجود دارد ولی بهترین نتیجه زمانی حاصل می شود که یک ژنوتیپ با روش های مختلف ارزیابی، نتیجه مشابهی از نظر پایداری نشان دهد. به همین منظور، جهت مقایسه عملکرد دانه و سازگاری ژنوتیپ های لوبیا، ۱۲ ژنوتیپ لوبیا چیتی به همراه رقم کوشا در قالب طرح بلوک های کامل تصادفی با سه تکرار در چهار منطقه خمین، بروجرد، شهرکرد و زنجان به مدت ۲ سال کشت شدند. جهت تعیین پایداری و سازگاری ژنوتیپ ها از روش های چندمتغیره AMMI و مدل مخلوط خطی مبتنی بر BLUP و محاسبه کمیت های پایداری WAASBi و WAASBYi برای کمی سازی پایداری استفاده شد. تجزیه واریانس مرکب نشان داد که اثرات متقابل ژنوتیپ × مکان، سال × مکان و ژنوتیپ × سال × مکان معنی دار 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٪ از مجموع مربعات اثر متقابل ژنوتیپ × محیط را تبیین کردند. ژنوتیپ های G11، G9 و G6 دارای IPCA1 نزدیک به صفر بودند و از بین آن ها ژنوتیپ G9 دارای عملکرد بالاتر از میانگین عملکرد کل بود که به عنوان ژنوتیپ پایدار با سازگاری عمومی بالا برای تمامی محیط ها معرفی شد. ژنوتیپ های G6، G8 و G11 دارای کمترین مقادیر IPCA2 بودند؛ بنابراین با توجه به عملکرد ژنوتیپ ها، ژنوتیپ G6 را نیز می توان به عنوان ژنوتیپ پایدار در تمامی محیط ها معرفی کرد. براساس بای پلات AMMI2، ژنوتیپ G12 با محیط Shah1 و Zan2، ژنوتیپ های G2، G3 و G4 با محیط Boro1، ژنوتیپ های G9 و G13 با محیط های Khom1 و Khom2 و ژنوتیپ های G1 و G8 با محیط Boro2 سازگاری نشان دادند. براساس معیار گزینش هم زمان مبتنی بر میانگین عملکرد دانه و شاخص پایداری WAASB، ژنوتیپ های G7، G9، G8، G6، G1 و G3 با داشتن بیشترین مقدار WAASBY ژنوتیپ های پایدار و دارای عملکرد دانه بالا بودند. براساس بای پلات عملکرد دانه در برابر میانگین وزنی نمرات مطلق (WAASB) ژنوتیپ های 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.

کلمات کلیدی: تجزیه AMMI، شاخص پایداری عملکرد، مدل مخلوط، لوبیا چیتی

مقدمه

لوبیای معمولی (*Phaseolus vulgaris* L.) گیاهی یک‌ساله و خودگشن به‌عنوان 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 ۳۲ درصد) می‌باشد (Bagheri *et al.*, 2002). سطح زیر کشت این محصول در جهان حدود ۳۴/۸ میلیون هکتار و میزان تولید آن ۲۷/۵ میلیون تن با متوسط عملکرد ۷۹۱ کیلوگرم در هکتار می‌باشد (FAO, 2020). سطح زیر کشت لوبیا در ایران ۸۹۸۹۸ هکتار و تولید ۲۰۷۳۵۹ تن با عملکرد ۲۳۰۷ کیلوگرم در هکتار می‌باشد (Ahmadi *et al.*, 2021).

در برنامه‌های اصلاحی تولید ارقام با پتانسیل عملکرد بالا، هدف نهایی محققین افزایش تولیدات محصولات کشاورزی است. از آنجا که بخشی از بیان ژن در قالب محیط القاء تنظیم می‌شود، آزمایش ژنوتیپ‌ها در محیط‌های مختلف می‌تواند به شناسایی ژنوتیپ‌های برتر کمک کند. به تغییراتی که در عملکرد نسبی ژنوتیپ‌ها در محیط‌های 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 and Mcverty, 1994; Ebdon and Gauch, 2002). اثر متقابل ژنوتیپ × محیط، از یک‌طرف 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 and 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 (Sabah *et al.*, 2007). 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 غیر معنی‌دار دارند به‌عنوان ژنوتیپ‌های پایدار در نظر گرفته می‌شوند (Semakula and Dixon, 2007)؛ بنابراین از روش‌های کاهش اثرات متقابل محیط و ژنوتیپ، انتخاب ژنوتیپ‌های پایدار است. در صورتی که پایداری یک ژنوتیپ با عوامل ژنتیکی کنترل شود انتخاب ژنوتیپ‌های پایدار موفقیت‌آمیز خواهد بود (Farshadfar, 1998). باین‌حال 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 and 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 باهم 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 and Zobel, 1996). روش تجزیه AMMI توسط محققین 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; Esmailzadeh Moghaddam, 2011; Mohammadi and Amri, 2013; Philipo *et al.*, 2021). با ارزیابی ۹۹ ژنوتیپ مختلف لوبیا در ۳ 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 پر

محصول لوبیای معمولی نتیجه‌گیری کرد که معیارهای واریانس درون مکانی، اکی والانس ریک و واریانس پایداری، موجب انتخاب ارقام پایدار و پر محصول می‌شوند. روش اکی والانس و واریانس پایداری را به خاطر انتخاب ارقام پایدار پر محصول 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 ۴ 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 $\times$ 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 در ۱۶ محیط نشان دادند که دو مؤلفه اصلی اول و دوم به ترتیب ۴۷/۴۹ و ۲۵/۲۵ درصد از اثر متقابل ژنوتیپ $\times$ محیط را توجیه می‌کردند.

مدل اثرات مختلط خطی LMM و روش برآوردگر حداکثر درست نمایی محدود شده REML، از روش‌های مهم دیگری هستند که برای تجزیه داده‌های آزمایش‌های چند محیطی پیشنهاد شده‌اند (Olivoto et al., 2019a). اثر متقابل معنی‌دار ژنوتیپ $\times$ محیط بیانگر این است که عملکرد ژنوتیپ‌ها از محیطی به محیط دیگر دارای نوسان است، بنابراین برآورد بهترین پیش‌بینی‌های ناریب خطی BLUP و انجام تجزیه AMMI بر روی آن‌ها، می‌تواند به شناسایی پایدارترین ژنوتیپ‌ها کمک کند (Olivoto et al., 2019a). در این روش، برای بهره‌گیری از مزایای دو روش AMMI و BLUP با مدل مخلوط خطی مبتنی بر BLUP، یک ماتریس اثر متقابل ژنوتیپ $\times$ محیط به‌دست می‌آید و از تجزیه این ماتریس با تجزیه ارزش منفرد SVD، که پایه تجزیه AMMI است، یک معیار پایداری ژنوتیپی به نام شاخص پایداری میانگین وزنی نمرات مطلق WAASB به‌دست می‌آید که حاصل تلفیق دو روش AMMI و BLUP است (Olivoto et al., 2019b). 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 et al., 2019b). محققین مختلفی از این روش در شناسایی ژنوتیپ‌ها و ارقام پایدار حبوبات استفاده کرده‌اند (Pezeshkpour et al., 2025 and 2023; Amiri et al., 2023; Sharifi et al., 2022; Sellami et al., 2021). پزשکپور و همکاران (Pezeshkpour et al., 2024) با استفاده از شاخص پایداری میانگین وزنی نمرات مطلق بهترین پیش‌بینی ناریب خطی سه ژنوتیپ پر محصول 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 پائیزه وجود دارد امکان کاشت ارقام و لاین‌های زودرس وجود خواهد داشت؛ بنابراین 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 ژنوتیپ در محیط بر روی ۱۳ ژنوتیپ لوبیا چیتی با استفاده از روش‌های تک متغیره پارامتری و ناپارامتری انجام بود.

مواد و روش‌ها

به‌منظور مقایسه عملکرد و بررسی سازگاری ژنوتیپ‌های لوبیا، تعداد ۱۲ ژنوتیپ لوبیا چیتی به همراه رقم کوشا جمعاً ۱۳ ژنوتیپ (جدول ۱)، در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در چهار منطقه خمین، بروجرد، شهرکرد و زنجان به مدت ۲ سال بررسی شدند؛ بنابراین تعداد ۱۳ ژنوتیپ در ۸ محیط مورد بررسی قرار گرفتند. با توجه به اینکه کشور در منطقه خشک و نیمه خشک 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 ۳ مرحله آبیاری را در لوبیا کاهش دهد و باعث افزایش کارایی مصرف آب شود. همچنین در مناطقی از کشور که

سرما و بارندگی‌های زودهنگام پائیزه 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 بین المللی تحقیقات کشاورزی مناطق گرمسیری (CIAT) وارد شده و در قالب دو پروژه تحقیقاتی فوق الذکر مورد ارزیابی قرار گرفته و لاین‌هایی که از 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 گردیدند.

عملیات آماده‌سازی زمین شامل شخم عمیق پائیزه، شخم سطحی بهار، دیسک و لولر صورت گرفت. عناصر غذایی ماکرو و میکرو بر اساس آزمون خاک به زمین داده شد. به‌منظور کنترل 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 بر روی زمین اجرا شد. فواصل بوته‌ها در 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 شد. در طول دوران رشد و نمو مراقبت‌های زراعی شامل مبارزه با آفات و بیماری‌ها و کنترل علف‌های هرز صورت گرفت. در زمان رسیدن تمامی بوته‌های هر کرت به‌صورت جداگانه برداشت و عملکرد هر کرت پس از خرمن‌کوبی تعیین شد.

جدول ۱- کد و فهرست لاین‌های لوبیا چیتی مورد ارزیابی

Table 1. Code and list of evaluated pinto bean genotypes

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

قبل از تجزیه و تحلیل داده‌ها و محاسبه پارامترهای پایداری آزمون یکنواختی واریانس خط‌های آزمایشی (آزمون بارتلت) تأیید و سپس تجزیه مرکب داده‌ها انجام شد. آزمون F منابع تغییر بر اساس امید ریاضی میانگین مربعات و با فرض تصادفی بودن سال‌ها و مکان‌ها (محیط‌ها) و ثابت 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 شد. 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 نأریب خطی (BLUPs) اثرات متقابل ژنوتیپ $\times$ محیط با یک مدل اثر مختلط خطی استفاده شد و درنهایت چون هدف انتخاب هم‌زمان ژنوتیپ پایدار و پر محصول بود از کمیت‌های پایداری WAASB و WAASBY برای کمی سازی پایداری با معادلات استفاده گردید (Olivoto *et al.*, 2019a). ژنوتیپ با کمترین مقدار WAASB، پایدار در نظر گرفته شد (Yan *et al.*, 2000). برای تجزیه مرکب داده‌ها و آزمون یکنواختی واریانس خط‌های آزمایشی از نرم‌افزار SAS و برای تجزیه AMMI از بسته تجزیه آزمایش‌های چند محیطی با نام Metan (Multi environment trail analysis) در نرم‌افزار R-studio انجام شد (Olivoto, 2019).

جدول ۲. آمار هواشناسی ایستگاه های مورد مطالعه در دو سال زراعی مورد بررسی

Table 2. Meteorological statistics of the studied stations in the two crop years studied

۱۳۹۸-۹۹ (2020-2021)						۱۳۹۹-۱۴۰۰ (2021-2022)				
Moon	Location	بارندگی Rain (mm)	حداقل دما Minimum temperature (° C)	حداکثر دما Maximum temperature (° C)	متوسط دما average temperature (° C)	بارندگی Rain (mm)	حداقل دما Minimum temperature (° C)	حداکثر دما Maximum temperature (° C)	متوسط دما average temperature (° C)	
خرداد June	بروجرد	Borjerd	0	10.2	36.6	23.2	5.3	9	41.4	23.6
	زنجان	Zanjan	6.9	8.1	29.4	18.7	12.4	9.0	30.8	30.8
	خمین	Khomein	0	16.5	31	24.7	8.5	17.3	32.6	25.9
	شهرکرد	Shahre kord	0	9.8	30.9	20.3	0.8	11	32.5	21.7
تیر July	بروجرد	Borjerd	0	12.8	38.8	26	0	12.6	41	27.2
	زنجان	Zanjan	5.2	13.5	27.9	20.7	6.7	12.6	33.5	17.0
	خمین	Khomein	0	19.1	32.9	26.8	0	20.5	34.9	28.6
	شهرکرد	Shahre kord	0.3	13.5	32.2	22.8	0.1	14.5	34.2	24.3
مرداد August	بروجرد	Borjerd	0	12.6	40.4	27.1	0	13.8	41.6	27.3
	زنجان	Zanjan	6.4	14.3	27.9	21.8	36.9	14.0	30.9	22.4
	خمین	Khomein	0	20.4	35.1	28.3	0	20.5	33.9	28.1
	شهرکرد	Shahre kord	0.2	14.8	35.2	25	0.1	14.9	33.1	24
شهریور September	بروجرد	Borjerd	0	10	36	23.5	0	7.4	38	24.2
	زنجان	Zanjan	0.0	8.7	28.6	18.7	0.2	8.4	30.8	19.6
	خمین	Khomein	0	16.5	29.7	23.6	0	17.7	32.1	25.5
	شهرکرد	Shahre kord	0	10.3	29.8	20	0	10.8	31.4	21.1

نتایج و بحث

به منظور انجام آزمون های بارتلت و F_{max} هارتلی در ابتدا تجزیه واریانس ساده بر روی عملکرد دانه ژنوتیپ ها در هر محیط انجام شد (جدول ۳). در سطح احتمال یک درصد آزمون F_{max} هارتلی غیر معنی دار و آزمون بارتلت معنی دار شد. با توجه به معنی دار شدن آزمون بارتلت اطمینان کاملی از یکنواختی واریانس اشتباه آزمایش های جداگانه وجود نداشت. پیشنهاد می شود که از چندین روش جهت تست یکنواختی واریانس خطاها استفاده شود و در صورت غیر معنی دار شدن تنها یک روش، واریانس خطاها یکنواخت فرض شوند (Valizadeh, and Moghaddam, 2010). تبدیل داده ها به دلیل این که منجر به از دست رفتن قسمتی از اطلاعات و نتیجه گیری نادرست در تجزیه پایداری می شود (Hugh and Guch, 1988; Haider Shah et al., 2009)، صورت نگرفت. معنی دار نشدن آزمون بارتلت و استفاده نکردن از تبدیل داده ها توسط محققین دیگری نیز گزارش شده است (Esmailzadeh Moghaddam, 2012; Zarei et al., 2018; et al.). با این حال و به منظور تصمیم گیری درست در کنار روش AMMI و استفاده از پارامترهای پایداری تجزیه AMMI، از مدل روش REML/BLUP نیز استفاده شد.

جدول ۳- واریانس خطای آزمایش در محیط های مختلف به همراه آزمون های F_{max} هارتلی و بارتلت جهت بررسی یکنواختی واریانس ها
Table 3. Variance of experimental error in different environments along with the F_{max} Hartley and Bartlett's tests to evaluate the uniformity of variances

Year	Khomein	Borjerd	Zanjan	Shahre kord
سال	خمین	بروجرد	زنجان	شهرکرد
Year1	55945.83	47991.45	96804.7	50627.46
Year2	52911.86	55511.85	92694.3	52939.74
Bartlets test		31.039**		
F_{max} Hartley		2.02 ^{ns}		

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

تجزیه واریانس

تجزیه واریانس مرکب نشان داد که اثرات متقابل ژنوتیپ × مکان، سال × مکان و ژنوتیپ × سال × مکان در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود (جدول ۴). این امر دلیل بر وجود اختلاف شرایط محیطی در مناطق و سال‌های مورد آزمایش می‌باشد. معنی‌دار شدن اثر سال × مکان، تاثیر زیاد آن را در معنی‌دار شدن اثر متقابل سه‌گانه نشان می‌دهد. همچنین، معنی‌دار شدن اثر متقابل سه‌گانه ژنوتیپ × سال × 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 به‌طور معمول به دلیل پاسخ متفاوت ژن‌ها و یا قدرت تظاهر متفاوت آن‌ها در محیط‌های مختلف می‌باشد (Jafari and Farshadfar, 2018). اثر اصلی محیط (مجموع اثرات اصلی و اثر متقابل) و اثر متقابل ژنوتیپ × محیط (مجموع اثرات دوگانه و سه‌گانه) به ترتیب با ۳۹ و ۴۰ درصد، بیش‌ترین سهم را از مجموع مربعات کل مشاهده شده 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 ژنوتیپ‌های G4، G11، 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 بر اساس میانگین‌ها، ژنوتیپ‌های با عملکرد دانه 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 ۴- تجزیه واریانس مرکب عملکرد دانه ژنوتیپ‌های لوبیا

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

Source of variation منابع تغییر	Degree of Freedom درجه آزادی	Sum of square مجموع مربعات	Mean square میانگین مربعات	Percentage of sum of square درصد مجموع مربعات
Year	1	31370956.70	31370956.70	0.12
location	3	44158208.68	14719402.89	0.17
Year×location	3	26914689.96	8971563.32**	0.10
Error1	16	2110631.64	131914.48	0.01
Genotype	12	39005923.08	3250493.59	0.15
Genotype×Year	12	9587554.43	798962.87	0.04
Genotype×Location	36	64202448.53	1783401.35**	0.25
Genotype×Year×Location	36	26951173.08	748643.70**	0.11
Error2	192	12130253	61378.4	0.05
CV%			10.37	

* 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 ۱ 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 به عنوان ساده‌ترین پارامترهای پایداری جهت انتخاب ژنوتیپ‌ها توسط محققین 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 سربزه و همکاران (Aghaee Sarbezeh *et al.*, 2012) و کریم‌زاده و همکاران (Karimizadeh *et al.*, 2020) سهم پایین دو مؤلفه اصلی را در توجیه تغییرات اثر متقابل ژنوتیپ در محیط را گزارش کردند. در مقابل سهم بالای مؤلفه اصلی اول در توجیه اثر متقابل ژنوتیپ در محیط توسط محققین دیگری گزارش شده است که با نتایج تحقیق حاضر مطابقت داشت (Najafi Mirak *et al.*, 2019 and 2021).

جدول ۵- تجزیه AMMI برای عملکرد دانه ژنوتیپ‌های امیدبخش لوبیا

Table 5- AMMI analysis for grain yield of promising bean genotypes

Source of variation منابع تغییر	Degree of Freedom درجه آزادی	Mean square میانگین مربعات	Percentage of sum of square درصد مجموع مربعات	Acumulative percentage of sum of square درصد تجمعی مجموع مربعات
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
Residuals	192	63174.78		
Total	395	904233.19		

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

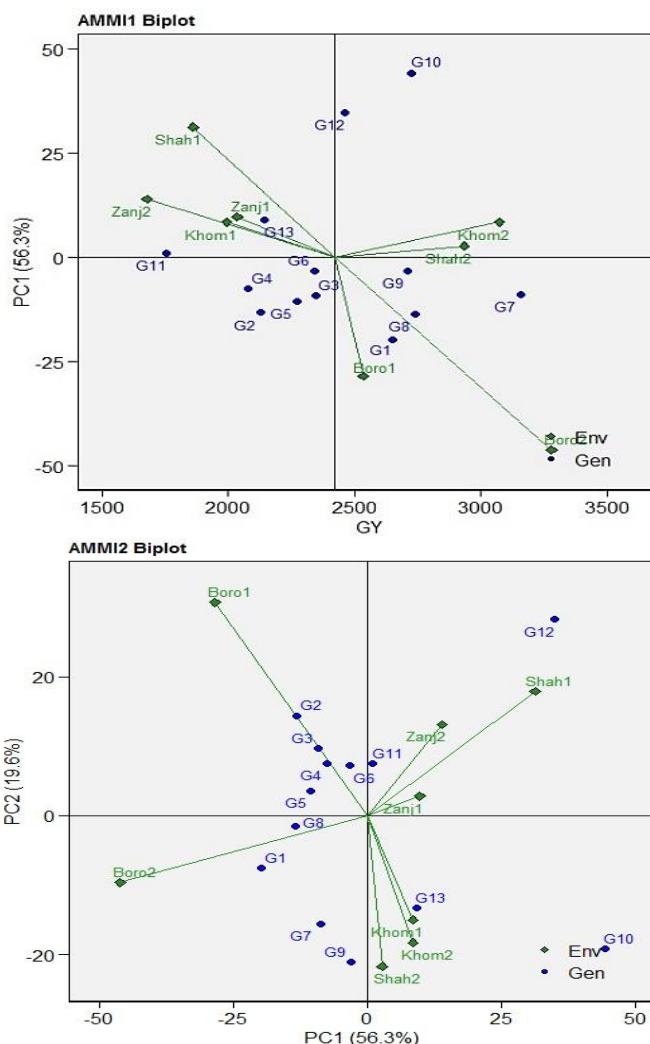
ژنوتیپ‌های دارای مقادیر بزرگ (مثبت یا منفی) مؤلفه اصلی اول (IPCA1) دارای اثر متقابل بالایی با محیط بودند. در مقابل، ژنوتیپ‌های دارای مقادیر نزدیک به صفر اثر متقابل پایینی داشتند. بر این اساس ژنوتیپ‌های G11، G9 و G6 دارای مقادیر مؤلفه اصلی اول (IPCA1) نزدیک به صفر بودند و از بین آن‌ها تنها ژنوتیپ G9 دارای عملکرد بالاتر از میانگین عملکرد کل بود که می‌تواند به‌عنوان 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، Khom2 و Shah2 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 G6، G8 و G11 دارای کمترین مقادیر مؤلفه اصلی دوم (IPCA2) بودند؛ بنابراین با توجه به عملکرد ژنوتیپ‌ها، ژنوتیپ G6 را نیز می‌توان به‌عنوان 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 نبوده‌اند. 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 and 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 ۶- مؤلفه‌های اصلی اول تا هفتم برای ژنوتیپ‌های لوبیا

Table 6- First to seventh principal components for bean genotypes

Code	Y	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	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



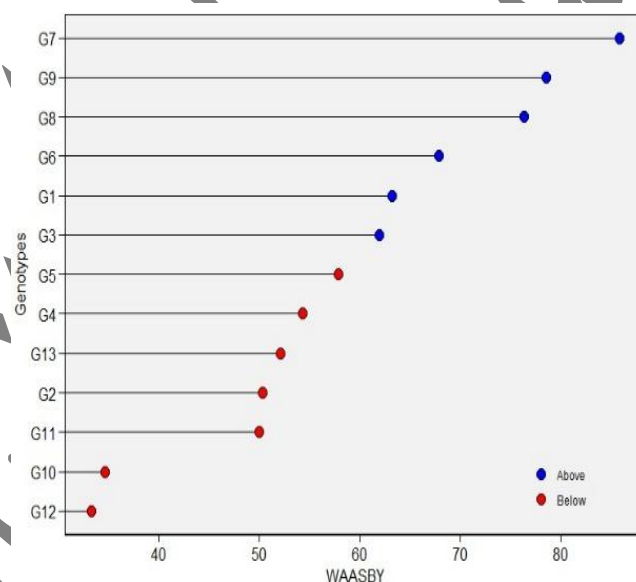
شکل ۱: نمودار پراکنش ژنوتیپ‌ها و محیط‌های مورد آزمایش با استفاده از میانگین عملکرد و اولین مؤلفه اصلی اثر متقابل (AMMI1) و دو مؤلفه اصلی اول و دوم (AMMI2) براساس مدل AMMI

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

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. بر اساس وزن دهی ۵۰:۵۰ برای عملکرد و پایداری، ژنوتیپ‌های G7، G8، G9، G1 و G3 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 پر محصول 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 بر پایه 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 این رو 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 *et al.*, 2019b). در چنین مواقعی، نمودار WAASBY (شکل ۲) یا بای‌پلات (شکل ۳) برای شناسایی ژنوتیپ‌های پر محصول و با پایداری گسترده می‌تواند بهتر باشد.

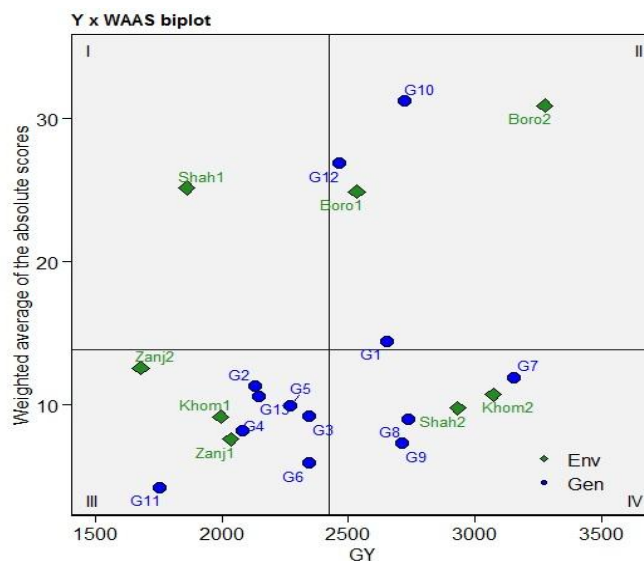


شکل ۲- معیار گزینش هم‌زمان مبتنی بر میانگین عملکرد دانه و شاخص پایداری WAASB برای ۱۳ ژنوتیپ لوبیا با توجه به وزن در نظر گرفته شده ۵۰:۵۰ برای عملکرد و پایداری

Fig 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.

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 Bor02 با توجه به سهم بالا در اثر متقابل ژنوتیپ × محیط، محیطی با توانایی شناسایی بالا بود و بهتر می‌تواند ژنوتیپ‌های پایدار را از یکدیگر جدا کند (Yan and Kang, 2002). ژنوتیپ‌های G2، G5، G13، G3، G11، G4 و G6 در چارک سوم با وجود عملکرد کمتر از میانگین کل، به دلیل مقادیر پایین WAASB پایدار بودند. ژنوتیپ‌های G7، G8 و G9 واقع

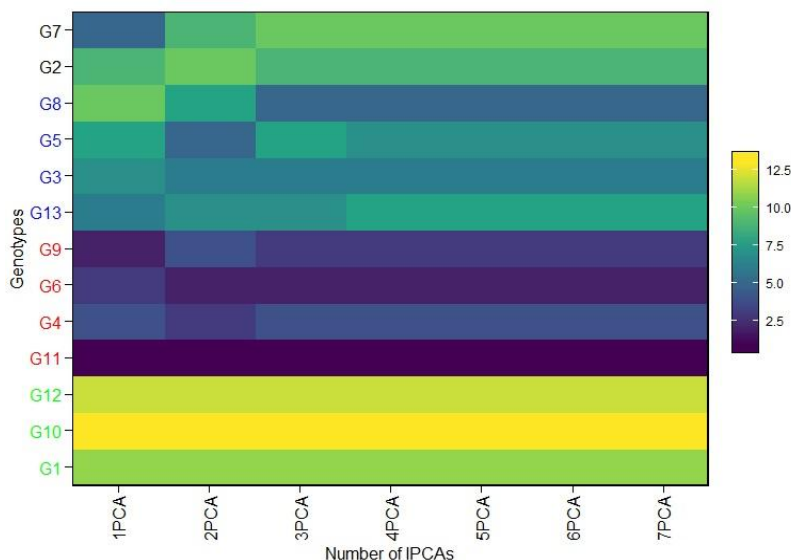
شده در چارک چهارم، دارای عملکرد بیشتر از متوسط عملکرد ژنوتیپ‌ها و پایداری بیشتری نسبت به ژنوتیپ‌های دیگر بودند. محیط‌ها در این بای‌پلات، به‌روشنی به چهار محیط بزرگ تقسیم شدند که شامل محیط ۱ (محیط Shah1 با عملکرد پایین و توانایی جداکنندگی بالا)، محیط ۲ (شامل محیط‌های Boro1 و Boro2 با عملکرد بالا و توانایی جداکنندگی بالا)، محیط ۳ (شامل محیط‌های Zan2 با عملکرد پایین و جداکنندگی بالا و Zan1 با عملکرد پایین و جداکنندگی متوسط) و محیط ۴ (شامل محیط‌های Shah2 و Khom2 با عملکرد بالا و جداکنندگی بالا) بودند. از آنجاکه این نمودار (شکل ۳) بر اساس 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 به خوبی نشان می‌دهد و ژنوتیپ‌های برگزیده با آن، دارای پایداری بهتری هستند (Olivoto et al., 2019a).



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

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

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 بر اساس رتبه آن‌ها استفاده شده است. بر این اساس ژنوتیپ‌های G4، G6، G9 و G11 بر مبنای کلیه مؤلفه‌های اصلی مورد استفاده در محاسبه شاخص WAASB به‌عنوان ژنوتیپ‌های پایدار انتخاب می‌شوند.

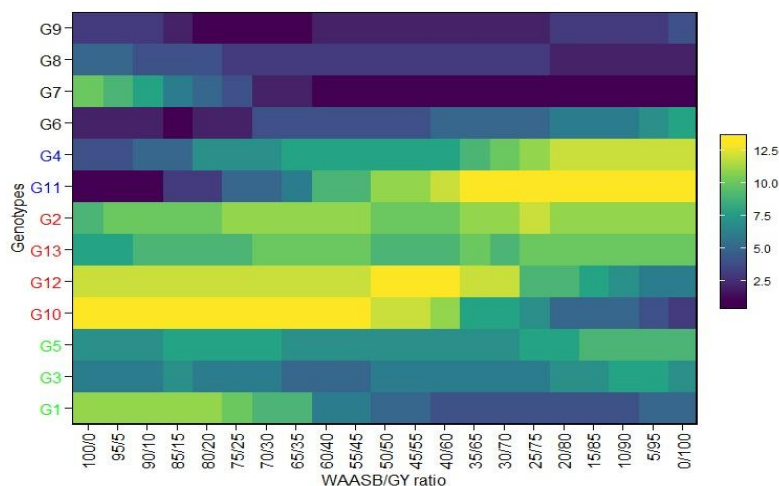


شکل ۴- گروه‌بندی ۱۳ ژنوتیپ لوبیا با در نظر گرفتن تمامی مؤلفه‌های اصلی
Fig 4. Grouping of 13 bean genotypes considering all principal components

یکی از مزیت‌های شاخص WAASBY این است که بسته به هدف برنامه بهنژادی، می‌توان در محاسبه آن به هریک 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 عملکرد دانه و شاخص پایداری WAASB، وزن‌های متفاوتی داده شده است، به طوری 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 بر اساس شاخص پایداری WAASB انجام شده است. در این نمودار از چپ به راست، در هر ستون به وزن متغیر پاسخ (عملکرد دانه) ۵ درصد افزوده و از وزن شاخص پایداری WAASB، ۵ درصد کاسته شده است و در آخرین ستون سمت راست، رتبه‌بندی ژنوتیپ‌ها فقط بر اساس 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، G6 و G1 به ترتیب در رتبه‌های برتر قرار گرفتند.

در نخستین ستون سمت چپ، ژنوتیپ‌های G11، G6، G9، G4، G1 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 بر اساس 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 کم محصول هستند. ژنوتیپ‌های G6، G7، G8 و G9 (رنگ سیاه) ژنوتیپ‌های پایدار پر محصول هستند. ژنوتیپ‌های G1، G3 و G5 (رنگ سبز)، ژنوتیپ‌های ناپایدار پر محصول و در انتها ژنوتیپ‌های G10، G12، G13 و G20 (رنگ قرمز) قرار دارند که ناپایدار پر محصول هستند که بر اساس شکل ۵ نیز در ژنوتیپ‌های رنگ سیاه دارای رتبه‌های بالای گزینش هم‌زمان با پایداری و عملکرد دانه WAASBY با وزن برابر برای دو شاخص قرار داشتند.



شکل ۵- رتبه‌های ۱۳ ژنوتیپ لوبیا با در نظر گرفتن وزن‌های مختلف برای پایداری و عملکرد
Fig 5. Ranks of 13 bean genotypes considering different weights for stability and yielding

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، تجزیه AMMI نشان داد که ۵۶/۳ درصد از واریانس اثر متقابل ژنوتیپ × 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 تا حدودی G6 به‌عنوان پایدارترین ژنوتیپ‌ها انتخاب شدند. بای‌پلات SY × 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 G9، G7، G8 و G6 به ترتیب در رتبه‌های برتر قرار گرفتند و به‌عنوان ژنوتیپ‌های برتر انتخاب شدند.

منابع

Aghaee-Sarbarzeh, M., Dastfal, M., Farzadi, H., Andarzian, B., Shahbazpour-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 with English Summary). DOI: 10.22092/spij.2017.111110

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., Ezt-Ahmadi, M., Ghasemi Kalkhoran, M., Eivazi, A.R., Hosseini, 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 with English Summary). DOI: 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. DOI: 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 with English Summary) DOI:10.61186/jcb.16.49.86

Bagheri, A.R., Mahmoudi, A.A. & Farrokhi Din, Q. (2002). Bean cultivation and breeding (translation) Mashhad University Jihad Publications 5. (In Persian with English Summary)

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. DOI: 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, DOI: 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 with English Summary). DOI: 10.22067/ijpr.v1393i2.47083

Ebdon, J.S. & Guach, H.G. (2002). Additive main effect and multiplicative interaction analysis of national turf grass performance trails. II Cultivar recommendations, *Crop Science*, 42, 489-496.

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. DOI: 10.1007/s12892-017-0016-0

Esmailzadeh Moghaddam, M., Tahmasebi, S., Ayeneh, G.A.L.A., Akbari Moghadam, 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 with English Summary). DOI: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 with English Abstract).

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, 396 pp (In Persian).

Gauch, H.G. & Zobel, R.W. (1997). Identifying mega-environments and targeting genotypes. *Crop Science*, 31, 311-326.

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.

Haider Shah, S., Munavar Shah, S., Inayat Khan, M., Ahmed, M., Hussain, I., & Eskridge, (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.

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 with English Summary), SID. <https://sid.ir/paper/367197/en>. DOI: 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.

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 with English Summary), DOI: 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. DOI: 10.22092/spij.2017.113089

Mekbib, F. (2004). Yield stability in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) genotypes. *Biomedical and Sciences*, 130, 147-153.

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. DOI: 10.1007/978-3-319-22518-0_14.

Najafi Mirak, T., Agae 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. DOI: 10.22034/saps.2021.13087

Najafi Mirak, T., Moayedi, A.A., Sasani, Sh. & 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 with English Abstract), DOI: 10.29252/abj.21.2.127

Olivoto, T., Lúcio, A. D., da Silva, J. A., Marchioro, V. S., de Souza, V. Q., & Jost, E. (2019a). Mean performance and stability in multi-environment trials I: combining features of AMMI and BLUP techniques. *Agronomy Journal*, 111(6), 2949-2960. DOI: 10.2134/agronj2019.03.0220

Olivoto, T., Lúcio, A.D., da Silva, J.A., Sari, B.G., & Diel, M.I. (2019b). Mean performance and stability in multi-environment trials II: Selection based on multiple traits. *Agronomy Journal*, 111(6), 2961-2969. DOI: 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, DOI: 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. DOI: 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. DOI: 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. DOI: 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. DOI: 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., Sekhavat, 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., Bihanta, 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.

Valizadeh, M. & Moghadam, M. (2010). Experimental Designs in Agriculture. Fourth edit. Privar Publishers, Iran.

Yan, W. & Tinker, N.A. (2006). Biplot analysis of multi-environment trial data: Principles and applications, *Canadian Journal of Plant Science*, 86, 623-645.

Yan, W. & Kang, M.S. (2003). GGE biplot analysis: A graphical tool for breeders, Geneticists and Agronomists. CRC Press. Boca Raton. FL. USA. 271p.

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.

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 with English Summary)