

ارزیابی اثر متقابل ژنوتیپ و محیط ژنوتیپ‌های عدس با استفاده از ترکیب روش‌های AMMI و BLUP

سمانه اکبری^۱، امیدعلی اکبرپور^{۲*}، پیام پزشکیپور^۳

۱. دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران
۲. استادیار، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران
۳. استادیار، بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی لرستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، خرم‌آباد، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۱۸

چکیده

هدف از انجام این پژوهش برآورد اثر متقابل ژنوتیپ و محیط و انتخاب ژنوتیپ‌های سازگار عدس با استفاده از ترکیب روش‌های AMMI و BLUP بود. در این پژوهش پایداری و سازگاری ۱۴ ژنوتیپ عدس به همراه دو شاهد سپهر و گچساران، طی چهار سال زراعی (۱۳۹۵-۹۹) در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در ایستگاه تحقیقات کشاورزی سراب چنگایی خرم‌آباد انجام گرفت. نتایج حاصل از تجزیه مرکب نشان‌دهنده معنی‌داری اثرات اصلی ژنوتیپ، محیط و اثر متقابل ژنوتیپ و محیط بودند. بر اساس ترکیب دو روش AMMI و BLUP مؤلفه‌های اصلی اول و دوم به‌طور تجمعی حدود ۸۷/۸ درصد از تغییرات اثر متقابل ژنوتیپ و محیط را توجیه کردند. آزمون نسبت درست‌نمایی LRT مشخص‌کننده معنی‌داری اثر متقابل ژنوتیپ و محیط بود. با توجه به روش بهترین پیش‌بینی‌های نااریب خطی (BLUP)، شاخص‌های WAASB و WAASBY و عملکرد اسمی دانه در برابر نمرات نخستین محور مؤلفه اصلی برهمکنش محیط و ژنوتیپ (IPCA1)، ژنوتیپ‌های G5، G11 و G4 به‌عنوان ژنوتیپ‌های پایدار با عملکرد بالا شناسایی شدند. بر اساس نتایج این پژوهش ژنوتیپ G5 (FLIP2014-032L)، G11 (FLIP2014-103L) و G4 (FLIP2014-021L) با میانگین عملکرد دانه به‌ترتیب ۱۵۷۴/۶۸، ۱۴۸۴/۷۴ و ۱۴۵۲/۵۴ کیلوگرم در هکتار به‌عنوان ژنوتیپ‌های پایدار معرفی شدند و برای کشت در محیط‌های مشابه اقلیم مورد مطالعه، پیشنهاد شدند.

کلیدواژگان: آزمون نسبت درست‌نمایی، بای‌پلات، پایداری، تجزیه مرکب، عملکرد دانه

مقدمه

عدس از خانواده حبوبات، دیپلوئید ($2n=2x=14$)، خودگشن و یک ساله می باشد و رشد آن به صورت بوته ای است (Abo- Hegazy et al., 2012). دانه عدس پروتئین بالایی دارد، وجود ویتامین های گروه B نیز در دانه عدس قابل توجه است. دانه عدس آهن بیشتری نسبت به دانه گندم و برنج دارد (Sellami et al., 2019). افزایش عملکرد در واحد سطح یکی از مهمترین عوامل مؤثر در بالا بردن تولید این محصول می باشد. عملکرد ژنوتیپ های عدس به میزان زیادی به محیط بستگی دارد. در مجموع عملکرد یک رقم را ژنوتیپ، محیط و اثر متقابل ژنوتیپ و محیط تعیین می کند (Farshadfar, 2008). اثر متقابل ژنوتیپ و محیط عکس العمل متفاوت ژنوتیپ ها در محیط های مختلف می باشد. معنی دار بودن اثر متقابل ژنوتیپ و محیط به معنی تغییر در رتبه ژنوتیپ ها یا تفاوت عملکرد بین ژنوتیپ ها در محیط های مختلف می باشد (Badooei Delfard et al., 2016). به نژادگران، اثر متقابل ژنوتیپ و محیط را به عنوان یک مانع برای انتخاب ژنوتیپ مفید می دانند. اگر اثر متقابل ژنوتیپ و محیط به طور دقیق اندازه گیری شود، می توان از آن برای بهبود عملکرد استفاده کرد. همچنین به نژادگران با آگاهی از برهمکنش ژنوتیپ و محیط، با دقت بیشتری به ارزیابی ژنوتیپ ها پرداخته و بهترین ژنوتیپ ها را گزینش می کنند (Baggar et al., 2023). معرفی ژنوتیپ های پایدار با عملکرد بالای عدس از اهداف مهم به نژادی می باشد (Yan et al., 2007). ارقامی که واکنش کمتری به شرایط محیطی نشان می دهند در واقع اثر متقابل ژنوتیپ و محیط کمتری دارند و می توان از آن ها به عنوان ژنوتیپ های پایدار استفاده کرد. یکی از راه های افزایش عملکرد گیاهان، شناسایی ارقام با عملکرد بالا و پایدار برای مناطق مختلف با شرایط آب و هوایی متنوع است. برای انتخاب ارقام پرمحصول و پایدار، آزمایش های مقایسه عملکرد تکراردار در چندین سال و مکان انجام می شود (Soughi et al., 2009).

روش های متعددی برای ارزیابی اثر متقابل ژنوتیپ و محیط و گزینش ژنوتیپ های پایدار معرفی شده است که شامل روش های آماری تک متغیره و چند متغیره می باشند. با توجه به این که، روش های تک متغیره تصویر کاملی از ماهیت پیچیده و چند بعدی اثر متقابل ارائه نمی دهند از روش های چند متغیره برای رفع این مشکل استفاده می شود

(Alipour et al., 2019). از میان روش های چندمتغیره، روش بای پلات که مبتنی بر تجزیه به مؤلفه های اصلی می باشد استفاده می شود. در روش بای پلات ژنوتیپ ها و محیط و اثرات متقابل آن ها به طور همزمان در یک نمودار بای پلات نمایش داده می شوند. در روش چند متغیره (Additive main effect and multiplicative AMMI interaction) اثرات اصلی جمع پذیر و اثرات متقابل ضرب پذیر هستند. ابتدا تجزیه واریانس معمولی روی داده های مربوط به عملکرد ژنوتیپ ها در محیط های مختلف انجام می شود و سپس اثرات متقابل با روش تجزیه به مؤلفه های اصلی تحلیل و بررسی می شود (Gauch & Zobel, 1988).

برای افزایش دقت پیش بینی، بهره گیری از مدل های آماری با توانایی پیش بینی بهتر همچون بهترین پیش بینی های نارایب خطی BLUP که تجزیه پایداری به روش AMMI بر روی این پیش بینی ها انجام می شود ضروری است. بهره گیری از شاخص های مختلف AMMI، ترکیب دو روش AMMI و BLUP و ترسیم نمودارهای مختلف مبتنی بر آنها برای درک بهتر اثر متقابل ژنوتیپ و محیط مفید می باشد. روش برآورد نارایب خطی (Best linear unbiased BLUP predictors) برای بررسی داده های چند محیطی مناسب می باشد و میانگین ها را با دقت بالاتری تخمین می زند (Olivoto et al., 2019). در ترکیب دو روش AMMI و BLUP، ابتدا در یک مدل مختلط خطی اثر متقابل ژنوتیپ و محیط به روش BLUP برآورد می شود. سپس ماتریس اثر متقابل ژنوتیپ و محیط با روش تجزیه به مؤلفه های اصلی یا تجزیه ارزش منفرد به مؤلفه های اصلی انجام می شود، با این هدف که مؤلفه های اولیه بیشترین واریانس اثرات متقابل را دارا باشند، تجزیه می شوند.

یک شاخص پایداری ژنوتیپی دیگر، شاخص پایداری میانگین وزنی نمرات مطلق است که بهترین پیش بینی های نارایب خطی WAASB [Weighted average of absolute scores of BLUP (best linear unbiased predictions)] نام دارد، که از تلفیق دو روش AMMI و BLUP بدست می آید (Olivoto et al., 2019). متغیر وابسته معیار میانگین وزنی شاخص پایداری (WAASBY) Weighted average of WAASB and response variable نیز ژنوتیپ ها را به طور همزمان بر اساس میانگین عملکرد دانه و پایداری انتخاب می کند (Olivoto et al., 2019).

عملکرد بالا و همچنین بررسی کارایی ترکیب دو روش AMMI و BLUP می‌باشد.

مواد و روش‌ها

در این مطالعه با استفاده از ترکیب روش‌های AMMI و BLUP، پایداری عملکرد دانه ۱۴ ژنوتیپ عدس به همراه دو ژنوتیپ شاهد گچساران و سپهر در طی سال‌های زراعی ۱۳۹۵-۱۳۹۹ در ایستگاه تحقیقاتی سراب چنگائی مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان لرستان بررسی شد. ژنوتیپ‌هایی که در این پژوهش مورد مطالعه قرار گرفتند سرمادوست و متعلق به مناطق معتدل بودند. جدول ۱ مربوط به نام و شجره ژنوتیپ‌ها می‌باشد.

در تحقیقی Pour Aboughadareh و همکاران (2023) با استفاده از شاخص‌های مبتنی بر مدل AMMI و BLUP، پایداری ۱۹ ژنوتیپ جو را مورد ارزیابی قرار دادند و چهار ژنوتیپ پایدار با عملکرد بالا را شناسایی کردند. در پژوهشی دیگر با استفاده از ترکیب ویژگی‌های روش‌های AMMI و BLUP و شاخص‌های WAASB و WAASBY به ارزیابی میانگین عملکرد و پایداری ۱۲ ژنوتیپ عدس پرداختند و چهار ژنوتیپ پایدار و پر محصول را معرفی نمودند (Karimizadeh *et al.*, 2021). محققان پایداری عملکرد هفت لاین امیدبخش برنج به همراه دو رقم شاهد را با استفاده از روش‌های AMMI و BLUP و شاخص‌های WAASB و WAASBY مورد ارزیابی قرار دادند و ژنوتیپ‌های برتر را تشخیص دادند (Sharifi *et al.*, 2021). هدف از انجام این پژوهش ارزیابی اثر متقابل ژنوتیپ و محیط ژنوتیپ‌های عدس و گزینش ژنوتیپ‌های پایدار با

جدول ۱- شماره و شجره ژنوتیپ‌های عدس مورد مطالعه در آزمایش

شماره ژنوتیپ	نام/شجره
G1	FLIP2012-2L(ILL10977)-ILL7985/ILL6037
G2	PRECOZ(ILL4605)-ILL 5888 / ILL 5782
G3	FLIP2011-43L(ILL10947)-ILL 7537 X ILL 590
G4	FLIP2014-021L(ILL11431)-ILL9977 x ILL 1005
G5	FLIP2014-032L(ILL11442)-ILL5883 x ILL6458
G6	FLIP2014-031L(ILL11441)-ILL5883 x ILL6458
G7	FLIP2014-029L(ILL11439)-ILL6037 x ILL7012
G8	FLIP2012-77L(ILL11052)-ILL6129XILL7980
G9	FLIP2012-240L(ILL11215)-ILL7711XILL8176
G10	FLIP2012-244L(ILL11219)-ILL7711XILL5480
G11	FLIP2014-103L(ILL11513)-ILL9892 x ILL7978 ICARDA311113945473298C
G12	ILL8006
G13	FLIP2010-95L(ILL10825)-ILL 7620 X 91517
G14	FLIP 86-16L(ILL6002)-ILL 4349 x ILL 4605
G15	Gachsaran
G16	Sepehr

مقدار کود بر اساس آزمون خاک و به میزان کاشت در هر چهار سال اعمال شد. مشخصات اقلیمی ایستگاه نام برده در جدول ۲ ذکر شده است.

آزمایش در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. کاشت بذر به صورت دستی در نیمه اول آبان ماه در عمق دو تا چهار سانتی‌متری خاک انجام شد.

جدول ۲- وضعیت اقلیمی ایستگاه سراب چنگایی خرم آباد طی سال‌های زراعی ۹۹-۱۳۹۵

سال	فصل	متوسط دما (°C)	حداکثر دما (°C)	حداقل دما (°C)	بارندگی (mm)	رطوبت نسبی
۱۳۹۵-۱۳۹۶	پاییز	۱۴/۱۰	۲۶/۶	۱/۱	۲۴/۹۳	۳۹
	زمستان	۶/۸۳	۱۸/۵۶	-۶/۳۳	۷۵/۹۶	۶۰
	بهار	۱۹/۵۶	۳۴/۵۳	۵/۰۶	۳۷/۸۶	۴۴/۱۶
	پاییز	۱۴/۵۳	۲۸/۳۶	۰/۹	۱۳/۱۳	۳۷/۳۳
۱۳۹۶-۱۳۹۷	زمستان	۹/۲	۲۲/۸۶	-۲/۵	۶۰/۵۰	۵۶/۷۶
	بهار	۱۹	۳۲/۴۳	۶/۹	۸۹/۱۶	۵۵
	پاییز	۱۴/۸۶	۲۷/۶۶	۳/۶۶	۶/۰۹	۵۶/۶۶
	زمستان	۶/۶۶	۱۸/۳۳	-۳/۴۶	۴۶/۳۵	۶۷/۶۶
۱۳۹۷-۱۳۹۸	بهار	۱۸/۸۳	۳۲/۶۳	۴/۱	۱۰۶/۸۵	۵۲/۳۳
	پاییز	۱۴/۵۳	۲۱/۹	۱۵/۹	۵۹/۴	۵۲/۵
	زمستان	۷/۸	۱۴/۱	۰/۳۱	۹۷/۸۶	۶۱
	بهار	۱۹/۲	۲۷/۸۳	۱۰/۶۶	۱۷/۲۶	۶۶/۴۵

در رابطه بالا Y_{ger} عملکرد ژنوتیپ گام در محیط e و تکرار t ، μ میانگین کل، σ_g اثر اصلی ژنوتیپ، λ_n مقدار منفرد برای محور مؤلفه اصلی n که برابر با مقدار ویژه مربوط به همان مؤلفه اصلی است. n تعداد محورهای PCA باقی‌مانده در مدل AMMI، y_{gn} بردار ویژه ژنوتیپ گام از n مؤلفه اصلی برهمکنش، δ_{en} بردار ویژه محیط e از n مؤلفه اصلی برهمکنش، P_{ge} نویز، ε_{ger} خطای آزمایش می‌باشد. برای بدست آوردن پایداری ژنوتیپ‌ها از ترکیب دو روش تجزیه به مقادیر منفرد (AMMI) و بهترین پیش‌بینی‌های نارایب خطی (BLUP) بر روی ماتریس اثر تصادفی متقابل ژنوتیپ و محیط با مدل مختلط خطی استفاده شد. با استفاده از روش حداکثر درست‌نمایی محدود شده (Restricted maximum likelihood) REML اجرای واریانس محاسبه شدند و برای بررسی معنی‌داری اثرات تصادفی از آزمون نسبت درست‌نمایی (Likelihood ratio tests) LRT استفاده شد (Olivoto et al., 2019).

رابطه زیر بهترین پیش‌بینی نارایب خطی (BLUP) از اثر تصادفی اثر متقابل ژنوتیپ و محیط می‌باشد:

عملیات زراعی که شامل خاک‌ورزی اولیه، انجام دیسک و تسطیح در هر سال، بود انجام گرفت. محصول بعد از رسیدگی فیزیولوژیکی در خرداد ماه در چهار ردیف با فاصله بین ردیف ۲۵ سانتی‌متری یعنی چهار متر مربع برداشت گردید. سپس بعد از جدا کردن کاه و کلش از دانه، عملکرد دانه بر اساس کیلوگرم در هکتار محاسبه گردید. در ابتدا تجزیه واریانس ساده برای هر سال انجام شد، سپس از آزمون بارتلت برای بررسی همگنی واریانس‌های خطای آزمایشی استفاده شد. پس از تایید همگنی واریانس خطاهای آزمایشی در چهار سال، تجزیه واریانس مرکب با فرض ثابت بودن ژنوتیپ‌ها و تصادفی بودن محیط و اثرات متقابل ژنوتیپ و محیط انجام گرفت.

با توجه به تجزیه AMMI از نمودارهای بای‌پلات برای تفسیر گرافیکی اثر متقابل ژنوتیپ و محیط استفاده شد. رابطه زیر مربوط به تجزیه AMMI می‌باشد.

رابطه (۱)

$$Y_{ger} = \mu + \sigma_g + \beta_e + \sum \lambda_n y_{gn} \delta_{en} + P_{ge} + \varepsilon_{ger}$$

رابطه (۲)

$$BLUP[\tau\delta_{ij}] = \frac{r\sigma_{\delta\tau}^2}{\sigma_e^2 + r\sigma_{\delta\tau}^2} (\bar{y}_{ij\cdot} - \bar{y}_{i\cdot\cdot} - \bar{y}_{\cdot j\cdot} + \mu)$$

محور X و Y آن به ترتیب، مربوط به امتیاز اولین مؤلفه اصلی محیط و عملکرد ژنوتیپ‌ها است. در این نمودار، برای هر کدام از ژنوتیپ‌ها یک خط با معادله $bx+a=y$ نوشته می‌شود که در آن x، نمره محور مؤلفه اصلی اول محیطی؛ a، میانگین کل هر ژنوتیپ و b، اولین مؤلفه اصلی هر ژنوتیپ است (Olivoto et al., 2019b).

در این پژوهش از نرم‌افزارهای R (4.1.1) و SAS (9.1.3) برای تجزیه‌های آماری و ترسیم شکل‌ها استفاده شد.

نتایج و بحث

ابتدا مفروضات تجزیه واریانس ارزیابی شد و پس از تایید فرضیات، تجزیه واریانس ساده و مرکب برای چهار سال انجام گرفت (جدول ۴). از روش LSD برای مقایسه میانگین عملکرد ژنوتیپ‌های عدس در چهار سال استفاده شد. بر اساس جدول ۳ ژنوتیپ‌های G1، G10، G1 و G5 به ترتیب در سال اول، دوم، سوم، و چهارم بیشترین میانگین‌های عملکرد را داشتند و دارای اختلاف معنی‌داری با دیگر ژنوتیپ‌های موجود در هر سال بودند ($p < 0.01$). همچنین ژنوتیپ‌های G1، G16، G15 و G16 به ترتیب در سال اول، دوم، سوم و چهارم کمترین میانگین عملکرد را در هر سال داشتند و اختلاف معنی‌داری با ژنوتیپ‌های دیگر در هر سال داشتند ($p < 0.01$). ژنوتیپ G5 در سال چهارم دارای بیشترین میانگین عملکرد و ژنوتیپ G1 در سال اول دارای کمترین میانگین عملکرد در بین ۱۶ ژنوتیپ عدس در طی سال‌های مورد مطالعه بودند. بیشترین میانگین عملکرد مربوط به سال چهارم و کمترین میانگین عملکرد مربوط به سال دوم می‌باشد. میانگین عملکرد ژنوتیپ‌ها در سال چهارم به این دلیل بیشتر از سه سال دیگر می‌باشد چون میزان بارندگی در سال چهارم (۹۹-۱۳۹۸) بیشتر از سه سال دیگر بوده است (جدول ۲). تفاوت عملکرد در چهار سال نشان‌دهنده این موضوع بود که ارزیابی ژنوتیپ‌ها در یک سال کافی نمی‌باشد و باید طی چندین سال این ارزیابی انجام شود. Mohammadi و همکاران (2014) نیز در پژوهش خود که به بررسی تجزیه پایداری عملکرد ژنوتیپ‌های گلرنگ پرداختند. از مقایسه میانگین به روش LSD برای مقایسه میانگین عملکرد ژنوتیپ‌های گلرنگ در شش محیط استفاده کردند که بر اساس نتایج آن‌ها، ژنوتیپ ۱۹ (ژنوتیپ محلی اصفهان) کمترین عملکرد را در ۵ محیط آزمایشی دارا بود.

که در رابطه با $\sigma_{\delta\tau}^2$ مؤلفه اثر متقابل ژنوتیپ و محیط، و σ_e^2 مؤلفه واریانس خطا، r تعداد تکرار، μ میانگین کل جمعیت، $\bar{y}_{ij\cdot}$ میانگین ژنوتیپ i ام در محیط j در همه‌ی تکرارها، $\bar{y}_{i\cdot\cdot}$ میانگین ژنوتیپ برای همه‌ی تکرارها و محیط‌ها، $\bar{y}_{\cdot j\cdot}$ میانگین محیط‌ها است. سپس تجزیه بر روی ماتریس بهترین برآورد نااریب خطی BLUP از اثر متقابل ژنوتیپ و محیط حاصل از یک مدل مختلط انجام می‌شود. پایداری ژنوتیپی برای هر ژنوتیپ با میانگین وزنی نمرات مطلق (WAASB) از تجزیه مقادیر منفرد ماتریس BLUP از اثرات متقابل ژنوتیپ و محیط بدست می‌آید.

رابطه (۳)

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

که در رابطه با $WAASB_i$ میانگین وزنی نمرات مطلق ژنوتیپ i ام در k امین محور مؤلفه اصلی اثر متقابل IPCA و EP_k مقدار واریانس تبیین شده توسط k امین مؤلفه IPCA است. برای انتخاب هم‌زمان پایداری و عملکرد از شاخصی با عنوان WAASBY استفاده شد.

رابطه (۴)

$$WAASBY_i = \frac{\{W_y \times [(\frac{GY_i}{GY_{max}}) \times 100]\} + [W_s \times (100 - \frac{WAASB_i}{WAASB_{min}})]}{W_y + W_s}$$

در رابطه با GY_i عملکرد دانه ژنوتیپ i ام، W_y وزن داده شده به متغیر پاسخ (عملکرد دانه)، GY_{max} حداکثر میانگین عملکرد دانه، W_s وزن نسبت داده شده به $WAASB$ ، همچنین $WAASB_i$ میانگین وزنی نمرات مطلق ژنوتیپ i ام، $WAASB_{min}$ کمترین مقدار $WAASB$ شناسایی شده در بین ژنوتیپ‌ها است.

شکل دیگر بای پلات چند ضلعی یا "کدام برنده کجا"، نمودار عملکرد اسمی (Nominal yield) است (Olivoto et al., 2019b).

جدول ۳- مقایسه میانگین عملکرد ژنوتیپ‌های عدس به روش LSD

ژنوتیپ	سال چهارم	سال سوم	سال دوم	سال اول	میانگین عملکرد چهار سال
G1	۱۵۵۰/۲ ^{abcde}	۱۳۷۷/۵ ^a	۱۶۱۸/۰ ^a	۶۰۰/۱ ^f	۱۲۸۶/۵۵
G2	۱۴۸۶/۲ ^{ebcde}	۷۷۵ ^c	۱۵۸۶/۷ ^a	۱۱۲۸ ^d	۱۱۳۰/۰۲
G3	۱۳۰۹/۹ ^{cde}	۱۱۱۷/۳ ^{abc}	۱۳۸۹/۱ ^{ab}	۱۵۶۵ ^{bc}	۱۱۴۰/۱۷
G4	۱۸۲۹/۵ ^{abcde}	۸۲۵/۵ ^{bc}	۱۳۶۹/۵ ^{ab}	۱۵۶۸/۵ ^{bc}	۱۴۵۲/۵
G5	۲۱۲۹/۸ ^a	۱۳۵۶/۳ ^a	۱۱۳۰/۹ ^{abc}	۱۴۲۳/۵ ^c	۱۵۷۴/۶
G6	۱۷۶۶/۷ ^{abcde}	۱۰۳۰ ^{abc}	۱۰۸۸/۳ ^{abcd}	۱۰۳۸ ^{ed}	۱۲۳۰/۷
G7	۱۸۰۴/۱ ^{abcde}	۱۱۸۲/۸ ^{abc}	۱۰۲۳ ^{bcd}	۸۱۷ ^{ef}	۱۲۰۸/۴
G8	۱۴۴۰/۷ ^{cde}	۱۰۳۰ ^{abc}	۹۸۶/۴ ^{bcd}	۱۷۶۹ ^b	۱۲۸۳/۰۲
G9	۱۹۶۲ ^{abc}	۱۲۶۱ ^{ab}	۹۴۹/۳ ^{bcd}	۱۷۷۲ ^b	۱۴۸۶/۰۷
G10	۱۹۳۶/۸ ^{abcd}	۱۱۵۲/۷ ^{abc}	۹۴۶/۵ ^{bcd}	۲۰۵۶/۷	۱۴۹۷/۴
G11	۲۰۹۵/۴ ^{ab}	۱۰۵۹ ^{abc}	۸۸۵/۶ ^{bcd}	۱۴۱۵ ^c	۱۴۸۴/۷
G12	۱۶۶۹ ^{abcde}	۱۰۸۵ ^{abc}	۸۷۶/۲ ^{bcd}	۱۵۹۴ ^{bc}	۱۳۳۳/۶
G13	۱۳۳۳/۸ ^{cde}	۹۷۴/۲ ^{abc}	۸۵۶/۰ ^{bcd}	۷۸۹/۳ ^{ef}	۹۹۳/۳
G14	۱۴۷۴/۹ ^{bcde}	۸۳۷/۳ ^{bc}	۸۴۳/۶ ^{bcd}	۶۵۳ ^f	۹۱۴/۳
G15	۱۲۹۳ ^e	۷۶۰/۸ ^c	۷۱۰/۲ ^{cd}	۸۰۴ ^{ef}	۹۲۸/۲
G16	۱۲۶۲/۹ ^e	۱۰۰۴/۸ ^{abc}	۵۶۸/۴ ^d	۱۰۳۸/۵ ^{ed}	۱۰۶۳/۱
میانگین کل	۱۶۴۶/۸۸	۱۰۵۱/۸۱	۱۰۵۱/۶	۱۲۵۱/۹۷	۱۲۵۰/۴۲
LSD 0.01	۶۴۲/۷۵	۴۷۱/۶۴	۵۵۴/۳۵	۲۶۹/۲	۵۳۴/۱۷

LSD 0.01 : حداقل اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد. میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ستون تفاوت معنی‌دار ندارند.

به منظور بررسی معنی‌داری اثر متقابل ژنوتیپ و محیط انجام شد. نتایج تجزیه واریانس مرکب برای چهار سال نشان دهنده معنی‌داری اثرات سال، ژنوتیپ و اثر متقابل ژنوتیپ و سال در سطح احتمال یک درصد بود (جدول ۴)، که معنی‌داری اثر ژنوتیپ نشان‌دهنده تنوع ژنتیکی بین ژنوتیپ‌ها از نظر عملکرد و معنی‌داری اثر سال به معنای واکنش متفاوت ژنوتیپ‌ها در شرایط آب‌وهوایی طی چهار سال آزمایش بود. معنی‌دار بودن اثر متقابل ژنوتیپ و سال واکنش متفاوت ژنوتیپ‌ها در سال‌های مختلف را نشان داد.

برای بررسی همگنی واریانس‌ها خطای آزمایشی آزمون بارتلت انجام شد. آزمون بارتلت فرض صفر مبنی بر عدم وجود اختلاف معنی‌دار بین واریانس‌های خطاها در چهار سال را تایید می‌کند. اگر واریانس خطاهای آزمایشی همگن نباشند نمی‌توان به بررسی اثر متقابل ژنوتیپ و محیط پرداخت. با توجه به آزمون بارتلت ($\chi^2 = 1/58$) درجه آزادی سه) با χ^2 جدول ($\chi^2 = 7/82$) درجه آزادی سه) مقایسه شد که حاکی از همگنی واریانس خطاهای آزمایش‌ها و عدم معنی‌داری آزمون بارتلت بود. در ادامه تجزیه واریانس مرکب

جدول ۴- تجزیه واریانس مرکب عملکرد دانه ۱۶ ژنوتیپ عدس در سال‌های زراعی ۹۹-۱۳۹۵

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات
سال	۳	۳۷۶۷۴۳۰/۰۹**
تکرار درون سال	۸	۳۵۱۲۹/۲۸ ^{ns}
ژنوتیپ	۱۵	۵۳۸۷۳۲/۹۰**
سال و ژنوتیپ	۴۵	۲۳۶۶۶۶/۳۸**
خطا	۱۲۰	۶۳۳۲۶/۷۸
ضریب تغییرات %		۲۰/۱۲

^{ns} و **: به ترتیب غیرمعنی‌داری و معنی‌داری در سطح احتمال ۱ درصد

ترکیب دو روش AMMI و BLUP

بر اساس ترکیب دو روش AMMI و BLUP سه مؤلفه اول شناسایی شد که سهم مؤلفه اول ۶۷/۴۵ درصد و سهم مؤلفه دوم ۲۰/۴ درصد بود و در مجموع مؤلفه‌های اصلی اول و دوم به‌طور تجمعی حدود ۸۷/۸ درصد از کل تغییرات اثر متقابل ژنوتیپ و محیط را به خود اختصاص دادند این تغییرات بخش زیادی از تغییرات Pattern و مؤلفه سوم نویز و تغییرات جزئی را شامل می‌شود (جدول ۵). محققان دیگر

نیز، برای بررسی برهمکنش‌های ژنوتیپ و محیط، ۱۷ ژنوتیپ پیشرفته نخود همراه با دو شاهد عادل و آزاد در چهار سال زراعی از روش بهترین پیش‌بینی نارایب خطی استفاده کردند. که در پژوهش آن‌ها تجزیه مقادیر منفرد SVD (Singular value decomposition) که اساس تجزیه AMMI است، بر روی ماتریس حاصله انجام دادند و چند مؤلفه اصلی اول را شناسایی کردند که دو مؤلفه اصلی اول به ترتیب ۳۴/۳۱ و ۳۱/۳۸ درصد از تغییرات اثر متقابل ژنوتیپ و محیط را توجیه می‌کرد (Pezeshkpour & Karimizadeh, 2023).

جدول ۵- مؤلفه‌ها بر اساس تجزیه AMMI

درصد تغییرات	میانگین مربعات	مؤلفه اصلی
۶۷/۴۵	۱۳۹۱۲۷۲	مؤلفه اصلی اول
۲۰/۴	۴۲۰۷۰۶	مؤلفه اصلی دوم
۱۲/۱۶	۲۵۰۷۲۵	مؤلفه اصلی سوم

AMMI و BLUP بررسی کردند. بر اساس نتایج آن‌ها آزمون نسبت درست‌نمایی LRT مشخص‌کننده معنی‌داری اثر متقابل ژنوتیپ و محیط بود، لذا برآورد به روش BLUP در این تحقیق معتبر و قابل بررسی بود (جدول ۶). پژوهشگران دیگر میانگین عملکرد و پایداری ۱۲ ژنوتیپ عدس پیشرفته عدس به همراه ارقام شاهد کیمیا و گچساران به مدت سه سال زراعی (۹۲-۱۳۸۹) در مناطق گچساران، گنبد، خرم‌آباد و مغان را با ترکیب روش‌های

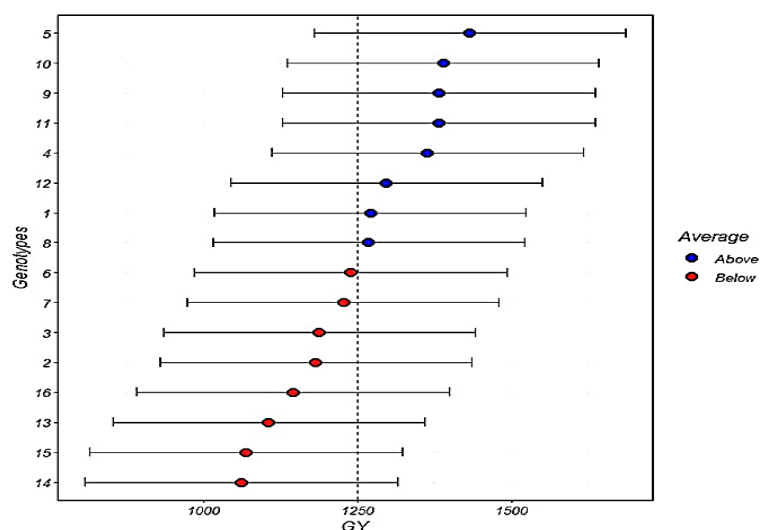
آزمون نسبت درست‌نمایی LRT مشخص‌کننده معنی‌داری اثر متقابل ژنوتیپ و محیط بود، لذا برآورد به روش BLUP در این تحقیق معتبر و قابل بررسی بود (جدول ۶). پژوهشگران دیگر میانگین عملکرد و پایداری ۱۲ ژنوتیپ عدس پیشرفته عدس به همراه ارقام شاهد کیمیا و گچساران به مدت سه سال زراعی (۹۲-۱۳۸۹) در مناطق گچساران، گنبد، خرم‌آباد و مغان را با ترکیب روش‌های

جدول ۶- آزمون نسبت درست‌نمایی برای ژنوتیپ‌های عدس

	P-value	χ^2
ژنوتیپ	$3/86 \times 10^{-2}$	۱۰/۰۳
اثر متقابل ژنوتیپ و محیط	$1/09 \times 10^{-8}$	۱۰/۰۰۰۰۰۱

وابسته می‌شود. به عبارت دیگر، تأثیر ترکیبی این دو متغیر تقویت‌کننده است. همچنین اثر متقابل منفی در حالت ثابت یعنی این که وقتی اثر متقابل منفی باشد، نشان‌دهنده این است که ترکیب ژنوتیپ و محیط باعث کاهش تأثیر کلی آن‌ها بر متغیر وابسته می‌شود. یعنی اثر یکی از متغیرها ممکن است اثر متغیر دیگر را خنثی یا کاهش دهد (Akbarpour, 2017). محققان دیگر نیز در پژوهش خود پیش‌بینی عملکردهای دانه برآورد شده به روش BLUP استفاده کردند و ژنوتیپ‌های که عملکرد پیش‌بینی شده بالایی را داشتند به‌عنوان ژنوتیپ‌های برتر انتخاب کردند (Sharifi et al., 2021; Karimizaded et al., 2021).

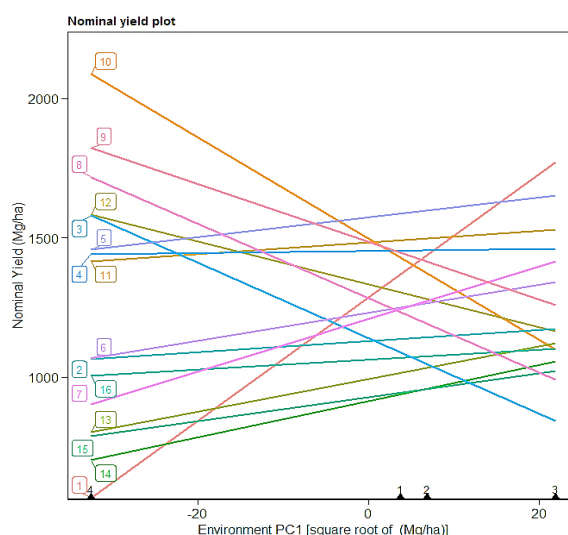
با توجه به مقایسه میانگین عملکردهای برآورد شده به روش BLUP ژنوتیپ‌هایی که عملکرد پیش‌بینی شده بالایی داشته باشند، ژنوتیپ‌های برتر می‌باشند. بر این اساس ژنوتیپ‌های G5، G10، G9، G11، G4 و G12 ژنوتیپ‌های برتر بودند که همگی میانگین عملکرد بالایی نیز داشتند و ژنوتیپ G5 بالاترین عملکرد پیش‌بینی شده به روش BLUP را داشت (شکل ۱). اگر اثر متقابل ژنوتیپ و محیط در حالت ثابت مثبت باشد، در مدل تصادفی میزان پیش‌بینی کمتر می‌شود و اگر در حالت ثابت اثر متقابل منفی باشد در مدل تصادفی میزان پیش‌بینی بیشتر از مقدار ثابت می‌باشد. اثر متقابل مثبت در حالت ثابت به این معنی می‌باشد که وقتی اثر متقابل بین دو متغیر مستقل مثبت باشد، که افزایش هر دو متغیر مستقل باهم باعث افزایش بیشتر از مجموع تأثیرات جداگانه ژنوتیپ و محیط بر متغیر



شکل ۱- عملکرد دانه پیش‌بینی شده برای ۱۶ ژنوتیپ عدس دایره‌های آبی ژنوتیپ‌های دارای BLUP بالاتر از میانگین BLUP و دایره‌های قرمز ژنوتیپ‌های دارای پایین‌تر از میانگین BLUP

متفاوتی داشته و ناپایدار می‌باشند. بنابراین ژنوتیپ‌های G4، G5 و G11 ژنوتیپ‌های پایدار با عملکرد بالا تشخیص داده شدند و سهم کمتری در اثر متقابل ژنوتیپ و محیط داشتند. Sharifi و همکاران (2021) به ارزیابی میانگین عملکرد و پایداری ژنوتیپ‌های برنج هفت لاین امیدبخش برنج، به همراه دو رقم شاهد، در تنکابن، آمل و ساری، در سه فصل زراعی ۹۳-۱۳۹۰ با ترکیب ویژگی‌های روش‌های AMMI و BLUP پرداختند. از بای‌پلات عملکرد اسمی دانه در برابر نمرات نخستین محور مؤلفه اصلی اول در پژوهش خود استفاده کردند و ژنوتیپ‌هایی دارای شیب خطی کمتر را به عنوان ژنوتیپ‌های پایدار معرفی کردند.

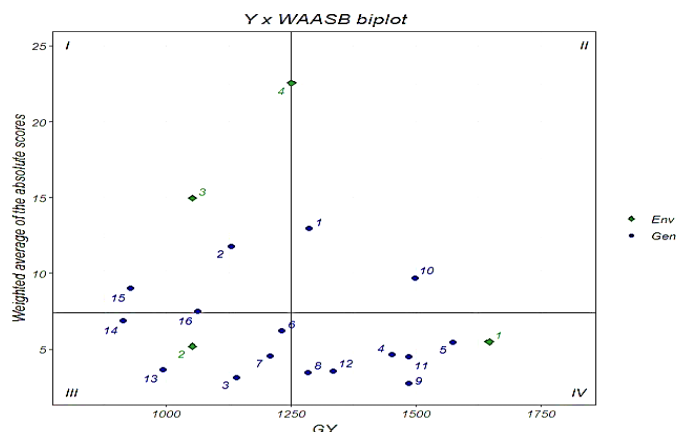
بر اساس شکل ۲ که عملکرد اسمی دانه در برابر نمرات نخستین محور مؤلفه اصلی اول را نشان می‌دهد مؤلفه اصلی اول ۶۷/۴ درصد از تغییرات اثر متقابل ژنوتیپ و محیط را در تبیین می‌کند بر اساس این شکل ژنوتیپ‌هایی دارای شیب خطی کمتر پایدارتر می‌باشند. با توجه به این موضوع، ژنوتیپ‌های G2، G4، G5، G11 و G16 دارای شیب کمتری بودند. ژنوتیپ‌های با کمترین امتیاز مؤلفه اصلی اول، ضرایب b یا شیب خط، از پایداری بیشتری برخوردار بودند. بر این اساس که پایداری و عملکرد با هم بررسی می‌شوند. میانگین عملکرد ژنوتیپ‌های G2 و G16 از میانگین عملکرد کل پایین‌تر بود و این ژنوتیپ‌ها به عنوان ژنوتیپ‌های برتر معرفی نمی‌شوند زیرا در محیط‌های مختلف عملکرد



شکل ۲- عملکرد اسمی دانه در برابر نمرات نخستین محور مؤلفه اصلی محیطی برهمکنش (IPCA1)

WAASB بالا و عملکرد بالایی نیز داشتند در بخش سوم ژنوتیپ‌های G3، G6، G7، G13 و G14 قرار داشتند که مقدار WAASB پایینی داشتند ولی عملکردشان نیز پایین بود. در ربع چهارم ژنوتیپ‌های G5، G9، G10، G11 و G4 مقدار WAASB پایینی نیز داشتند. Najafi Mirak و همکاران (2023) نیز در پژوهش خود پایداری عملکرد دانه ۲۰ ژنوتیپ گندم دوروم را با استفاده از ترکیب خصوصیات روش‌های AMMI و BLUP بررسی کردند و دریافتند که بای‌پلات از چهار ربع تشکیل شده بود و ژنوتیپ‌های با عملکرد بالا و شاخص WAASB پایینی داشتند در ربع چهارم قرار داشتند.

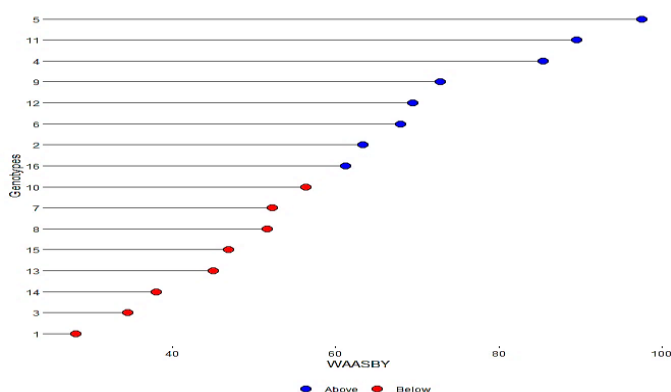
برای تفسیر بهتر پایداری از بای‌پلات عملکرد دانه در مقابل میانگین وزنی نمرات مطلق برای بهترین پیش‌بینی‌های نااریب خطی از اثر متقابل ژنوتیپ و محیط استفاده شد (شکل ۳). عملکرد دانه در محور افقی و میانگین وزنی نمرات مطلق برای بهترین پیش‌بینی‌های نااریب خطی از اثر متقابل ژنوتیپ و محیط در محور عمودی قرار داشت. بای‌پلات از چهار بخش تشکیل شده است و ژنوتیپ‌هایی که از مقدار WAASB کمتر و عملکرد بالا برخوردار باشند ژنوتیپ‌های برتر می‌باشند. در بخش اول ژنوتیپ‌های G2، G15 و G16 بودند که به دلیل داشتن مقدار WAASB بالا و عملکرد پایین ژنوتیپ‌های ناپایدار با عملکرد پایین بودند. در بخش دوم ژنوتیپ‌های G1 و G10 قرار داشتند که مقدار



شکل ۳- بای پلات عملکرد دانه در مقابل میانگین وزنی نمرات مطلق برای بهترین پیش‌بینی‌های نااریب خطی از برهمکنش ژنوتیپ‌ها با محیط (WAASB) دایره‌های آبی ژنوتیپ‌های مورد مطالعه

Shiri و همکاران (2024) در پژوهشی به‌منظور بررسی پایداری هفت هیبرید امیدبخش ذرت به‌همراه چهار رقم تجاری در آزمایش چند محیطی ذرت در قالب طرح آزمایشی بلوک‌های کامل تصادفی در چهار تکرار در ۱۰ منطقه (کرج، مغان، شیراز، کرمانشاه، کرمان، مشهد، دزفول، میاندوآب، جیرفت و ساری) به‌مدت دو سال زراعی ۱۳۹۸ و ۱۳۹۹ انجام گرفت. از حالت ۵۰ و ۵۰ برای عملکرد و پایداری برای شناسایی ژنوتیپ‌های برتر استفاده کردند و سه هیبرید را از نظر وزن‌دهی یکسان برای عملکرد دانه و شاخص WAASB به‌عنوان هیبریدهای برتر معرفی کردند. محققان دیگری نیز با استفاده از مقادیر برآورد شده از میانگین وزنی پایداری (WAASB) و میانگین عملکرد (WAASBY) برای ۲۲ ژنوتیپ عدس با توجه به وزن در نظر گرفته شده ۵۰ عملکرد دانه و ۵۰ برای پایداری استفاده کردند (Pezeshkpour et al., 2023).

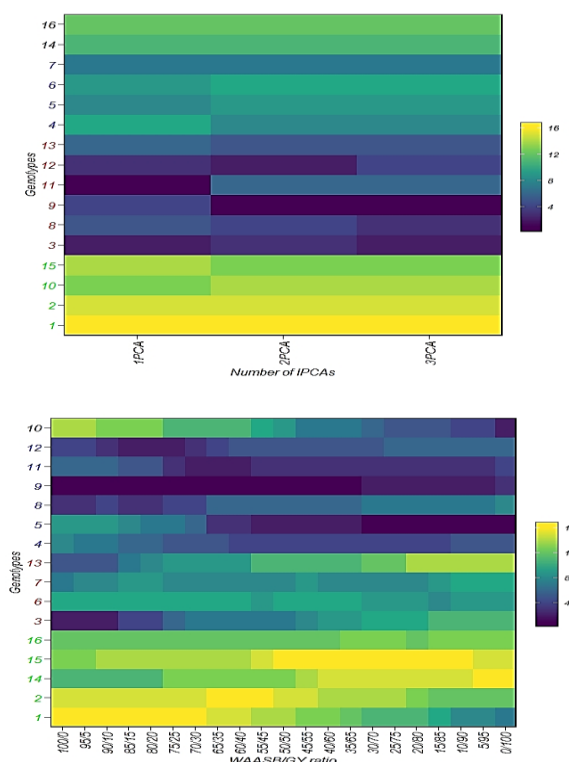
بر اساس مقادیر برآورد شده از میانگین وزنی پایداری (WAASB) و میانگین عملکرد (WAASBY) که انتخاب همزمان میانگین عملکرد دانه و شاخص پایداری WAASB و ژنوتیپ‌ها با معیار WAASBY گروه‌بندی می‌شوند (شکل ۴). در محاسبه آن وزن‌های متفاوتی به عملکرد دانه و شاخص (WAASB) داده شده است. در این نمودار از وزن‌دهی و شاخص برابر ۵۰:۵۰ برای هر دو شاخص (WAASBY) و عملکرد دانه استفاده شد که بیانگر یکسان نگریستن پایداری و عملکرد دانه ژنوتیپ‌ها و اهمیت یکسان هر دو شاخص در گزینش یک ژنوتیپ است. ژنوتیپ‌های G5، G11، G4، G9 و G12 دارای بیشترین مقدار WAASBY بودند همچنین این ژنوتیپ‌ها با توجه به شکل ۳ نیز در ربع چهارم قرار داشتند و ژنوتیپ‌های پایدار با عملکرد بالا بودند.



شکل ۴- مقادیر برآورد شده از میانگین وزنی پایداری (WAASB) و میانگین عملکرد (WAASBY) برای ۱۶ ژنوتیپ عدس با توجه به وزن در نظر گرفته شده ۵۰ و ۵۰ برای عملکرد و پایداری

ژنوتیپ‌های G5، G10 و G9 بیشترین عملکرد و ژنوتیپ‌های G14، G15 و G13 کمترین عملکرد را داشتند. با در نظر گرفتن سهم برابر ۵۰/۵۰ برای پایداری عملکرد و عملکرد دانه، در میانه شکل دیده می‌شود که ژنوتیپ‌های G5، G11، G4، G9 و G12 رتبه‌های برتر را داشتند و به‌عنوان ژنوتیپ‌های پایدار با عملکرد بالا شناسایی شدند. Namdari و همکاران (2023) در ارزیابی پایداری عملکرد دانه لاین‌های پیشرفته عدس دیم در آزمایش‌های چند محیطی، از رتبه‌بندی ژنوتیپ‌های عدس دیم با در نظر گرفتن وزن‌های مختلف برای پایداری و عملکرد استفاده کردند و با در نظر گرفتن سهم برابر ۵۰/۵۰ برای پایداری عملکرد و عملکرد دانه، در میانه شکل ژنوتیپ‌های برتر را انتخاب کردند. رویکرد مدل مخلوط امکان تخمین واریانس ژنوتیپی، وراثت‌پذیری بر اساس میانگین و همبستگی ژنتیکی واریانس را فراهم می‌کند که می‌توان در ارزیابی‌های چند محیطی از آنها بهره برد (Sharifi et al., 2021).

بر اساس شکل ۵ به عملکرد دانه و شاخص (WAASB) وزن‌های متفاوتی داده می‌شود، که در سمت چپ این نمودار، ستون اول رتبه‌بندی فقط بر اساس شاخص WAASB می‌باشد و روی محور X، به شاخص WAASB وزن ۱۰۰ و عملکرد وزن صفر داده شده است. بر اساس این نمودار از چپ به راست، در هر ستون به وزن عملکرد دانه ۵ درصد افزایش و وزن شاخص (WAASB) ۵ درصد کاهش می‌یابد و در ستون آخر سمت راست، ژنوتیپ‌ها فقط بر اساس عملکرد دانه با وزن ۱۰۰ درصد رتبه‌بندی شده‌اند. از مهمترین مزیت‌های این بای‌پلات نسبت به روش AMMI این است که در محاسبه آن از همه مؤلفه‌های IPCA استفاده می‌شود. ژنوتیپ‌های G9، G12 و G3 با توجه به نخستین ستون از چپ، به‌عنوان ژنوتیپ‌های پایدار و ژنوتیپ‌های G1، G2 و G15 به‌عنوان ژنوتیپ‌هایی با پایداری کم شناخته شدند اما چون عملکرد در نظر گرفته نشده است این گزینش چندان اعتباری ندارد. در ستون اول سمت راست که تنها بر اساس عملکرد رتبه‌بندی شده‌اند



شکل ۵- رتبه‌های ۱۶ ژنوتیپ عدس با در نظر گرفتن وزن‌های مختلف برای پایداری و عملکرد

نتیجه‌گیری کلی

بر اساس ترکیب دو روش AMMI و BLUP سه مؤلفه اول شناسایی شد در مجموع مؤلفه‌های اصلی اول و دوم به‌طور تجمعی حدود ۸۷/۸ درصد از کل واریانس اثر متقابل ژنوتیپ و محیط را به خود اختصاص دادند. آزمون نسبت درست‌نمایی LRT مشخص‌کننده معنی‌داری اثر متقابل ژنوتیپ و محیط بود. بر اساس بای‌پلات عملکرد دانه در مقابل میانگین وزنی نمرات مطلق، بای‌پلات از چهار بخش تشکیل شده است. با توجه به مقایسه میانگین عملکردهای برآورد شده به روش BLUP ژنوتیپ‌های با عملکرد پیش‌بینی شده بالا، ژنوتیپ‌های برتر می‌باشند. بر این اساس ژنوتیپ‌های G5، G10، G9، G11، G4 و G12 ژنوتیپ‌های برتر بودند که همگی میانگین عملکرد بالایی نیز داشتند بر اساس عملکرد اسمی دانه در برابر نمرات نخستین محور مؤلفه اصلی ژنوتیپ‌های G4، G5 و G11 ژنوتیپ‌های پایدار بودند. با توجه به بای‌پلات عملکرد دانه در مقابل میانگین وزنی نمرات مطلق برای بهترین پیش‌بینی‌های ناریب خطی، بای‌پلات از چهار بخش تشکیل شد. در ربع چهارم ژنوتیپ‌های G5، G10، G9، G11، G4 و G12 ژنوتیپ‌های پایدار با عملکرد بالا بودند. بر اساس انتخاب

همزمان میانگین عملکرد دانه و شاخص پایداری WAASB و ژنوتیپ‌ها با معیار WAASBY به‌ترتیب ژنوتیپ‌های G5، G11، G4، G9 و G12 ژنوتیپ‌های پایدار بودند. در مجموع ژنوتیپ‌های G5 (FLIP2014-032L)، G4 (FLIP2014-103L) و G11 (FLIP2014-021L)، با میانگین عملکرد دانه به‌ترتیب ۱۵۷۴/۶۸، ۱۴۸۴/۷۴ و ۱۴۵۲/۵۴ کیلوگرم در هکتار به‌عنوان ژنوتیپ‌های پایدار با عملکرد بالا شناسایی شدند. این ژنوتیپ‌ها می‌توانند کاندید مناسبی برای کشت در محیط‌های مختلف مشابه با اقلیم مورد مطالعه در این پژوهش باشند و یا از آن‌ها در برنامه‌های اصلاحی برای بالا بردن عملکرد به‌عنوان یکی از والدین در تلاقی‌ها استفاده کرد. با توجه به نتایج این پژوهش ترکیب دو روش AMMI و BLUP برای انتخاب ژنوتیپ پایدار با عملکرد بالا مفید می‌باشد.

سپاسگزاری

نویسندگان از همراهی و زحمات تمامی دست‌اندرکاران و متخصصان محترم ایستگاه تحقیقاتی سراب چنگائی (وابسته به مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان لرستان) تشکر و قدردانی می‌نمایند.

منابع

- Akbarpour, O. (2017). Application of variance components estimators in plant breeding. *Plant Genetic Researchs*, 4 (1), 1–24. <https://doi.org/10.29252/pgr.4.1.1>
- Alipour, H., Abdi, H., Rahimi, Y., & Bihamta, M. R. (2019). Investigating grain yield and yield stability of wheat cultivars introduced in Iran over the last half century. *Cereal Research*, 9, 157–167. <https://doi.org/10.22124/C.2019.13311.1492>
- Alizadeh, B., Rezaizad, A., Yazdandoost, M., Hamedani, Shiresmaeili, G., Nasserghadimi, F., Khademhamzeh, H., & Gholizadeh, A. (2020). Evaluation of seed yield stability of winter rapeseed (*Brassica napus* L.) genotypes using non-parametric methods. *Journal of Crop Breeding*, 35, 202–212. <https://doi.org/10.52547/jcb.12.35.202>
- Abo-Hegazy, S. R., Selim, T., & EL-Emam, E. A. A. (2012). Correlation and path coefficient analyses of yield and some yield components in lentil. *Egyptian Journal of Plant Breeding*, 16 (3), 147–159. <https://doi.org/10.12816/0003954>
- Badooei Delfard, R., Mostafavi, Kh., & Mohammadi, A. (2016). Genotype-environment interaction and yield stability of winter barley varieties (*Hordeum vulgare* L.). *Journal of Crop Breeding*, 20, 99–106. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.22286128.1395.8.20.1.8>
- Baggar, A., Safi, A., Gaboun, F., Taghouti, M., & Benbrahim, N. (2023). Identification of stable lentil genotypes through genotype by environment interactions on yield potential in Morocco. *Plant Science Today*, 10, 57–66. <http://dx.doi.org/10.14719/pst.1814>
- Dehghanpour, Z., Karimizadeh, R., Dehghani, H., & Sabaghnia, N. (2007). Determination of adaptability and stability of seed yield of foreign early maturity corn hybrids. *Iranian Journal of Agricultural Sciences*, 38, 249–257. (In Persian).

- Farshadfar, E. (2008). Incorporation of AMMI stability value and grain yield in a single nonparametric index (GSI) in bread wheat. *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 11 (14), 1791–1796. <https://doi.org/10.3923/pjbs.2008.1791>
- Gabriel, K. R. (1971). The biplot graphic display of matrices with application to principal component analysis. *Biometrika*, 58 (3), 453–467. <https://doi.org/10.1093/biomet/58.3.453>
- Gauch, H. G., & Zobel, R. W. (1988). Predictive and postdictive success of statistical analyses of yield trials. *Theoretical and Applied Genetics*, 76 (1), 1–10. <https://doi.org/10.1007/BF00288824>
- Karimizadeh, R., Pezeshkpour, P., Barzali, M., Mehraban, A., & Sharifi, V. (2021). Evaluation of the mean performance and stability of lentil genotypes by combining features of AMMI and BLUP techniques. *Journal of Crop Breeding*, 12 (36), 160–170. <https://doi.org/10.52547/jcb.12.36.160>
- Khan, M. A. U., Mohammad, F., Khan, F. U., Ahmad, S., Raza, M. A., & Kamal, T. (2020). Comparison among different stability models for yield in bread wheat. *Sarhad Journal of Agriculture*, 36 (1), 282–290. <http://doi.org/10.17582/journal.sja/2020/36.1.282.290>
- Mohammadi, M., Sharifi, P., & Karimizadeh, R. (2014). Stability analysis of seed yield of safflower genotypes (*Carthamus tinctorius* L.). *Journal of Crop Breeding*, 7 (16), 104–114. <http://doi.org/10.29252/jcb.10.26.139>
- Najafi Mirak, T., Dastfal, M., Sayyahfar, M., Farzadi, H., Sasani, Sh., Zali, H., & Naghipour, F. (2023). Investigating the grain yield stability of promising durum wheat lines using the combination of AMMI and BLUP methods. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 34 (2), 281–298. <https://doi.org/10.22034/SAPS.2023.54991.2973>
- Namdari, A., Pezeshkpour, P., Meraban, A., Mirzaei, A., & Barzali, M. (2023). Assessment of seed yield stability of advanced rainfed lentil lines in multi-environmental trials using WAASB and WAASBY indices. *Journal of seed ad plant*, 38 (2), 129–146. <https://doi.org/10.22092/SPJ.2023.360785.1283>
- Olivoto, T., Lúcio, A. D. C., da Silva, J. A. G., Marchioro, V. S., de Souza, V. Q., & Jost, E. (2019). Mean performance and stability in multi-environment trials I: Combining features of AMMI and BLUP techniques. *Agronomy Journal*, 111 (6), 2949–2960. <https://doi.org/10.2134/agronj2019.03.0220>
- Pezeshkpour, P., & Karimizadeh, R. (2023). Evaluation of the mean performance and stability of chickpea genotypes by integration of AMMI and BLUP models and selection based on multi-trait stability index (MTSI). *Journal of Crop Breeding*, 46 (15), 73–83. (In Persian).
- Pezeshkpour, P., Karimizadeh, R., Mirzaei, A., & Barzali, M. (2021). Analysis of yield stability of lentil genotypes using AMMI method. *Journal of Crop Breeding*, 10 (13), 132–145. <http://dx.doi.org/10.52547/jcb.13.37.132>
- Pezeshkpour, P., Mirzaei, A., & Karami, I. (2023). Evaluation of mean yield and stability of lentil genotypes using WAASB index and linear mixed effects model (LMM). *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 34, 95–115. <https://doi.org/10.22034/saps.2023.53912.2941>
- Pour Aboughadareh, A., Barat, A., Zali, H., Koohkan, Sh., Hosseinpour, A., Gholipour, A., & Marzoghian, A. (2023). Analysis of genotype-by-environment interaction in advanced genotypes of barley using AMMI and BLUP-based indices. *Journal of Crop Breeding*, 45 (15), 1–10. (In Persian).
- Saleem, A., Ashraf Zahid, M., Iqbal Javed, H., & Ansar, M. (2012). Effect of seeding rate on lentil (*Lens culinaris* Medik). *Pakistan Journal of Agricultural Research*, 25 (4), 312–316
- 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>
- Sharifi, P., Abbasian, A., & Mohaddesi, A. (2021). Evaluation of the mean performance and stability of rice genotypes by combining features of AMMI and BLUP techniques and selection based on multiple traits. *Plant Genetic Researches*, 7 (2), 163–180. <https://doi.org/10.52547/pgr.7.2.13>
- Shiri, M., Moharramnejad, S., Estakhr, A., Fareghi, Sh., Najafinezhad, H., Khavari Khorasani, S., Afarinesh, A., Anvari, K., & Eshraghi-Nejad, M. (2024). Determining the stability of new maize hybrids with WAASBY and MTSI indices. *Journal of Crop Breeding*, 16 (2), 14–28. <https://doi.org/10.61186/jcb.16.2.14>
- Soughi, H., Vahabzadeh, M., Kalateh Arabi, M., Jafar Bay, J. A., Khavari Nezhad, S., Ghasemi, M., Falahi, H., & Amini, A. (2009). Study on grain yield stability of some promising bread wheat lines in northern warm and humid climate of Iran. *Seed and Plant Improvement Journal*, 25 (1), 211–222. (In Persian). <https://doi.org/10.22092/SPIJ.2017.111023>
- Yan, W., Kang, M. S., Ma, B., Woods, S., & Cornelius, P. L. (2007). GGE biplot vs. AMMI analysis of genotype-by-environment data. *Crop Science*, 47 (2), 643–653. <https://doi.org/10.2135/cropsci2006.06.0374>

Evaluation of genotype by environment interaction of lentil genotypes using the combination of AMMII and BLUP

Samaneh Akbari¹, Omidali Akbarpour^{2*}, Payam Pezeshkpour³

1. MSc. graduate, Department of Production Engineering and Plant Genetics, Faculty of Agriculture Lorestan University, Khorramabad, Iran

2. Assistant Professor, Department of Production Engineering and Plant Genetics, Faculty of Agriculture Lorestan University, Khorramabad, Iran

3. Assistant Professor, Crop and Horticultural Science Research Department, Lorestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center (AREEO), Khorramabad, Iran

Received: 11-12-2024

Accepted: 10-10-2025

Abstract

This research aimed to estimate the genotype-environment interaction and select stable genotypes using a combination of AMMII and BLUP methods. In this study, 14 lentil genotypes along with two check cultivars, Sepehr and Gachsaran, were evaluated over four cropping years (2016-2020) in a randomized complete blocks design with three replications at the Sarab Chengai Agricultural Research Station in Khorramabad, Iran. The combined analysis results showed that genotype and environment main effects, and the genotype-environment interaction were significant. Using a combination of AMMII and BLUP methods, the stability of the genotypes was assessed. The first and second principal components cumulatively accounted for approximately 87.8% of the variances in the genotype-environment interaction. The likelihood ratio test (LRT) confirmed the significance of the genotype-environment interaction. According to the best linear unbiased predictions (BLUP) method, the WAASB and WAASBY indices, and nominal grain yield against the scores of the first axis of the principal environmental component of interaction (IPCA1), genotypes G5, G11, and G4 were identified as stable genotypes with high yield. Based on the results of this research, genotypes (FLIP2014-032L) G5, (FLIP2014-103L) G11, and (FLIP2014-021L) G4, with average grain yields of 1574.68, 1484.74, and 1452.54 kg ha⁻¹ respectively, were introduced as stable genotypes and are recommended for cultivation in environments similar to the studied climate.

Keywords: Biplot, Combined analysis, Grain yield, Likelihood ratio test, Stability

Citation: Akbari, S., Akbarpour, A., & Pezeshkpour, P. (2025). Evaluation of genotype by environment interaction of lentil genotypes using the combination of AMMII and BLUP. *Plant Production and Genetics*, 6(1), 73-86. <https://doi.org/10.22034/plant.2025.142663.1137>

Copyrights:

Copyrights rights for this article is retained by the author (s), with publication rights granted to Plant Production and Genetics. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.



*Corresponding Author Email: akbarpour.aa@lu.ac.ir