

Evaluation of seed yield stability of faba bean genotypes by linear mixed-effects models (LMM)

Peyman Sharifi^{1*}, Fatemeh sheikh², Khaled Miri³, RezaSekhvat⁴, Hossein Asteraki⁵

1. Department of Agronomy and Plant Breeding, Rasht Branch, Islamic Azad University, 2. Crop and Horticultural Science Research Department, Golestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), 3. Seed and Plant Improvement Research Department, Baluchestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), 4. Seed and Plant Improvement Research Department, Safiabad Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, 5. Seed and Plant Improvement Research Department, Lorestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center.

(Received: - Accepted:)

ABSTRACT

To evaluate the yield stability of 19 faba bean genotype, an experiment was conducted in randomized complete block design with three replications in two cropping years (2015-2017) at four areas (Gorgan, Dezful, Boroujerd and Iranshahr). The effect of environment, genotype and interaction effect of genotype and environment were significant on all traits. Nominal yield plot identified G13, G12, G2, G9, G6 and G4 genotypes as more stable genotypes. Based on biplot analysis, G12, G16, G14, G9, G6 and G11 genotypes, had higher yield stability in addition to the highest seed yield. Based on different values for seed yield and weighted average of absolute scores of best linear unbiased predictions (WAASB), G11, G9, G18, G10, G13, G12, G16, G14 and G6 genotypes were high yielding and stable. The superior genotypes based on multi-trait selection index (MTSI) were G2, G18 and 6. The harmonic mean and relative performance of genotypic values (HMRPGV) introduced G14, G6 and G9 genotypes that had high stability and compatibility in addition to high seed yield. Overall, based on all analyzes and indices, G6 genotype identified as the most stable genotype and could be a candidate to introduce a new cultivar.

Keywords: Adaptability, BLUP, Genetic values, LRT, REML.

ارزیابی پایداری عملکرد دانه ژنوتیپ‌های باقلا با مدل اثرهای مختلط خطی (LMM)

پیمان شریفی^{۱*}، فاطمه شریفی^۲، خالد میری^۳، رضا سخاوت^۴، حسین آسترکی^۵

۱- دانشیار، گروه زراعت و اصلاح نباتات، واحد رشت، دانشگاه آزاد اسلامی، رشت، ایران، ۲- استادیار بخش تحقیقات زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان گلستان، ۳- استادیار پژوهشی بخش تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی بلوچستان، ۴- مربی پژوهشی بخش تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی صفی‌آباد دزفول، ۵- محقق، بخش تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان لرستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، بروجرد،

(تاریخ دریافت: - تاریخ پذیرش:)

چکیده

برای ارزیابی پایداری عملکرد دانه ۱۹ ژنوتیپ ژنوتیپ‌های باقلا، آزمایشی در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار در دو سال زراعی (۹۶-۱۳۹۴) و در چهار ناحیه (گرگان، دزفول، بروجرد و ایرانشهر) انجام شد. اثر محیط، ژنوتیپ و برهمکنش ژنوتیپ و محیط بر تمام صفات اندازه‌گیری شده معنی‌دار بود. نمودار عملکرد اسمی، ژنوتیپ‌های ۱۳، ۱۲، دو، نه، شش و چهار را ژنوتیپ‌های پایدارتر از نظر عملکرد دانه شناسایی کرد. بر پایه تجزیه بای‌پلات، ژنوتیپ‌های ۱۲، ۱۶، ۱۴، نه، شش و ۱۱، علاوه بر داشتن بیشترین عملکرد دانه، از پایداری عملکرد بیشتری هم برخوردار بودند. بر پایه مقادیر متفاوت برای عملکرد دانه و شاخص پایداری میانگین وزنی نمرات مطلق بهترین پیش‌بینی‌های ناآریب خطی (WAASB)، ژنوتیپ‌های ۱۱، نه، ۱۸، ۱۰، ۱۳، ۱۲، ۱۶، ۱۴ و شش، پرمحصول و پایدار بودند و ژنوتیپ‌های برتر از نظر شاخص گزینش چند صفتی (MTSI)، ژنوتیپ‌های دو، ۱۸ و شش بودند. شاخص میانگین هارمونیک و عملکرد نسبی ارزش ژنوتیپی (HMRPGV)، ژنوتیپ‌های ۱۴، شش و نه را به‌عنوان ژنوتیپ‌هایی معرفی کرد که علاوه بر عملکرد دانه، از پایداری و سازگاری بالایی نیز برخوردار بودند. در مجموع و بر اساس تمام تجزیه‌ها و شاخص‌ها، ژنوتیپ شش به‌عنوان پایدارترین ژنوتیپ شناسایی شد و می‌تواند نامزد معرفی رقم جدید باشد.

واژه‌های کلیدی: ارزش‌های ژنتیکی، آزمون نسبت درست‌نمایی، بهترین پیش‌بینی‌های ناآریب خطی، حداکثر درست‌نمایی محدود شده، سازگاری.

مقدمه

پیش‌بینی‌های نأریب خطی (BLUP)^۳ به‌دست آمده از برهمکنش ژنوتیپ و محیط انجام می‌شود (Olivoto *et al.*, 2019a). در این روش، از شاخص پایداری میانگین وزنی نمرات مطلق بهترین پیش‌بینی‌های نأریب خطی (WAASB)^۴ و میانگین وزنی شاخص پایداری WAASB و متغیر وابسته (WAASBY)^۵ استفاده می‌شود. Olivoto *et al.* (2019b) شاخص پایداری چند صفتی (MTSI)^۶ بر مبنای تجزیه عاملی را نیز پیشنهاد کرده‌اند که در آن، عملکرد دانه و صفات دیگر و پایداری هر کدام از آن‌ها به‌طور همزمان برای شناسایی ژنوتیپ‌های پایدار استفاده می‌شوند. Sharifi *et al.* (2020) و Karimizadeh *et al.* (2021) از این روش در عدس و برنج استفاده کرده‌اند. Astaraki *et al.* (2020) با ارزیابی ۲۶ ژنوتیپ باقلا در دو سال زراعی، روش REML را برای ارزیابی معنی‌داری اثر ژنوتیپ، محیط و برهمکنش ژنوتیپ و محیط به‌کار بردند. در پژوهشی دیگر، Skovbjerg *et al.* (2019) برای ارزیابی عملکرد دانه ۱۷ وارپته تجاری باقلا با روش REML نشان دادند که مکان و سال، ۷۲ درصد از تغییرات عملکرد دانه را توجیه می‌کرد.

علاوه بر روش بالا، روش میانگین هارمونیک و عملکرد نسبی ارزش ژنوتیپی (HMRPGV)^۷ نیز برای ارزیابی پایداری ژنوتیپ‌ها بر پایه REML/BLUP پیشنهاد شده است (Resende, 2007). روش HMRPGV، اطلاعات مربوط به سازگاری، پایداری و عملکرد را در واحد اندازه‌گیری شده و در همان مقیاس صفت ارزیابی شده ارائه می‌دهد؛ هرچه انحراف معیار رفتار ژنوتیپی در محیط‌ها کمتر باشد، میانگین هارمونیک ارزش‌های ژنوتیپی آن‌ها در محیط‌های مختلف بیشتر خواهد بود (Resende, 2007)؛ بنابراین انتخاب برای بالاترین مقادیر HMRPGV، امکان انتخاب همزمان

باقلا یک منبع غذایی با ارزش برای تولید پروتئین، نشاسته، سلولز و سایر عناصر غذایی برای انسان و بعضی از حیوانات است (Haciseferogullari *et al.*, 2003). از آن‌جا که باقلا همچون دیگر گیاهان زراعی به‌وسیله تنش‌های محیطی و غیرمحیطی مختلف تحت تأثیر قرار می‌گیرد، ارزیابی لاین‌ها و ژنوتیپ‌های مختلف باقلا برای دستیابی به ارقام پایدار از اهمیت بالایی برخوردار است. از این‌رو برای پی بردن به تأثیر عوامل ژنتیکی و یا محیطی بر روی یک صفت، ژنوتیپ‌های مختلف بایستی در چندین محیط مطالعه شوند (Sharifi, 2020).

برهمکنش‌های ژنوتیپ و محیط، پاسخ‌های متفاوت ژنوتیپ‌ها را در محیط‌های مختلف نشان می‌دهد و تغییر در رتبه ژنوتیپ‌ها در محیط‌های مختلف، به برهمکنش معنی‌دار ژنوتیپ در محیط می‌انجامد (Holland, 2006)؛ بنابراین، یکی از جنبه‌های مهم در ارزیابی لاین‌های پیشرفته و امیدبخش، افزون بر عملکرد و ویژگی‌های دیگری همچون مقاومت به آفات و بیماری‌ها، پایداری صفات بررسی شده در آزمایش‌های چند محیطی است که بیانگر نوسان اندک عملکرد در مکان‌ها یا سال‌های مختلف است (Yan & Kang, 2003). تجزیه پایداری برای شناسایی ژنوتیپ‌هایی به کار می‌رود که کمتر تحت تأثیر تغییرات محیطی قرار گیرند و برای طیف وسیعی از محیط‌ها توصیه شوند (Sayar *et al.*, 2013). روش‌های زیادی برای تجزیه پایداری پیشنهاد شده است که روش‌های پارامتری (تک‌متغیره یا چندمتغیره) و ناپارامتری را در بر می‌گیرند. مدل اثرهای مختلط خطی (LMM)^۱ و روش برآوردگر حداکثر درست‌نمایی محدودشده (REML)^۲، از روش‌های مهمی هستند که برای تجزیه داده‌های آزمایش‌های چندمحیطی پیشنهاد شده‌اند (Olivoto *et al.*, 2019a). در این راستا، با تجزیه به مؤلفه‌های اصلی یا تجزیه ارزش منفرد بر روی ماتریس، بهترین

³ Best linear unbiased predictors

⁴Weighted average of absolute scores of best linear unbiased predictions

⁵Weighted average of WAASB and response variable

⁶ Multi-trait stability index

⁷ Harmonic Mean, and of the Relative Performance of Genotypic Values

¹ linear mixed-effects models

² Restricted Estimator Maximum Likelihood

(2019; Tadele *et al.*, 2020). هدف از پژوهش حاضر، شناسایی ژنوتیپ‌های با عملکرد بالا، پایدار از نظر عملکرد دانه و مطلوب از نظر سایر صفات با بهره‌گیری از شاخص‌های مدل اثرهای مختلط خطی (LMM) است.

مواد و روش‌ها

با هدف گزینش ژنوتیپ یا ژنوتیپ‌هایی با عملکرد دانه و پایداری بالا از بین ۱۵ لاین امیدبخش باقلا و چهار رقم شاهد (جدول ۱)، آزمایش حاضر در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار در دو سال زراعی (۹۶-۱۳۹۴) و در چهار منطقه گرگان، دزفول، بروجرد و ایرانشهر (جدول ۲) اجرا شد.

برای عملکرد و پایداری را فراهم می‌کند. از این روش، پژوهشگرانی برای ارزیابی پایداری ژنوتیپ‌های ذرت (Colombari-Filho, 2015)، برنج (Rodvalho *et al.*, 2015) و گندم (Coan *et al.*, 2018) بهره گرفته‌اند.

پژوهشگران با استفاده از روش‌های تک‌متغیره پارامتری و ناپارامتری، ژنوتیپ‌های پایدار باقلا را شناسایی کرده‌اند (Yassin, 2009; Sarparast *et al.*, 2009; Sarparast *et al.*, 2011; Temesgen *et al.*, 2015; Georgieva & Kosev, 2019; Tolessa *et al.*, 2019). از روش‌های چندمتغیره همچون AMMI (از جمله شاخص ASV) و GGE-biplot هم پژوهشگران برای شناسایی ژنوتیپ‌های پایدار باقلا بهره گرفته‌اند (Maalouf *et al.*, 2011; Temesgen *et al.*, 2015; Tolessa *et al.*,

جدول ۱- شماره، منشاء، شجره و کد ژنوتیپ‌های باقلا

Table 2. Code, origin and pedigree of faba bean genotypes

Genotype No.	Origin	Pedigree
G1	ICARDA	Giza Blanca
G2	ICARDA	ILB 3626
G3	ICARDA	FLIP03-61FB
G4	ICARDA	line F6 latt/440/08
G5	ICARDA	FLIP06-23FB
G6	ICARDA	F8/7093/06 - A
G7	Gorgan	Barkat × ILB 1270
G8	Gorgan	Barkat × Giant
G9	Gorgan	Barkat × New momomoth
G10	Gorgan	Barkat × BPL 465
G11	Gorgan	Barkat × 98 264-1
G12	ICARDA	S 2008,033
G13	ICARDA	S 2008,034
G14	ICARDA	FLIP03-069FB
G15	ICARDA	ILB1266×ILB1814
G16	check	Barekat
G17	check	Zereshki
G18	check	Saraziri
G19	check	Baloochi

جدول ۲- متوسط بارندگی سالیانه، ویژگی‌های جغرافیایی، ارتفاع از سطح دریا و کد محیط‌های محل آزمایش

Table 1. Mean annual rainfall, altitude, geographic characteristic of experimental sites and site codes

Location	Altitude (m)	Latitude	longitude	Mean annual rainfall (mm)	Average annual temperature	Environment code	
						First Year	Second year
Gorgan	5	36°54' N	54°25' E	380	19	E1	E5
Dezful	83	32°20' N	48°30' E	250	23.17	E2	E6
Broujerd	1520	33°89' N	48°76' E	390	14.6	E3	E7
Iranshahr	591	27°15' N	60°40' E	106	26.50	E4	E8

صفات تعداد روز تا ۵۰ درصد گلدهی، ارتفاع بوته، تعداد غلاف در بوته، تعداد دانه در غلاف، وزن صد دانه و عملکرد دانه در طول فصل زراعی و پس از برداشت یادداشت‌برداری شدند.

هر کرت دربرگیرنده شش ردیف چهار متری با ۶۰ سانتی‌متر فاصله بین ردیف‌ها بود. در طول آزمایش، عملیات داشت همچون مبارزه با علف‌های هرز، آفات و آبیاری مطابق با نیاز مناطق مورد آزمایش انجام شد.

پیش‌بینی‌های ناریب خطی (BLUPها) به‌دست آمده از برهمکنش‌های ژنوتیپ و محیط (GEI) با یک مدل اثر مختلط خطی (LMM) به‌کار برده شد. اجزای واریانس با روش حداکثر درست‌نمایی محدود شده (REML) برآورد شدند.

پس از تجزیه واریانس داده‌ها، برای برآورد پارامترهای پایداری WAASB و WAASBY (برای انتخاب همزمان بر اساس میانگین عملکرد و پایداری) ریشه‌های مشخصه حاصل از تجزیه AMMI بر روی BLUP، به‌کار برده شدند (رابطه ۱، ۲) و بهترین ژنوتیپ‌ها با این دو شاخص گزینش شدند (Olivoto *et al.*, 2019a). شاخص پایداری چندصفتی (MTSI) نیز از رابطه ۳ برآورد شد (Olivoto *et al.*, 2019b):

$$WAASB_i = \frac{\sum_{k=1}^p |IPCA_{ik} \times EP_k|}{\sum_{k=1}^p EP_k} \quad \text{رابطه ۱}$$

$$WAASBY_i = \frac{\left\{ W_Y \times \left[\left(\frac{GY_i}{GY_{\max}} \right) \times 100 \right] \right\} + \left[W_S \times \left(100 - \frac{WAASB_i}{WAASB_{\min}} \right) \right]}{W_Y + W_S} \quad \text{رابطه ۲}$$

$$MTSI_i = \left[\sum_{j=1}^f (F_{ij} - F_j)^2 \right]^{0.5} \quad \text{رابطه ۳}$$

از شاخص میانگین هارمونیک ارزش‌های ژنوتیپی (HMGV)^۱، مقادیر پایداری ژنوتیپی به‌دست آمد (رابطه ۴). سازگاری ژنوتیپ‌ها بر پایه شاخص عملکرد نسبی ارزش‌های ژنوتیپی (RPGV)^۲ (رابطه ۵) ارزیابی شد و شاخص میانگین هارمونیک و عملکرد نسبی ارزش ژنوتیپی (HMRPGV) (رابطه ۶)، برای ارزیابی همزمان پایداری، سازگاری و عملکرد دانه استفاده شد (Resende, 2007).

$$HMGV = \frac{l}{\sum_{i=1}^l \frac{1}{GV_{ij}}} \quad \text{رابطه ۴}$$

$$RPGV = \frac{1}{l} \left[\frac{\sum GV_{ij}}{\mu_j} \right] \quad \text{رابطه ۵}$$

برای تجزیه‌های آماری، بسته تجزیه آزمایش‌های چندمحیطی با نام Multi (metan Ver. 1.9.0) (environment trial analysis) (Olivoto & Lúcio, 2020)، در محیط نرم‌افزار R به‌کار گرفته شد.

یکنواختی خطاهای آزمایشی در محیط‌ها با روش بارتلت آزموده شد و سپس تجزیه واریانس مرکب داده‌ها با فرض ثابت بودن اثر ژنوتیپ و تصادفی بودن اثر سال و مکان با روش حداکثر درست‌نمایی محدود شده (REML) انجام شد. معنی‌داری اثرهای تصادفی با آزمون نسبت درست‌نمایی (LRT) و اثرهای ثابت با روش کمترین مربعات آزموده شدند (Olivoto *et al.*, 2019a). برای برآورد کمیت‌های پایداری، تجزیه مقادیر منفرد (SVD) بر روی ماتریس بهترین

در رابطه ۱ و ۲، $WAASB_i$: میانگین وزنی نمرات مطلق ژنوتیپ $IPCA_{ik}$: نمره ژنوتیپ k ام در k امین محور مؤلفه اصلی برهمکنش (IPCA)، EP_k : مقدار واریانس توجیه شده توسط k امین $IPCA$ ، $WAASBY_i$: میانگین وزنی پایداری (WAASB) و عملکرد دانه (GY) برای ژنوتیپ i ام، W_Y : وزن داده شده به متغیر پاسخ (در این مورد، عملکرد دانه)، GY_i : میانگین عملکرد دانه ژنوتیپ i ام با توجه به تمام محیط‌ها، GY_{\max} : بالاترین متوسط عملکرد دانه مشاهده شده، W_S : وزن نسبت داده شده به شاخص پایداری $WAASB_i$ ، $WAASB$: میانگین وزنی نمرات مطلق ژنوتیپ $WAASB_{\min}$ و کمترین مقدار $WAASB$ مشاهده شده در بین ژنوتیپ‌ها است.

در رابطه ۳، MTSI: شاخص پایداری چندصفتی برای ژنوتیپ i ام، F_{ij} : نمره j ام ژنوتیپ i ام و F_j : نمره j ام ژنوتیپ ایده‌آل است (Olivoto *et al.*, 2019b).

¹ Harmonic Mean of Genotypic Values, HMGV

² Relative Performance of Genotypic Values, RPGV

حداکثر درست‌نمایی محدودشده (REML) به واریانس فنوتیپی نشان داد که ۷۹/۴۸ درصد از واریانس فنوتیپی به‌وسیله واریانس محیطی و پس از آن ۱۸/۵۶ درصد به‌وسیله واریانس برهمکنش ژنوتیپ و محیط توجیه شد (جدول ۳). پژوهشگران دیگری نیز برهمکنش معنی‌دار ژنوتیپ و محیط بر عملکرد دانه ژنوتیپ‌های باقلا با روش کمترین مربعات (Sarparast *et al.*, 2011; Sharifi *et al.*, 2014) و روش درست‌نمایی محدود شده (Astaraki *et al.*, 2020; Skovbjerg *et al.*, 2019) را گزارش کردند. سهم بالای محیط در تنوع کل برای عملکرد دانه در ژنوتیپ‌های باقلا به‌وسیله پژوهشگران دیگری هم گزارش شده است، به‌طوری که (Tadele *et al.*, 2020) نشان دادند که محیط، ژنوتیپ و برهمکنش آن‌ها به‌ترتیب ۵۸/۰۵، ۱۶/۰۸ و ۱۴/۲۸ درصد از تنوع عملکرد دانه را توجیه می‌کردند. همچنین Temesgen *et al.* (2015) نشان دادند که محیط، ژنوتیپ و برهمکنش آن‌ها به‌ترتیب ۸۹/۲۷، ۲/۱۲ و ۳/۳۱ درصد از تغییرات عملکرد دانه را توجیه کرد. برهمکنش معنی‌دار ژنوتیپ و محیط (GEI) بیانگر این است که عملکرد ژنوتیپ‌ها از محیطی به محیط دیگر دارای نوسان است؛ بنابراین برآورد بهترین پیش‌بینی‌های نأریب خطی (BLUPها) و انجام تجزیه AMMI بر روی آن‌ها می‌تواند به شناسایی پایدارترین ژنوتیپ‌ها کمک کند (Olivoto *et al.*, 2019b).

بررسی پایداری ژنوتیپ‌ها

تفسیر بای‌پلات

در نمودار عملکرد اسمی^۱، هر کدام از ژنوتیپ‌ها یک خط با معادله $y=a+bx$ دارند که در آن x : نمره محور مؤلفه اصلی اول (IPCA1) محیطی، a : میانگین کل هر ژنوتیپ و b : نمره اولین مؤلفه اصلی (IPCA1) هر ژنوتیپ است (شکل ۱). بر پایه این نمودار، ژنوتیپ‌های هفت، ۱۵، ۱ و ۱۷ با بیشترین نمره‌های مؤلفه اصلی اول (ضرایب b یا شیب خط)، بیشترین سهم را در برهمکنش ژنوتیپ و محیط داشتند و ناپایدارترین ژنوتیپ‌ها بودند. در سوی دیگر،

رابطه ۶

$$HMRPGV = \frac{l}{\sum_{i=1}^l RPGV_{ij}}$$

که در این روابط، μ_j : میانگین کلی برای هر محیط j ، و l : تعداد محیط‌ها است.

در رابطه $GV_{ij} = u_j + g_i + ge_{ij}$: ارزش ژنوتیپی i امین ژنوتیپ و محیط خاص j ، u_j : میانگین محیط j و ge_{ij} : به‌ترتیب ارزش‌های BLUP ژنوتیپ i و برهمکنش بین ژنوتیپ i و محیط j هستند.

نتایج و بحث

ارزیابی فاکتورهای تصادفی و ثابت، برآورد اجزای واریانس و تخمین میانگین‌های پیش‌بینی شده

آزمون اسکری^۱ نشان داد که سه مؤلفه اصلی اول، به‌ترتیب ۴۷/۵۵، ۳۳/۵۴ و ۱۱/۵۳ درصد از تغییرات برهمکنش ژنوتیپ و محیط به‌دست آمده از BLUP را برای عملکرد دانه و روی هم، ۹۲/۶۲ درصد از تغییرات را توجیه می‌کردند. اثر شش مؤلفه اصلی اول در برهمکنش ژنوتیپ و محیط معنی‌دار بود (نتایج ارائه نشده است). همانند نتیجه پژوهش حاضر، Georgieva & Kosev (2019) هم سهم نسبتاً بالای مؤلفه‌های اصلی اول در توجیه برهمکنش ژنوتیپ و محیط در باقلا گزارش کردند.

با توجه به تصادفی بودن اثر محیط و برهمکنش ژنوتیپ و محیط، از آزمون نسبت درست‌نمایی (LRT)^۲ برای ارزیابی آن‌ها استفاده شد که نتایج نشان داد، اثر محیط و برهمکنش ژنوتیپ و محیط بر تعداد روز تا گلدهی، ارتفاع بوته، وزن صد دانه، طول غلاف، تعداد دانه در غلاف و عملکرد دانه معنی‌دار بود. با توجه به ثابت بودن اثر ژنوتیپ، برای ارزیابی آن از روش کمترین میانگین مربعات استفاده شد که نتایج نشان داد، اثر ژنوتیپ بر همه صفات معنی‌دار بود (جدول ۳). نسبت اجزای واریانس برآورد شده با روش

^۱ Sreest test

^۲ Likelihood ratio tests

^۲. Nominal yield

ژنوتیپ‌های ۱۳، ۱۲، دو، نه، شش و چهار با داشتن کمترین شیب خط و سهمی اندک در برهمکنش داشتند. ژنوتیپ و محیط، پایداری عملکرد دانه بیشتری داشتند.

جدول ۳- ارزیابی معنی‌داری فاکتورها در مدل مختلط برای اثرهای تصادفی با آزمون نسبت درست‌نمایی و برای اثر ثابت ژنوتیپ با تجزیه واریانس و برآورد اجزای واریانس با روش حداکثر درست‌نمایی محدود شده برای صفات مطالعه شده.

Table 3. Significance of factors evaluation for random effects by LRT (χ^2) and for fixed effects by ANOVA and estimation of variance components by REML for studied traits.

SOV	Day to Flowering	Plant Height	Pod Length	Seed per Plant	Hundred Seed Weight	Grain Yield
MSG						
G	2.10**	66.79**	18.19**	0.75**	332.4**	75998**
LRT (χ^2)						
Env	107.8**	79.47**	70.12**	31.21**	46.91**	85.57**
Env×Gen	243.4**	148.8*	257.6**	63.90**	265.1**	537.9**
Variance components						
REML ‡						
Estimates (%)						
σ^2_E	287.3 (98.80)	454.7 (85.02)	45.25 (75.61)	0.16 (37.83)	245.0 (44.36)	1266383 (79.48)
$\sigma^2_{E/R}$	0.13 (0.047)	0.03 (0.0065)	0.108 (0.18)	0.005 (1.15)	2.55 (0.46)	1627 (0.10)
σ^2_i	2.46 (0.84)	48.34 (9.03)	10.83 (18.09)	0.11 (25.48)	230.1 (41.65)	295649 (18.56)
σ^2_e	0.87 (0.31)	31.75 (5.93)	3.66 (6.11)	0.17 (35.53)	74.74 (13.53)	29642 (1.86)
σ^2_P	290.7	534.9	59.84	0.44	552.4	1593300

ns، * و **: غیر معنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد. σ^2_E : واریانس محیطی؛ $\sigma^2_{E/R}$: واریانس محیط/بلوک؛ σ^2_i : واریانس ژنوتیپ × محیط؛ σ^2_e : واریانس مقادیر باقیمانده؛ σ^2_P : واریانس فنوتیپی؛ REML: پارامترهای برآورد شده به روش حداکثر درست‌نمایی محدود شده. ns, * and **: Non-significant and significant at 5% and 1% of probability levels, respectively. σ^2 : environmental variance; $\sigma^2_{Env/block}$ variance; σ^2_i : variance of G × E interaction; $\sigma^2_{Residual}$: residual variance; σ^2_P : phenotypic variance.

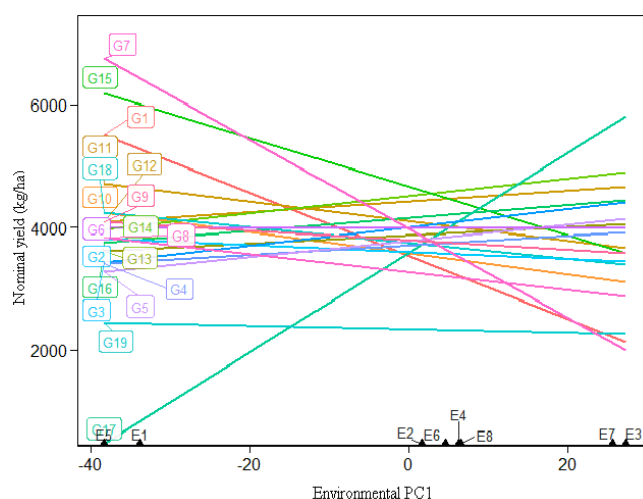
و نمودار اسمی بر اساس آن کشیده شده است و نتیجه‌گیری بر پایه آن می‌تواند همراه با اشکال باشد (Olivoto *et al.*, 2019a). از این‌رو برای نتیجه‌گیری با پشتوانه بهتر، شناسایی ژنوتیپ‌های پایدار بر پایه شاخص‌ها و نمودارهایی انجام شد که در آن‌ها از تمام مؤلفه‌های اصلی معنی‌دار (شش مؤلفه اصلی اول) بهره گرفته شده بود. پژوهشگران دیگری نیز نمودارهای بای‌پلات را برای شناسایی ژنوتیپ‌های پایدار باقلا به‌کار برده‌اند (Maalouf *et al.*, 2011; Temesgen *et al.*, 2015; Tolessa *et al.*, 2019; Tadele *et al.*, 2020).

بای‌پلات نوع سوم (عملکرد دانه در برابر میانگین وزنی نمرات مطلق (WAASB))، برای ارزیابی همزمان ژنوتیپ‌ها از نظر میانگین عملکرد دانه و پایداری با شاخص WAASB به‌کار گرفته شد (شکل ۲). در چارک اول این نمودار، ژنوتیپ‌های یک، ۱۹ و ۱۷ دارای عملکردی کمتر از متوسط و همچنین ناپایدار از

ژنوتیپ‌های ۱۴، ۱۵ و ۱۲ با بیشترین میزان عملکرد دانه (جدول ۴)، الگوهای متفاوتی از نظر پایداری داشتند، به‌طوری‌که ژنوتیپ ۱۵ و در پی آن ژنوتیپ ۱۴ با دارا بودن شیب خط بالا (به‌ترتیب ۲۲/۲۹- و ۹/۴۱)، ژنوتیپ‌های ناپایداری از نظر عملکرد دانه بودند، حال آن‌که ژنوتیپ ۱۲ با شیب خط پایین (۲/۸۷)، ژنوتیپی پایدار و دارای عملکرد دانه بالا بود. این نمودار برای پیشنهاد ژنوتیپ‌های سازگار برای هر محیط، با توجه به این‌که هیچ ژنوتیپی در همه‌جا و همیشه برتر نیست، مناسب است (Olivoto *et al.*, 2019a). بنابراین، ژنوتیپ‌های هفت و ۱۵، سازگارترین ژنوتیپ‌ها برای محیط‌های یک و پنج (گرگان سال اول و دوم) و ژنوتیپ‌های شش، ۱۴ و ۱۶، بهترین ژنوتیپ‌ها برای محیط‌های سه و هفت (بروجرد در دو سال آزمایش) بودند. البته نباید این نکته نادیده گرفته شود که مؤلفه اصلی اول، فقط ۴۷/۵۵ درصد از تغییرات برهمکنش ژنوتیپ و محیط را توجیه می‌کند

ناپایدار بودند. محیط‌های یک، پنج (گرگان در دو سال)، سه و هفت (بروجرد در دو سال)، با توجه به سهم بالا در برهمکنش ژنوتیپ و محیط، محیط‌هایی با توانایی شناسایی بالا بودند و بهتر می‌توانند ژنوتیپ‌های پایدار را از یکدیگر جدا کنند (Yan & Kang, 2003).

نظر شاخص WAASB بودند. این سه ژنوتیپ (به‌ویژه ژنوتیپ ۱۹، شاهد بلوچی)، مناسب محیط‌های چهار و هشت (ایران‌شهر در دو سال) بودند. ژنوتیپ سه در این ناحیه در نزدیک مبدأ بای‌پلات، ژنوتیپی با پایداری عمومی بالا بود؛ ژنوتیپ‌های هفت و ۱۵ در چارک دوم، با آن‌که دارای عملکردی بالاتر از میانگین عملکرد کل بودند، اما به‌دلیل مقدار بالای WAASB



شکل ۱- نمودار عملکرد اسمی دانه ژنوتیپ‌های باقلا.

Figure 1. Nominal grain yield plot of faba bean genotypes.

جدول ۴- رتبه‌بندی ژنوتیپ‌ها بر پایه پارامترهای سازگاری ارزش‌های ژنوتیپی برای عملکرد دانه ژنوتیپ‌های باقلا.

Table 4. Faba bean genotypes ranking based on the adaptability parameters of genotypic values for seed yield of faba bean genotypes.

GE	Y	HMG	HMGV orde	RPG	RPGV	RPGV orde	HMRPG	HMRPGV	HMRPGV orde
G1	268	2220	14	0.9	2680	16	0.85	2540	16
G2	257	2073	19	0.84	2506	19	0.83	2470	17
G3	294	2081	18	0.95	2817	13	0.87	2594	15
G4	280	2201	15	0.92	2728	15	0.89	2646	14
G5	284	2386	13	0.94	2807	14	0.93	2772	13
G6	326	2953	2	1.13	3351	2	1.12	3313	2
G7	312	2469	10	1.02	3024	9	0.98	2918	9
G8	284	2609	8	1	2958	10	0.97	2883	10
G9	311	2859	3	1.08	3217	6	1.07	3180	6
G10	284	2386	12	0.96	2838	12	0.94	2782	12
G11	312	2702	7	1.05	3115	7	1.05	3107	7
G12	328	2721	5	1.1	3268	4	1.08	3194	4
G13	309	2592	9	1.03	3048	8	1.02	3024	8
G14	347	3086	1	1.19	3547	1	1.17	3476	1
G15	343	2716	6	1.11	3304	3	1.09	3244	3
G16	319	2782	4	1.09	3225	5	1.07	3190	5
G17	261	2139	17	0.88	2620	17	0.81	2396	18
G18	291	2452	11	0.97	2874	11	0.96	2861	11
G19	225	2184	16	0.85	2524	18	0.76	2259	19

بر عملکرد کم، از توانایی جداکنندگی پایین‌تری نیز برخوردار بودند. ژنوتیپ‌های ۱۲، ۱۳، ۱۶، ۱۴، نه، شش و ۱۱ در چارک چهارم، دارای عملکردی بیشتر از متوسط عملکرد ژنوتیپ‌ها و پایداری بیشتر نسبت به

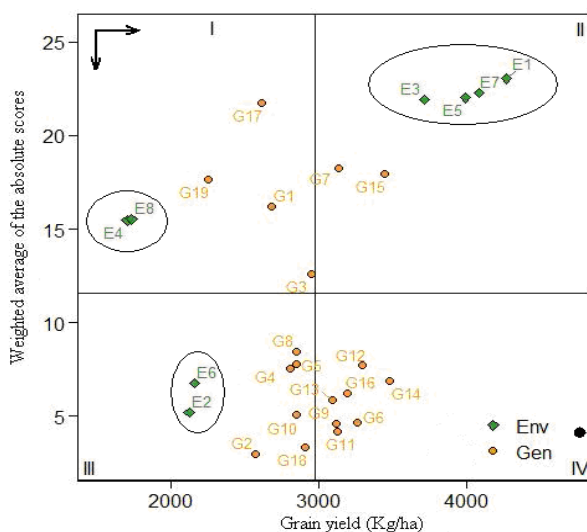
ژنوتیپ‌های هشت، چهار، پنج، ۱۰، دو و ۱۸ در چارک سوم با، وجود عملکرد کمتر از میانگین کل، به‌دلیل مقادیر پایین WAASB، پایدار بودند. محیط‌های دو و شش در این ناحیه (دزفول در دو سال آزمایش)، علاوه

پایداری و متغیر وابسته (عملکرد دانه)

در ستون‌های مختلف شکل ۳، وزن‌های متفاوتی به متغیر وابسته و شاخص پایداری داده شده است، به طوری که در اولین ستون سمت چپ و بر اساس وزن دهی ۱۰۰ برای شاخص پایداری WAASB، ژنوتیپ دو و در پی آن ژنوتیپ‌های ۱۸، ۱۰، ۱۱ و نه (با توجه به رنگ و راهنمای نمودار) پایدارترین ژنوتیپ‌ها بودند. در هر ستون از چپ به راست، بر وزن متغیر پاسخ به اندازه پنج درصد افزوده و از وزن شاخص پایداری (WAASB) به میزان پنج درصد کاسته شد، به طوری که در آخرین ستون سمت راست، رتبه‌بندی ژنوتیپ‌ها فقط بر اساس عملکرد دانه بود. بر این اساس، ژنوتیپ‌های ۱۵، ۱۴، ۱۲، شش، ۱۶ و هفت، عملکرد بیشتری در مقایسه با ژنوتیپ‌های دیگر داشتند.

ژنوتیپ‌های دیگر بودند. محیط‌ها در این بای‌پلات، به روشنی به سه محیط بزرگ تقسیم شدند که شامل محیط‌های دو و شش (درفول در دو سال آزمایش) با عملکرد و توانایی جداکنندگی پایین، محیط‌های چهار و هشت (ایران‌شهر در دو سال آزمایش) با کمترین عملکرد و توانایی جداکنندگی متوسط و محیط‌های یک، پنج، سه و هفت (به ترتیب گرگان و بروجرد در دو سال آزمایش) با عملکرد و توانایی جداکنندگی بالا بودند. از آن جا که این نمودار بر اساس شاخص WAASB کشیده شده است که در محاسبه آن از تمامی مؤلفه‌های اصلی معنی‌دار استفاده شده است، پایداری ژنوتیپ‌ها و همچنین توانایی نمایانندگی و جداکنندگی محیط‌ها را به خوبی نشان می‌دهد و ژنوتیپ‌های برگزیده با آن دارای پایداری بهتری هستند (Olivoto *et al.*, 2019a).

رتبه‌بندی ژنوتیپ با توجه به وزن دهی شاخص



شکل ۲- بای‌پلات عملکرد دانه در مقابل WAASB. دایره سیاه در گوشه سمت راست، یک ژنوتیپ فرضی بسیار پرمحصول و کاملاً پایدار و فلش‌های افقی و عمودی سیاه در گوشه سمت چپ، به ترتیب جهت افزایش عملکرد و پایداری را نشان می‌دهند.
Figure 2. Biplot of the grain yield vs WAASB. Black circle in the right corner and horizontal and vertical black arrows in the left corner indicates a hypothetical highly productive and broadly adapted and the direction of the increase in yield and stability, respectively.

عملکرد دانه نسبت به شاخص پایداری (۶۵ به ۳۵) انجام شده است که در آن، ژنوتیپ‌های ۱۴، شش، ۱۲، ۱۶، ۱۱، نه، ۱۳، ۱۵، ۱۸ و ۱۰ نسبت به ژنوتیپ‌های دیگر برتر بودند. در سمت چپ این نمودار، ژنوتیپ‌ها بر پایه نمود عملکرد و پایداری به چهار خوشه تقسیم

در این نمودار و با توجه به وزن‌های مختلف بر پایه هر کدام از دو شاخص پایداری و عملکرد دانه، می‌توان ژنوتیپ‌های برتر را شناسایی کرد. در مستطیل مشکی، گزینش همزمان ژنوتیپ‌ها بر پایه میانگین عملکرد دانه و شاخص پایداری (WAASB) با وزن بیشتر برای

می‌کند (Resende, 2007).

نتیجه‌گیری کلی

با توجه به معنی‌دار بودن اثر محیط، ژنوتیپ و برهمکنش ژنوتیپ و محیط بر عملکرد دانه و صفات دیگر، تجزیه‌های بعدی برای شناسایی ژنوتیپ‌های برتر انجام شد. نمودار عملکرد اسمی نشان داد که ژنوتیپ‌های ۱۳، ۱۲، دو، نه، شش و چهار با داشتن کمترین شیب خط، پایداری بیشتری در عملکرد دانه داشتند. بر پایه بای‌پلات نوع سوم، ژنوتیپ‌های ۱۲، ۱۳، ۱۶، ۱۴، نه، شش و ۱۱ دارای عملکردی بیشتر از متوسط عملکرد ژنوتیپ‌ها و پایداری بیشتر نسبت به ژنوتیپ‌های دیگر بودند. رتبه‌بندی ژنوتیپ‌ها بر پایه وزن‌های متفاوت برای متغیر وابسته و شاخص پایداری (WAASB) نشان داد که ژنوتیپ‌های ۱۱، نه، ۱۸، ۱۰، ۱۳، ۱۲، ۱۶، ۱۴ و شش پرمحصول و پایدار بودند. شاخص‌گزینش چند صفتی (MTSI) بر پایه تجزیه عاملی، ژنوتیپ‌های دو، ۱۸ و شش را به‌عنوان ژنوتیپ برتر گزینش نمود. بر پایه شاخص HMRPGV، ژنوتیپ‌های ۱۴، شش و نه علاوه بر عملکرد بالا، از پایداری و سازگاری بالایی نیز برخوردار بودند. در مجموع و بر اساس تمام تجزیه‌ها، ژنوتیپ شش، پایدارترین ژنوتیپ بود که علاوه بر عملکرد دانه، از نظر سایر صفات اندازه‌گیری شده نیز بر ژنوتیپ‌های دیگر برتری داشت و می‌تواند نامزد معرفی به‌عنوان یک رقم جدید باشد.

تجزیه پایداری ژنوتیپ‌ها با استفاده از میانگین

هارمونیک و عملکرد نسبی ارزش ژنوتیپی

بر اساس نتایج شاخص HMGV (جدول ۴)، ژنوتیپ‌های ۱۴، شش و نه، عملکرد بهتری نسبت به ارقام شاهد داشتند. حاصل‌ضرب شاخص HMRPGV و میانگین کلی ($\bar{\mu} * HMRPGV$) برای این سه ژنوتیپ به ترتیب ۳۴۷۶، ۳۳۱۳ و ۳۱۸۰ کیلوگرم در هکتار بود. با فرض انتخاب این سه ژنوتیپ با رتبه‌بندی برتر برای عملکرد دانه، انتظار افزایش ۱۰/۶۱ درصدی نسبت به میانگین کل (۲۹۷۱/۰۵) کیلوگرم در هکتار) وجود دارد. از آن‌جا که این شاخص، هم پایداری و هم سازگاری را بیان می‌کند، نشان‌دهنده ظرفیت پاسخ ژنوتیپی مثبت به بهبود شرایط محیطی و پایداری ژنوتیپ‌ها است. پایداری ژنوتیپ‌های ۱۴، شش و نه با مقادیر شاخص HMRPGV برابر با ۱/۱۷، ۱/۱۲ و ۱/۰۷ بود که به ترتیب افزایش ۱۷، ۱۲ و هفت درصدی را نسبت به میانگین کلی عملکرد دانه را نشان داد. اهمیت سازگاری در اصلاح نباتات، توجه تلاش به‌نژادگر برای شناسایی این رفتار مطلوب در رقم تازه معرفی‌شده است (Ceccarelli, 1989). روش HMRPGV مشابه روش Lin & Binns (1988) است، با این حال، بر خلاف این روش که بر نتایج فنوتیپی استوار است، روش HMRPGV همزمان داده‌های عملکرد دانه، سازگاری و پایداری را در یک زمینه ژنوتیپی پردازش

REFERENCES

- Astaraki, H., Sharifi, P. & Sheikh, F. (2020). Estimation of genotypic correlation and heritability of some of traits in faba bean genotypes using Restricted Maximum Likelihood (REML). *Plant Genetic Researches*, 6(2), 111-128. (In Persian)
- Ceccarelli, S. (1989). Wide Adaptation: How Wide? *Euphytica*, 40, 197-205.
- Coan, M. M. D., Marchioro, V. S., Franco, F. A., Pinto, R. J. B., Scapim, C. A. & Baldissera, J. N. C. (2018). Determination of genotypic stability and adaptability in wheat genotypes using mixed statistical models. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 20, 1525-1540.
- Colombari-Filho, J. M., Resende, M. D.V., de Moraes, O. P., Castro, A. P., Guimaraes, E. L., Pereira, J. M., Utumi, M. M. & Breseghello, F. (2013). Upland rice breeding in Brazil: a simultaneous genotypic evaluation of stability, adaptability and grain yield. *Euphytica*, 192, 117-129.
- Georgieva, N. A. & Kosev, V. I. (2019). Ecological stability of broad bean (*Vicia faba* L.) in organic farming conditions. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*, 23(8), 981-992.
- Haciseferogullari, H., Geaer, I., Bahtiyarca, Y. & Menges, H. O. (2003). Determination of some chemical and physical properties of Sakiz faba bean (*Vicia faba* L. Var major). *Journal of Food Engineering*, 60, 476- 479.

7. Holland, J. B. (2006). Estimating genotypic correlations and their standard errors using multivariate restricted maximum likelihood estimation with SAS Proc MIXED. *Crop Science*, 46, 642-654.
8. Lin, C. S. & Binns, M. R. (1988). A superiority measure of cultivar performance for cultivar x location data. *Canadian Journal of Plant Science*, 68, 193-198.
9. Karimizadeh, R., Pezeshkpour, P., Barzali, M., Mehraban, A. & Sharifi, P. (2020). Evaluation the mean performance and stability of lentil genotypes by combining features of AMMI and BLUP techniques. *Journal of Crop Breeding*, 12(36), 160-170. (In Persian)
10. Maalouf, F., Khali, S., Ahmed S., Akintunde, A. N., Kharrat, M., El Shama'a, K., Hajjar, S. & Malhotra, R. S. (2011). Yield stability of faba bean lines under diverse broomrape prone production environments. *Field Crops Research*, 124(3), 288-294.
11. Olivoto, T. & Lúcio, A. D. C. (2020). Metan: An R package for multi-environment trial analysis. *Methods in Ecology and Evolution*, 00(1), 1-7.
12. Olivoto, T., Lúcio, A. D. C., da Silva, J. A. G., Marchioro, V. S., de Souza, V. Q. & Jost, E. (2019a). Mean performance and stability in multi-environment trials I: combining features of AMMI and BLUP techniques. *Agronomy Journal*, 111(6), 2949-2960.
13. Olivoto, T., Lúcio, A. D. C., da Silva, J. A. G., Sari, B. G., and Diel, M. I. (2019b). Mean performance and stability in multi-environment trials II: selection based on multiple traits. *Agronomy Journal*, 111(6), 2961-2969.
14. Resende, M. D. V. (2007). *Matemática e estatística na análise de experimentos e no melhoramento genético*. Embrapa Florestas, Colombo, Brazil.
15. Rodvalho, M. A., Coan, M. M. D., Scapim, C. A., Pinto, R. J. B. & Contreras-Soto, R. I. (2015). Comparison of HMRPGV, Lin and Binn's, and Annichiarico's methods for maize hybrid selection for high and stable yield. *Maydica*, 60, 1-7.
16. Sarparast, R., Sheikh, F. & Sowghi, H. A. (2011). Investigation of genotype and environment interaction and cluster analysis for seed yield in different lines of faba bean (*Vicia faba* L.). *Iranian Journal of Pulses Research*, 2(1), 99-106. (In Persian)
17. Sayar, M. S., Anlaral, A. E. & Başbag, M. (2013). Genotype-environment interactions and stability analysis for dry-matter yield and seed yield in Hungarian Vetch (*Vicia pannonica* CRANTZ.). *Turkish Journal of Field Crops*, 18(2), 238-246.
18. Sharifi, P. & Aminpanah, H. (2014). A study on the genetic variation in some of faba bean genotypes using multivariate statistical techniques *Tropical Agriculture (Trinidad)*, 91(2), 87-97.
19. Sharifi, P. (2020). *Application of Multivariate Analysis Methods in Agricultural Sciences*. Rasht branch, Islamic Azad University press, IR. (In Persian)
20. Sharifi, P., Astereki, H. & Safari Motlagh, M. R. (2014). Evaluation of genotype, environment and genotype × environment interaction effects on some of important quantitative traits of faba bean (*Vicia faba* L.). *Journal of Crop Breeding*, 6(13), 73-88. (In Persian)
21. Sharifi, P., Erfani, A., Abbasian, A. & Mohaddesi, A. (2021). Stability of some of rice genotypes based on WAASB and MTSI indices. *Iranian Journal of Genetics and Plant Breeding*, 9(2), 10.30479/IJGPB.2021.14432.1283.
22. Skovbjerg, C. K., Knudsen, J. N., Füchtbauer, W., Stougaard, J., Stoddard, F. L., Janss, L. & Andersen, S. U. (2019). Evaluation of yield, yield stability and yield-protein trade-off in commercial faba bean cultivars. *bioRxiv preprint*, doi: <https://doi.org/10.1101/843862>.
23. Tadele, M., Mohammed, W. & Jarso, M. (2020). Yield stability and genotype × environment interaction of faba bean (*Vicia faba* L.). *International Journal of Plant Breeding and Crop Science*, 7(2), 833-846.
24. Temesgen, T., Keneni, G., Sefera, T. & Jarso, M. (2015). Yield stability and relationships among stability parameters in faba bean (*Vicia faba* L.) genotypes. *The Crop Journal*, 3(3), 258-268.
25. Tolessa, T. T., Keneni, G., Mohammed, H. & Ahmed, S. K. (2019). Decades of faba bean (*Vicia faba* L.) breeding for better grain yield and seed size has inadvertently reduced G × E interaction and increased inter-temporal performance stability. *Journal of Crop Science and Biotechnology*, 22, 265-274.
26. Yan, W. & Kang, M. S. (2003). *GGE biplot analysis: a graphical tool for breeders, geneticists and agronomists*. 1st Edn., CRC Press LLC., Boca Raton, Florida, pp: 271.
27. Yassin, T. E. (2009). Analysis of yield stability in field beans (*Vicia faba* L.) in the Northern Province of the Sudan, *The Journal of Agricultural Science*, 80(1), 119 - 124.