

Research Paper

Grain Yield Stability Analysis of Lentil Genotypes by AMMI Indices

Payam Pezeshkpour¹ , Reza Amiri², Iraj Karami³ and Amir Mirzaei⁴

1- Assistant Professor, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Crop and Horticultural Science Research Department, Lorestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Lorestan, Iran, (Corresponding author: Papezeshkpour@yahoo.com)

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

3- Researcher, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Dryland Agricultural Research Institute, Sararood Branch, Kermanshah, Iran

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

Received: 11 February, 2024

Accepted: 28 April, 2024

Extended Abstract

Background: Due to the presence of nitrogen-fixing bacteria in its roots, the lentil plant causes biological nitrogen fixation, and in addition to meeting the plant's need for this substance, they also add some pure nitrogen to the soil each year. Therefore, it has made the soil fertile, especially in dry areas, and in this sense, it is considered a suitable rotation for rainfed cereals. Lentils are a significant source of food proteins, minerals (potassium, phosphorus, iron, and zinc), carbohydrates, and vitamins in human nutrition and have high health benefits due to their low fat content and glycemic index. The low yield of lentil genotypes is caused by various factors, including poor soil fertility, lack of high-yielding improved cultivars, severe moisture stress, diseases, pests, weeds, and inadequate crop management skills. In recent years, global climate change, especially due to rainfall and environmental changes, has significantly impacted lentil production. In Iran, lentils are usually cultivated in spring under rainfed conditions while autumn cultivation increases grain yield due to increasing rainfall efficiency compared to spring cultivation under rainfed conditions. In addition, to maximize yield and control phenotypic expression, breeders must select specific genotypes that are stable or adapted to a specific environment. Therefore, the identification of high-yield genotypes with adaptation to a wide range of environments is one of the major goals in crop breeding programs. In multi-environment experiments, lentil yield is influenced by the genetic structure, environment, and genotype $\times$ environment interaction. To better interpret the genotype $\times$ environment interaction, the additive main effects and multiplicative interaction (AMMI) model is one of the most common methods in the study of multi-environment experiments. The current study aimed to investigate the genotype $\times$ environment interaction effect on lentil genotypes and to identify stable, high-yielding genotypes compatible with the climatic conditions of temperate rainfed regions in Iran.

Methods: In this study, 12 promising lentil genotypes along with “local”, “Kimia”, and “Gachsaran” cultivars were cultivated in a randomized complete block design for three consecutive cropping years (2019-2022) in Lorestan/Khoramabad, Ilam/Chardavel, and Kermanshah/Sararood. In the field, each plot consisted of 4 m planting rows with a distance of 25 cm and a density of 200 seeds per square meter. Stability analysis was performed using the AMMI multivariate method. Statistical analyses were performed using Metan and GGE packages of multi-environment experiments in R software.

Results: The AMMI analysis of variance showed the significant effects of the environment, genotype, the genotype $\times$ environment, and the first seven main components. Therefore, the significance of genotype $\times$ environment interaction allows for the stability analysis of these data. According to AMMI analysis, the first and second main components of the genotype-environment interaction accounted for 45.6 and 19% of genotype $\times$ environment interaction variations, respectively. The effect of the first seven main components was significant and in total explained 99.5% of the variations of genotype $\times$ environment interaction. The shares of the environment, genotype, and interaction of genotype $\times$ environment in the sum of total squares were 54.56, 5.45,

and 16.9%, respectively. Among the studied genotypes, the highest grain yield belonged to Genotype 10 with 850 kg/ha, followed by Genotypes 12, 6, and 4. Based on the ASV stability index, genotypes 3, 5, and 1, based on the SIPC index, genotypes 3, 1, 7, and 10, based on the EV index, genotypes 1, 10, and 3, and based on Za and WAAS indexes, genotypes 3, 1, 5, and 10 were the most stable genotypes. Based on the simultaneous selection index of ssiASV, genotypes 10, 4, 5, and 1, based on the ssiSIPC index, genotypes 10, 6, 7, and 4, based on the ssiEV index, genotypes 10, 6, 1, and 7, based on the ssiZA index, genotypes 1, 10, 6, and 7, and based on the ssiWAAS index, genotypes 1, 10, 6, and 3 were the best genotypes in terms of yield and stability. Based on the AMMI1 biplot, genotypes 1, 6, 10, and 11 with mean grain yield higher than the overall average and lowest values of IPCA1 were identified as stable genotypes with high general compatibility. In the AMMI2 biplot, genotypes 9, 11, 1, and 10 produced higher grain yields than the overall average, in addition to high general stability. In addition to the AMMI indices, Lin and Binn's superiority index was also used to identify the best genotypes, and based on this, genotypes 1, 10, 9, and 15 were the most stable genotypes in the studied environments. Using the AMMI distance parameter, genotypes 1, 3, 5, and 7 were recognized as genotypes with stable yields.

Conclusion: In general, genotypes 10 (09S96510-13) and 6 (ILL2261) produced high yields in most of the environments based on different indices and showed good stability in most methods. Therefore, they could be candidates for the introduction of new cultivars.

Keywords: Adaptability, Biplot, Lentil, Priority index, Yield stability

How to Cite This Article: Pezeshkpour, P., Amiri, R., Karami, I., & Mirzaei, A. (2024). Grain Yield Stability Analysis of Lentil Genotypes by AMMI Indices. *J Crop Breed*, 16(4), 1-12. DOI: [10.61186/jcb.16.4.1](https://doi.org/10.61186/jcb.16.4.1)



مقاله پژوهشی

تجزیه پایداری عملکرد دانه ژنوتیپ‌های عدس با استفاده از شاخص‌های AMMI

پیام پزشکیپور^۱، رضا امیری^۲، ایرج کرمی^۳ و امیر میرزایی^۴^۱- استادیار پژوهشی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان لرستان، لرستان، ایران، (نویسنده مسول: Papezhshkpour@yahoo.com)^۲- استادیار پژوهشی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان لرستان، لرستان، ایران^۳- کارشناس ارشد، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مؤسسه تحقیقات کشاورزی دیم، معاونت سرارود، کرمانشاه، ایران^۴- استادیار پژوهشی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان ایلام، ایلام، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۲/۹

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱/۲۲

صفحه: ۱ تا ۱۲

چکیده مبسوط

مقدمه و هدف: گیاه عدس به علت وجود باکتری‌های تثبیت کننده ازت در ریشه خود، موجب تثبیت بیولوژیکی نیتروژن گردیده و علاوه بر تأمین نیاز گیاه به این ماده، سالانه مقداری نیتروژن خالص نیز به خاک اضافه می‌کند. بنابراین موجب حاصلخیزی خاک مخصوصاً در مناطق دیم گردیده و از این حیث یک تناوب مناسب برای غلات دیم محسوب می‌شود. عدس در تغذیه انسان، منبع قابل توجهی از پروتئین‌های غذایی، مواد معدنی (پتاسیم، فسفر، آهن و روی)، کربوهیدرات‌ها و ویتامین‌ها را فراهم کرده و به دلیل دارا بودن محتوای چربی و شاخص گلیسمی پایین، مزایای سلامتی بسیار فراوانی دارد. عملکرد پایین ژنوتیپ‌های عدس به دلیل عوامل مختلفی از جمله حاصلخیزی ضعیف خاک، فقدان ارقام اصلاح شده پر محصول، شدت تنش رطوبتی، بیماری‌ها، آفات، علف‌های هرز و مهارت‌های ناکافی مدیریت محصول ایجاد می‌شود. در سالیان اخیر، تغییرات آب و هوایی جهانی، به ویژه به دلیل بارندگی و تغییرات زیست محیطی، تأثیر قابل توجهی بر تولید عدس داشته است. در ایران معمولاً عدس در شرایط دیم در بهار کشت می‌شود، حال آنکه کشت پاییزه آن از نظر افزایش راندمان بهره‌وری از بارش، موجب افزایش عملکرد دانه نسبت به کشت بهار در شرایط دیم می‌شود. علاوه بر این، برای به حداکثر رساندن عملکرد و کنترل بیان فنوتیپی، به‌نژادگران باید ژنوتیپ‌های خاصی را انتخاب کنند که در یک محیط خاص پایدار یا سازگار با آن باشند. بنابراین، شناسایی ژنوتیپ‌هایی با عملکرد بالا و سازگار به دامنه گسترده‌ای از محیط‌ها، یکی از هدف‌های عمده در برنامه‌های به‌نژادی گیاهان زراعی می‌باشد. در آزمایش‌های چند محیطی، عملکرد عدس تحت تأثیر ساختار ژنتیکی، محیطی و اثر متقابل ژنوتیپ × محیط قرار می‌گیرد. برای تفسیر بهتر برهمکنش ژنوتیپ × محیط، مدل اثرات اصلی افزایشی و برهمکنش ضرب پذیر (AMMI) یکی از متداول‌ترین روش‌ها در مطالعه آزمایش‌های چند محیطی است. هدف از پژوهش حاضر، بررسی برهمکنش ژنوتیپ و محیط بر ژنوتیپ‌های عدس و شناسایی ژنوتیپ‌های پایدار، پر محصول و سازگار با شرایط آب و هوایی مناطق دیم معتدل کشور بود.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش، ۱۲ ژنوتیپ امیدبخش عدس به همراه ارقام شاهد (توده محلی، کیمیا و بیله‌سوار) در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی به مدت سه سال زراعی متوالی (۱۳۹۸-۱۴۰۱) در لرستان (خرم‌آباد، ایلام (چرداول) و کرمانشاه (سرارود) کشت شدند. در مزرعه، هر کرت شامل چهار خط کاشت چهار متری با فاصله ۲۵ سانتی‌متر و تراکم ۲۰۰ دانه در مترمربع بود. تجزیه پایداری با استفاده از روش چندمتغیره امی انجام شد. تجزیه‌های آماری با استفاده از بسته تجزیه آزمایش‌های چندمحیطی با نام Metan و GGE در نرم‌افزار R انجام شد.

یافته‌ها: تجزیه واریانس AMMI نشان داد که اثرات محیط، ژنوتیپ، و برهمکنش ژنوتیپ × محیط و هفت مؤلفه اصلی اول معنی‌دار بودند. بنابراین، با توجه به معنی‌دار بودن برهمکنش ژنوتیپ × محیط، امکان انجام تجزیه پایداری روی این داده‌ها وجود دارد. بر اساس تجزیه AMMI، اولین و دومین مؤلفه اصلی برهمکنش ژنوتیپ در محیط، به ترتیب ۴۵/۶ و ۱۹ درصد از تغییرات برهمکنش ژنوتیپ × محیط را توجیه کردند. اثر هفت مؤلفه اصلی اول، معنی‌دار بود و در مجموع ۹۹/۵ درصد از تغییرات برهمکنش ژنوتیپ در محیط را توجیه کردند. سهم محیط، ژنوتیپ و برهمکنش ژنوتیپ × محیط در مجموع مربعات کل، به ترتیب ۵۴/۵۶، ۵/۴۵ و ۱۶/۹ درصد بود. در بین ژنوتیپ‌های مطالعه شده، بیشترین عملکرد دانه در ژنوتیپ شماره ۱۰ (۸۵۰ کیلوگرم در هکتار) و در پی آن در ژنوتیپ‌های شماره ۱۲، ۶ و ۴ دیده شد. بر اساس شاخص پایداری ASV، ژنوتیپ‌های شماره ۳، ۵ و ۱، بر اساس شاخص SIPC، ژنوتیپ‌های ۳، ۷ و ۱۰، بر اساس شاخص EV، ژنوتیپ‌های شماره ۱، ۱۰ و ۳ و بر اساس شاخص‌های Za و WAAS نیز ژنوتیپ‌های ۳، ۵ و ۱۰ پایداری‌ترین ژنوتیپ‌ها بودند. بر مبنای شاخص انتخاب همزمان ssiASV، ژنوتیپ‌های ۴، ۵ و ۱، بر مبنای شاخص ssiSIPC، ژنوتیپ‌های شماره ۱۰، ۶ و ۴، بر مبنای شاخص ssiEV، ژنوتیپ‌های ۱۰، ۶ و ۱، بر مبنای شاخص ssiZA، ژنوتیپ‌های شماره ۱، ۱۰، ۶ و ۷ و بر مبنای شاخص ssiWAAS، ژنوتیپ‌های ۱، ۱۰، ۶ و ۳ برترین ژنوتیپ‌ها از نظر عملکرد و پایداری بودند. بر اساس بای‌پلات AMMI1، ژنوتیپ‌های شماره ۱، ۱۰ و ۶ با عملکرد دانه بیشتر از عملکرد میانگین کل و کمترین مقادیر IPCA1، به عنوان ژنوتیپ‌های پایدار با سازگاری عمومی بالا شناسایی شدند. در بای‌پلات AMMI2، ژنوتیپ‌های ۹، ۱۱ و ۱۰ علاوه بر پایداری عمومی بالا، دارای عملکرد دانه بالاتر از میانگین کل بودند. علاوه بر شاخص‌های AMMI، از شاخص برتری لین و بینز برای شناسایی ژنوتیپ‌های برتر استفاده شد که بر این اساس ژنوتیپ‌های شماره ۱، ۱۰، ۹ و ۱۵، برترین ژنوتیپ‌ها در محیط‌های مطالعه شده بودند. با استفاده از پارامتر فاصله امی، ژنوتیپ‌های شماره ۱، ۳، ۵ و ۷ به عنوان ژنوتیپ‌های دارای عملکرد پایدار شناخته شدند.

نتیجه‌گیری: در مجموع و بر اساس شاخص‌های مختلف، ژنوتیپ‌های شماره ۱۰ (09S96510-13) و ۶ (ILL2261) در بسیاری از محیط‌ها، دارای عملکرد بالا و در بیشتر روش‌ها، دارای پایداری مطلوبی بودند و می‌توانند گزینه معرفی ارقام جدید باشند.

واژه‌های کلیدی: بای‌پلات، پایداری عملکرد، سازگاری، شاخص برتری، عدس

مقدمه

کربوهیدرات‌ها و ویتامین‌ها را فراهم کرده (Shrestha et al., 2018) و به دلیل دارا بودن محتوای چربی و شاخص گلیسمی پایین، مزایای سلامتی فراوانی دارد (Grusak, 2009). در سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۰، مجموع سطح زیر کشت عدس در کشور ۷۵۱۴۶ هکتار بوده است که از این مقدار ۷۰۱۵۱ هکتار به کشت دیم و ۴۹۹۵ هکتار به کشت آبی

عدس (*Lens culinaris* Medik.) به عنوان یکی از حبوبات غنی از مواد مغذی که در بسیاری از کشورها به صورت زمستانه کشت می‌گردد (Parihar et al., 2017)، در تغذیه انسان، منبع قابل توجهی از پروتئین‌های غذایی (۲۲-۲۵ درصد)، مواد معدنی (پتاسیم، فسفر، آهن و روی)،

محیط‌های مختلف انجام شده و سپس اثرات متقابل با روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی تحلیل و بررسی می‌شود (Gauch & Zobel, 1988).

تعدادی از پژوهشگران با روش‌های مختلف، پایداری ژنوتیپ‌های عدس را ارزیابی کرده‌اند. در پژوهشی با استفاده از روش‌های چندمتغیره تجزیه به مؤلفه‌های اصلی و بای‌پلات، پایداری ۱۱ ژنوتیپ عدس در هفت منطقه از ایران در سه سال زراعی ارزیابی و نشان داده شد که دو مؤلفه اصلی اول و دوم، به ترتیب ۶۱/۶ و ۳۱/۲ درصد از تغییرات برهمکنش ژنوتیپ در محیط را توجیه کردند (Dehghani et al., 2008). در پژوهشی دیگر و با ارزیابی ۱۸ ژنوتیپ عدس با روش GGE بای‌پلات نشان داده شد که دو مؤلفه اصلی اول، به ترتیب ۴۹ و ۲۰ درصد از مجموع مربعات برهمکنش ژنوتیپ در محیط را توجیه نموده و در بای‌پلات به دست آمده از این دو مؤلفه، ژنوتیپ‌های پایدار شناسایی شدند (Karimizadeh et al., 2013b). همچنین در تحقیق دیگر، در ارزیابی پایداری ۱۰ ژنوتیپ عدس با روش GGE بای‌پلات، توجیه ۴۸ و ۴۱ درصد از برهمکنش ژنوتیپ در محیط با دو مؤلفه اصلی اول و دوم دیده شد و بنابراین با اطمینان بالا نسبت به ارزیابی پایداری ژنوتیپ‌ها و شناسایی ژنوتیپ‌های پایدار اقدام گردید (Karimizadeh et al., 2013a). ارزیابی ۱۰ ژنوتیپ عدس با روش تجزیه پایداری AMMI نشان داد که اثر محیط، ژنوتیپ و برهمکنش ژنوتیپ در محیط معنی‌دار بود و این سه جزء به ترتیب ۸۹/۲، ۲ و ۸/۶ درصد از مجموع مربعات کل ترکیبات تیماری را در بر گرفتند (Karimizadeh & Mohammadi, 2010). با روش‌های ناپارامتری، پایدارترین ژنوتیپ‌های عدس در مناطق معتدل و نیمه‌گرمسیری ایران تعیین شدند (Sabaghnia et al., 2006).

هدف این پژوهش، بررسی برهمکنش ژنوتیپ و محیط بر ژنوتیپ‌های عدس و شناسایی ژنوتیپ‌های پایدار، پرمحصول و سازگار با شرایط اقلیمی مناطق دیم معتدل با استفاده از روش‌های تجزیه پایداری AMMI و ناپارامتری رتبه بود.

مواد و روش‌ها

برای انجام این پژوهش، تعداد ۱۲ ژنوتیپ عدس که از آزمایش‌های پیشرفته مقایسه عملکرد گزینش شده بودند، همراه ارقام شاهد (کیمیا، گچساران و توده محلی) (جدول ۱) در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار و سه منطقه لرستان/خرم آباد (ایستگاه تحقیقات کشاورزی سراب چنگائی خرم‌آباد)، ایلام/چرداول (ایستگاه تحقیقات کشاورزی زنجیره چرداول) و کرمانشاه/سرارود (معاونت موسسه تحقیقات کشاورزی دیم کشور) به مدت سه سال زراعی (۱۳۹۸-۱۴۰۱) مورد مطالعه قرار گرفتند. تاریخ کاشت بسته به وضعیت بارنگی مؤثر در سه سال زراعی در مناطق مختلف از نیمه دوم آبان ماه تا نیمه دوم آذر ماه انجام شد. در مزرعه، هر کرت شامل چهار خط کاشت چهار متری با فاصله ۲۵ سانتی‌متر و تراکم ۲۰۰ دانه در مترمربع بود. در هر سال پیش از کشت، زمینی که در سال پیش از آن آیش و یا در تناوب با غلات دیم بوده، با گاوآهن چپزل مرکب شخم زده شد و با دیسک و روتواتور نرم شد. کود شیمیایی برمبنای ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار فسفات

اختصاص داشته است. استان لرستان با ۶۸۰۲ هکتار سطح زیرکشت در رتبه چهارم و با میزان تولید ۳۰۶۰ تن در رتبه سوم کشور قرار گرفته و همواره جزو استان‌های پیشرو در این زمینه است (Anonymous, 2023). طبق این آمار، عملکرد عدس دیم در کشور ۴۸۰ کیلوگرم در هکتار و عملکرد عدس آبی ۱۴۴۵ کیلوگرم در هکتار گزارش شده است. عملکرد پایین ژنوتیپ‌های عدس به دلیل عوامل مختلف موانع تولید، از جمله حاصلخیزی ضعیف خاک، فقدان ارقام اصلاح شده پرمحصول، شدت تنش رطوبتی، بیماری‌ها، آفات، علف‌های هرز و مهارت‌های ناکافی مدیریت محصول ایجاد می‌شود. در سالیان اخیر، تغییرات آب و هوایی جهانی، به‌ویژه به دلیل بارندگی و تغییرات زیست محیطی، تأثیر قابل‌توجهی بر تولید عدس داشته است. از آنجا که در ایران معمولاً عدس در شرایط دیم در بهار کشت می‌شود، کشت پاییزه آن از نظر افزایش راندمان بهره‌وری از بارش، موجب افزایش عملکرد دانه نسبت به کشت بهاره در شرایط دیم می‌شود (Sabaghnia et al., 2006).

اگرچه عملکرد دانه تحت تأثیر صفات زراعی زیادی قرار می‌گیرد (Hossain et al., 2023)، برای به حداکثر رساندن عملکرد و کنترل بیان فنوتیپی، به‌نژادگران باید ژنوتیپ‌های خاصی را انتخاب کنند که در یک محیط خاص پایدار یا سازگار با آن باشند. پایداری به معنای ثبات تنوع در نوسانات محیطی است (Hasan et al., 2022). محیط نقش مهمی در برهمکنش ژنوتیپ در محیط ایفا می‌کند که بر تولید محصول تأثیرگذار است (Islam et al., 2012). بنابراین، دستیابی به ارقامی که بتواند به طیف گسترده‌ای از مناطق سازگار باشد، یکی از هدف‌های مهم در برنامه‌های به‌نژادی است (Karimizadeh et al., 2013a). سازگاری ممکن است در نتیجه یک واکنش ویژه برای تحمل خشکی، سرما، یخبندان و غیره و یا نسبت به دامنه گسترده‌ای از شرایط گوناگون محیطی در تولید عملکرد بالا باشد (Hawtin et al., 1996). آگاهی از برهمکنش ژنوتیپ × محیط به به‌نژادگران کمک می‌کند که در ارزیابی ژنوتیپ‌ها با دقت بیشتری عمل نمایند و بهترین ژنوتیپ‌ها را گزینش کنند (Lin et al., 1986).

با توجه به اینکه تجزیه واریانس مرکب، فقط اطلاعاتی درباره برهمکنش ژنوتیپ و محیط به دست می‌دهد، پژوهشگران روش‌های گوناگونی را برای تعیین میزان پایداری عملکرد ژنوتیپ‌ها و گروه‌بندی آن‌ها در گیاهان زراعی از جمله در عدس به کار برده‌اند. ژنوتیپ پایدار در روش‌های ناپارامتری تجزیه پایداری، رتبه‌های همانندی در محیط‌های مختلف خواهد داشت و در نتیجه، دارای کم‌ترین رتبه واریانس در محیط‌های مختلف خواهد بود. در این روش‌ها، برقراری فرض‌های اولیه همچون نرمال بودن توزیع، مستقل بودن و یکنواختی واریانس‌ها ضرورتی ندارد (Bortz et al., 1990) و همچنین اضافه یا کم کردن یک یا تعداد کمی از ژنوتیپ‌ها، بر شاخص پایداری اثری ندارد. تجزیه، تحلیل و تفسیر معیارهای ناپارامتری، بسیار ساده‌تر از معیارهای پارامتری است (Nassar & Huehn, 1987). در روش چند متغیره اثرات اصلی جمع‌پذیر و اثرات متقابل ضرب‌پذیر (AMMI)، ابتدا تجزیه واریانس معمولی روی داده‌های مربوط به عملکرد ژنوتیپ‌ها در

برای تعیین کمیت پایداری ژنوتیپی، از تجزیه مقادیر منفرد (SVD)، بر روی ماتریس بهترین پیش‌بینی‌های ناریب خطی (BLUP) برهمکنش‌های ژنوتیپ در محیط (GEI) با یک مدل اثر مختلط خطی (LMM) استفاده شد. اجرای واریانس با روش حداکثر درست‌نمایی محدود شده (REML, Restricted maximum likelihood) برآورد شدند و برای ارزیابی معنی‌داری اثرهای تصادفی، آزمون نسبت درست‌نمایی (LRT) (Likelihood Ratio Test) به کار گرفته شد. مدل آماری BLUP راهکاری برای توانایی پیش‌بینی بهتر است که در آن بهترین پیش‌بینی‌های ناریب خطی بر روی ماتریس برهمکنش ژنوتیپ در محیط تخمین زده می‌شود و تجزیه پایداری به روش AMMI بر روی این پیش‌بینی‌ها انجام می‌شود (Olivoto *et al.*, 2019).

پارامترهای پایداری استفاده شده در این پژوهش در جدول ۴ نشان داده شده است.

آمونوم و ۳۵ کیلوگرم در هکتار آورده، به‌هنگام عملیات تهیه زمین، به‌طور یکنواخت با خاک مخلوط شد. ویژگی‌های جغرافیایی و میزان بارندگی سالانه مناطق اجرای آزمایش، به‌ترتیب در جدول‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است. قبل از برداشت دو خط کناری و نیم متر از ابتدا و انتهای دو خط وسط حذف و محصول از مابقی هر کرت (۱/۵ متر مربع) برداشت شد. مبارزه با علف‌های هرز به‌صورت وجین دستی و با استفاده از کولتیواتور دستی در دو مرحله در طول دوره رشد رویشی انجام شد. عملکرد دانه در سال‌های مختلف برای هر ژنوتیپ بر اساس کیلوگرم در هکتار اندازه‌گیری شد.

تجزیه‌های آماری با استفاده از بسته تجزیه آزمایش‌های چند محیطی با نام $Metan^1$ (Olivoto & DalCol Lucio, 2020) و GGE (Wright & Laffont, 2018) در نرم‌افزار R انجام شد.

جدول ۱- اسامی ارقام و ژنوتیپ‌های امیدبخش عدس مورد استفاده در آزمایش

Table 1. Names of promising lentil cultivars and genotypes used in the experiment

نام ژنوتیپ	کد ژنوتیپ	نام ژنوتیپ	کد ژنوتیپ	نام ژنوتیپ	کد ژنوتیپ
Genotype name	Genotype code	Genotype name	Genotype code	Genotype name	Genotype code
09S83191-05	G11	ILL2261	G6	010S96146-5	G1
ILL1325	G12	010S961130-2	G7	2009S96575-1	G2
Local	G13	010S916122-3	G8	Ibia-1	G3
Kymia	G14	09S182109-16	G9	09S83227-04	G4
Bileh Savar	G15	09S96510-13	G10	010S96105-1	G5

جدول ۲- ویژگی‌های جغرافیایی مناطق اجرای آزمایش

Table 2. Geographic characteristics of experimental area

شرایط اقلیمی	میانگین بارندگی (میلی‌متر)	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	ارتفاع از سطح دریا (متر)	منطقه
(Climatic condition)	Average rainfall (mm)	Latitude	Longitude	Above mean sea level (m)	Location
Moderat cold	445	33° 29' N	48° 18' E	1147	Lorestan/Khoramabad
Moderat warm	350	36° 46' N	47° 33' E	975	Ilam/Chardavel
Moderat warm	420	34° 20' N	47° 20' E	1351	Kermanshah/sararood

جدول ۳- میزان بارندگی سالانه مناطق اجرای آزمایش در طول فصل زراعی در سال‌های ۱۳۹۸ تا ۱۴۰۱

Table 3. Annual rainfall of experimental areas during the cropping seasons (2019-2022)

1400-1401	1399-1400	1398-1399	منطقه
2021-2022	2020-2021	2019-2020	Location
307 (E3)	305 (E2)	524 (E1)	Lorestan/Khoramabad
261 (E6)	313 (E5)	520 (E4)	Ilam/Chardavel
224 (E9)	301 (E8)	604 (E7)	Kermanshah/sararood

E1 to E9 represent environments 1 to 9, respectively

E1 to E9 به‌ترتیب نشان‌دهنده محیط‌های ۱ تا ۹ هستند

جدول ۴- شاخص‌های تجزیه پایداری

Table 4. Stability analysis indices

منبع	رابطه	شاخص	شماره
References	Formula	Index	No.
Purchase <i>et al.</i> , 2000	$ASV = \sqrt{\frac{SSIPC1}{SSIPC2}} (IPC1)^2 + (IPC2)^2$	AMMI Stability Value (ASV)	1
Sneller <i>et al.</i> , 1997	$SIPC = \sum_{n=1}^N \lambda_n^{0.5} \gamma_{in}$	Sum of IPCs Scores (SIPC)	2
	$EV = \sum_{n=1}^N \gamma_{in}^2 / n$	Eigenvalue (EV) stability parameters of AMMI	3
Zali <i>et al.</i> , 2012	$Za_i = \sum_{n=1}^N \theta_n \gamma_{in} $	Absolute value of the relative contribution of IPCs to the interaction (Za)	4
Olivoto <i>et al.</i> , 2019a	$WAAS_i = \frac{\sum_{n=1}^N IPCA_{in} \times EP_n }{\sum_{n=1}^N EP_n}$	Weighted average of absolute scores (WASS)	5
Farshadfar, 2008	$SSI = R(\text{AMMI Stability Indices}) + RY$	Simultaneous selection index (SSI)	6
Lin & Binns, 1988	$P_i = \frac{\sum_{j=1}^n (X_{ij} - M_{.j})^2}{2n}$	Superiority index (Pi)	7

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

i = ۱, ..., ۱۵ (تعداد ژنوتیپ‌ها); n = ۱, ..., p (تعداد مؤلفه‌های اصلی)

در رابطه ۱ (ASV)، نسبت $\frac{SSIPC1}{SSIPC2}$ وزن اختصاص داده شده به نخستین محور مؤلفه اصلی (IPC1) است که با تقسیم مجموع مربعات IPC1 بر مجموع مربعات IPC2 (دومین محور مؤلفه اصلی) به‌دست می‌آید. ارزیابی ژنوتیپ‌ها با این شاخص، فقط بر اساس دو مؤلفه اصلی اول انجام می‌شود. در رابطه ۲، $\lambda_n^{0.5}$ ریشه IPC در محور nام است. در این رابطه، برای

در رابطه ۱ (ASV)، نسبت $\frac{SSIPC1}{SSIPC2}$ وزن اختصاص داده شده به نخستین محور مؤلفه اصلی (IPC1) است که با تقسیم مجموع مربعات IPC1 بر مجموع مربعات IPC2 (دومین محور مؤلفه اصلی) به‌دست می‌آید. ارزیابی ژنوتیپ‌ها با این شاخص، فقط بر اساس دو مؤلفه اصلی اول انجام می‌شود. در رابطه ۲، $\lambda_n^{0.5}$ ریشه IPC در محور nام است. در این رابطه، برای

(IPC2) مؤلفه اصلی برهمکنش ژنوتیپ در محیط، به‌ترتیب ۴۵/۶ و ۱۹ درصد از تغییرات برهمکنش ژنوتیپ $\times$ محیط را توجیه کردند و مؤلفه‌های باقیمانده در درجه‌های بعدی اهمیت قرار داشتند (جدول ۵). در تطابق با این نتیجه، پژوهشگران دیگری نیز سهم ۶۱/۶ و ۳۱/۲ درصدی (Dehghani *et al.*, 2008)، ۴۹ و ۲۰ درصدی (Karimizadeh *et al.*, 2013b) و ۴۸ و ۴۱ درصدی (Karimizadeh *et al.*, 2013a) دو مؤلفه اصلی اول و دوم را در برهمکنش ژنوتیپ $\times$ محیط در ارزیابی ژنوتیپ‌های عدس نشان دادند.

این نتایج همچنین نشان داد که اثر هفت مؤلفه اصلی اول، معنی‌دار بود و در مجموع ۹۹/۵ درصد از تغییرات برهمکنش ژنوتیپ در محیط را توجیه کردند. سهم محیط، ژنوتیپ و برهمکنش ژنوتیپ $\times$ محیط در مجموع مربعات کل، به‌ترتیب ۵۴/۵۶، ۵/۴۵ و ۱۶/۹ درصد بود (جدول ۵). در تطابق با این نتیجه، سهم بیشتر اثر محیط در مجموع مربعات کل برای عملکرد دانه ژنوتیپ‌های عدس گزارش شده است (Karimizadeh & Mohammadi, 2010). اثر معنی‌دار ژنوتیپ و محیط، نشانه‌ای از پیش‌زمینه ژنتیکی گسترده مواد آزمایشی و تنوع مکان‌های آزمایشی و سال‌های زراعی است. اثر معنی‌دار برهمکنش ژنوتیپ $\times$ محیط، عملکرد متفاوت ژنوتیپ‌ها را در محیط‌های مختلف نشان می‌دهد. بنابراین با توجه به وابستگی تنوع عملکرد دانه ژنوتیپ‌های عدس به محیط، نیاز به انجام تجزیه‌های بیشتر برای افزایش بازده گزینش ژنوتیپ‌ها است. به‌عبارت دیگر، وجود برهمکنش ژنوتیپ $\times$ محیط، ضرورت تشخیص عملکرد و سازگاری ژنوتیپ‌ها را براساس ارزیابی‌ها در چندین مکان و سال زراعی نشان می‌دهد. کاهش برهمکنش ژنوتیپ $\times$ محیط متضمن گزینش ژنوتیپ‌هایی با بالاترین پایداری در طیف گسترده‌ای از محیط‌ها است. از آنجاکه برهمکنش ژنوتیپ در محیط می‌تواند هرگونه پیشرفت برآمده از گزینش را کاهش دهد، بنابراین در گزینش ارقام، تلفیق پایداری با عملکرد می‌تواند نتایج خوبی را در پی داشته باشد. معنی‌دار شدن اثر هفت مؤلفه اصلی، بر پیچیدگی زیاد اثر توأم ژنوتیپ و محیط در این آزمایش دلالت دارد و از این‌رو، برای کاهش تأثیرات منفی این پیچیدگی، پژوهشگر باید از شاخص‌هایی در تجزیه پایداری استفاده کند که در برآورد آن‌ها، تعداد بیشتری از مؤلفه‌ها نقش دارند.

با رابطه‌های ۲ تا ۴ بر پایه تمام مؤلفه‌های اصلی باقیمانده در مدل انجام می‌شود و از این‌رو، می‌تواند نسبت به شاخص ASV دارای برتری باشند. چهار شاخص بالا، برای شناسایی ژنوتیپ‌های پایدار، بدون در نظر گرفتن عملکرد دانه به‌کار گرفته می‌شوند و براساس آن، ژنوتیپ‌های دارای کمترین میزان این شاخص‌ها، پایدار در نظر گرفته می‌شوند. در رابطه ۵، $WAAS_i$ میانگین وزنی نمرات مطلق^۱ ژنوتیپ i ؛ $IPCA_{in}$ نمره ژنوتیپ i ؛ EP_n مقدار واریانس توجیه شده توسط n آمین (IPCA)، مقدار واریانس توجیه شده توسط n آمین است. ژنوتیپ با کمترین مقدار $WAAS$ ، پایدار در نظر گرفته می‌شود (Olivoto *et al.*, 2019). در رابطه ۶، $R(AMMI \text{ stability Indices})$ رتبه ژنوتیپ‌ها بر پایه هرکدام از شاخص‌های پایداری AMMI، و RY رتبه میانگین عملکرد دانه ژنوتیپ‌ها در تمام محیط‌ها است. کاربرد این شاخص برای شناسایی ژنوتیپ‌های برتر از نظر عملکرد دانه و پایداری عملکرد دانه است که در گزینش ژنوتیپ‌ها به هر دو شاخص میانگین عملکرد دانه و پایداری عملکرد دانه توجه شده است. نمودارهای بای‌پلات نوع اول ($AMMI1 = IPCA1 \text{ vs } seed \text{ yield}$) و نوع دوم ($AMMI1 = IPCA1 \text{ vs } IPCA2$) با روش استاندارد کشیده شدند (Zobel *et al.*, 1988). شاخص برتری با رابطه ۷ محاسبه شد (Lin & Binns, 1988) که در آن، P_i ، برتری ژنوتیپ i ؛ X_{ij} ، عملکرد ژنوتیپ i در محیط j ؛ M_j ، حداکثر پاسخ به‌دست آمده در میان همه ارقام در محیط j و n تعداد محیط‌ها است.

نتایج و بحث

تجزیه واریانس نشان داد که اثرات محیط، ژنوتیپ و برهمکنش ژنوتیپ $\times$ محیط در سطح احتمال یک‌درصد بر عملکرد دانه ژنوتیپ‌های مطالعه شده معنی‌دار بود (جدول ۵). با توجه به معنی‌دار بودن برهمکنش ژنوتیپ $\times$ محیط، امکان انجام تجزیه پایداری روی این داده‌ها وجود دارد. از این‌رو، تجزیه پایداری به‌روش AMMI انجام شد. برای انجام تجزیه AMMI، ابتدا ماتریس انحراف حاصل از اثرات جمع‌پذیر (ماتریس Z) محاسبه شد و سپس تجزیه به مؤلفه‌های اصلی، یک بار روی ماتریس Z برای ژنوتیپ‌ها و بار دیگر روی ماتریس Z'' برای محیط‌ها انجام شد. اولین ($IPC1$) و دومین

جدول ۵- تجزیه واریانس مرکب روش AMMI برای عملکرد دانه ژنوتیپ‌های عدس
Table 5. AMMI combined analysis of variance for seed yield of lentil genotypes

منابع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	مقدار F	درصد از مجموع مربعات کل	درصد تغییرات از اثر متقابل ژنوتیپ در محیط	درصد تجمعی تغییرات
S.O.V	df	Sum of Squares	Mean of Squares	F Value	Percentage of the total sum of squares	The percentage of variation from the genotype $\times$ environment interaction	Cumulative percentage of changes
ENV	8	43189817	5398727**	165.63	54.56		
REP(ENV)	18	586725	32596*	1.91			
GEN	14	4316241	308303**	18.07	5.45		
GEN:ENV	112	13382256	119484**	7	16.9		
PC1	21	6099175	290437**	17.03		45.6	45.6
PC2	19	2547333	134070**	7.86		19	64.6
PC3	17	1913206	112542**	6.6		14.3	78.9
PC4	15	963597	64240**	3.77		7.2	86.1
PC5	13	737184	56706**	3.32		5.5	91.6
PC6	11	721439	65585*	3.85		5.4	97
PC7	9	339799	37755*	2.21		2.5	99.5
PC8	7	8646	1236*	0.51		0.5	100
Residuals Total	252	4298432	17057				
C.V.(%)	516	79155727	153403				
			17.86				

ns، * و **: به‌ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد

ns، * and **: Non-significant, significant at 5 % and 1 % probability levels, respectively

با استفاده از پارامترهای مختلف AMMI، ابعاد گوناگون تغییرات ناشی از برهمکنش ژنوتیپ و محیط ارزیابی شد.

شاخص‌های پایداری AMMI و شاخص انتخاب همزمان (Simultaneous selection index, SSI)

میانگین عملکرد هر کدام از ژنوتیپ‌ها در تمام محیط‌ها نشان می‌دهد که بیشترین عملکرد دانه در ژنوتیپ شماره ۱۰ (۸۵۰ کیلوگرم در هکتار) و در پی آن، در ژنوتیپ‌های شماره ۱۲، ۶ و ۴ دیده شد (جدول ۶). بر اساس شاخص پایداری ASV، ژنوتیپ‌های شماره ۳، ۵ و ۱ با نمره‌های پایین، پایدارترین ژنوتیپ‌ها بودند. از شاخص ASV به عنوان یک معیار مفید برای شناسایی ژنوتیپ‌های پایدار در عدس استفاده شده است (Dehghani et al., 2008; Karimizadeh & Mohamadi, 2010; Karimizadeh et al., 2013a; Karimizadeh et al., 2013b). براساس شاخص SIPC، ژنوتیپ‌های ۳، ۱، ۷ و ۱۰ پایدارترین ژنوتیپ‌ها بودند. در حالی که براساس شاخص EV، ژنوتیپ‌های شماره ۱، ۱۰ و ۳ از پایداری بیشتری برخوردار بودند. شاخص ZA نیز ژنوتیپ‌های شماره ۳، ۱، ۵ و ۱۰ را به عنوان چهار ژنوتیپ پایدار شناسایی کرد. بر پایه شاخص WAAS نیز ژنوتیپ‌های شماره ۳، ۱، ۵ و ۱۰ پایدارترین بودند. مزیت این شاخص نسبت به سایر شاخص‌های AMMI این است که در برآورد آن، از تمام مؤلفه‌های مدل با وزن‌های متفاوت استفاده می‌شود (Olivoto et al., 2019). از آنجاکه در ارزیابی ژنوتیپ‌ها و برگزیدن ژنوتیپ‌های برتر با شاخص‌های بالا، فقط به جنبه پایداری ژنوتیپ‌ها اهمیت داده شده است، امکان برگزیدن ژنوتیپ‌هایی با عملکرد پایین همچون ژنوتیپ شماره ۳ وجود دارد که عملکرد آن، پایین‌تر از متوسط کل ژنوتیپ‌ها است. بنابراین، از شاخص انتخاب همزمان (SSI) بر پایه هر کدام از شاخص‌های بالا استفاده شد، به طوری که بر مبنای شاخص انتخاب همزمان ssiASV که بر پایه شاخص پایداری ASV است، ژنوتیپ‌های ۱۰، ۴، ۵ و ۱ را می‌توان ژنوتیپ‌های برتر از نظر پایداری و عملکرد دانه شناسایی کرد.

انتخاب همزمان ژنوتیپ‌ها براساس شاخص SIPC و عملکرد دانه، ژنوتیپ‌های ۱۰، ۶، ۷ و ۴ را به عنوان برترین ژنوتیپ‌ها در نظر گرفت. براساس انتخاب همزمان بر پایه ssiEV، ژنوتیپ‌های ۱۰، ۶، ۱ و ۷ به عنوان ژنوتیپ‌های برتر شناسایی شدند. بر پایه شاخص ssiWAAS که در برآورد آن افزون بر تمام مؤلفه‌های برهمکنش ژنوتیپ × محیط، به عملکرد دانه ژنوتیپ‌ها نیز توجه شده است، ژنوتیپ‌های ۱۰، ۶، ۱ و ۳ برترین ژنوتیپ‌ها بودند (جدول ۶).

برای شناسایی ژنوتیپ‌های دارای عملکرد پایدار از پارامتر فاصله AMMI نیز استفاده شد. هرچه میزان فاصله AMMI ژنوتیپ بیشتر باشد، فاصله ژنوتیپ از مبدأ مؤلفه‌ها بیشتر و ژنوتیپ دارای عملکرد دانه ناپایدار محسوب می‌شود. ژنوتیپ‌های دارای فاصله کمتر AMMI به عنوان ژنوتیپ‌های دارای عملکرد پایدار در نظر گرفته می‌شوند. با استفاده از این پارامتر، ژنوتیپ‌های شماره ۱، ۳، ۵ و ۷ به عنوان ژنوتیپ‌های دارای عملکرد پایدار شناخته شدند. همان گونه که گفته شد، آماره‌های SSI که در برآورد آن‌ها به هردو جنبه پایداری و متوسط عملکرد یک ژنوتیپ توجه می‌شود و این معیارها در یک شاخص گردآورده می‌شوند، محدودیت‌های گزینش ژنوتیپ فقط بر پایه شاخص پایداری کاهش می‌یابد و بهره‌گیری از این شاخص‌ها وابسته به این واقعیت است که پایدارترین ژنوتیپ‌ها همیشه بالاترین عملکرد را ندارند. از طرفی

ژنوتیپ‌های پایدار اما با عملکرد پایین نیز با این شیوه برگزیده نمی‌شوند (Farshadfar, 2008). روش گزینش همزمان برای عملکرد و پایداری در عدس (Sabaghnia et al., 2006)، برای تعیین پایداری ژنوتیپ‌ها استفاده شده است. همچنین در پژوهش دیگری، از شاخص Ysi، برای گزینش همزمان برای عملکرد و پایداری استفاده شده است (Sabaghpour, 2007). در توجیه کاربرد روش گزینش همزمان برای ارزیابی عملکرد و پایداری، محققان با مقایسه این آماره با آماره‌های مختلف پایداری همچون واریانس محیطی، ضریب تغییرات محیطی، ضریب رگرسیون، انحراف از خط رگرسیون و ضریب تبیین نشان داد که استفاده از روش گزینش همزمان برای عملکرد و پایداری می‌تواند با اطمینان بیشتری فرایند گزینش را انجام دهد (Moghadam, 2003). در پژوهشی دیگر نشان داده شد که گزینش همزمان برای عملکرد و هریک از پارامترهای پایداری می‌تواند به شناسایی ژنوتیپ‌های پایدار عدس کمک کند (SolhNejad, 2004).

به طور کلی، در صورت وجود برهمکنش معنی‌دار ژنوتیپ و محیط، اگر دو مؤلفه اصلی اول بیش از ۵۰ درصد از کل تغییرات را توجیه کند، بای‌پلات می‌تواند ابزار مناسبی برای مطالعه برهمکنش ژنوتیپ در محیط باشد. در این پژوهش، با آنکه دو مؤلفه اصلی اول، ۶۴/۶ درصد برهمکنش ژنوتیپ در محیط را توجیه کردند، اما مشاهده شد که گزینش ژنوتیپ‌ها فقط بر پایه این دو مؤلفه و صرف نظر از سایر مؤلفه‌ها و عملکرد دانه، می‌تواند منجر به نتایج نادرستی شود. برای نمونه، ژنوتیپ شماره ۳، که در هر چهار شاخص AMMI پایدار بود، زمانی که از ssi برای هریک از شاخص‌ها استفاده شد، جزو ژنوتیپ‌های منتخب قرار نگرفت. در سوی مقابل، ژنوتیپ شماره ۴ بود که براساس پارامترهای AMMI پایدار نبود، اما به عنوان یک ژنوتیپ برتر با توجه به شاخص‌های ssi آن‌ها برگزیده شد. بنابراین، زمانی که توجیه الگوی برهمکنش ژنوتیپ × محیط با دو مؤلفه اصلی اول، کم تا متوسط باشد (برای نمونه در محاسبه شاخص ASV)، لازم است در تفسیر احتیاط شود؛ زیرا ممکن است که تعداد بیشتری از محورها در الگوی برهمکنش ژنوتیپ × محیط نقش داشته باشند، به طوری که حتی مؤلفه‌های اصلی آخر نیز می‌توانند سهمی در این برهمکنش‌ها داشته باشند (Olivoto et al., 2019).

روش AMMI در هر محیط، ژنوتیپ برتر را از نظر عملکرد و پایداری انتخاب می‌کند که نتایج حاصل از این تجزیه در جدول ۷ نشان داده شده است. ژنوتیپ شماره ۱۰ در محیط یک و دو (به ترتیب سال اول و دوم لرستان/خرم‌آباد) با کسب رتبه سه و در محیط‌های چهار و پنج (به ترتیب سال اول و دوم ایلام/چرداول) با کسب رتبه چهار، به عنوان یکی از پایدارترین ژنوتیپ‌ها شناخته شد. ژنوتیپ شماره ۶ در محیط دو (سال دوم لرستان/خرم‌آباد) حائز رتبه دو، در محیط ۹ (سال سوم کرمانشاه/ سرارود) حائز رتبه سه و در محیط سوم (سال سوم لرستان/خرم‌آباد) حائز رتبه چهارم گردید. بنابراین می‌تواند به عنوان یکی از پایدارترین ژنوتیپ‌ها در این روش انتخاب شود.

جدول ۶- شاخص‌های پایداری، رتبه ژنوتیپ‌ها و شاخص انتخاب همزمان

Table 6. Stability indices, rank of genotypes and simultaneous selection index (SSI)

Code	Yield (kg/ha)	IPCA1	IPCA2	IPCA3	ASV	SIPC	EV	ZA	rY	rASV	rSIPC
G1	739	-2.107	1.938	-3.534	5.4	24.5	0.031	0.094	9	3	2
G2	778	23.07	9.942	10.99	56.1	62.9	0.127	0.441	7	14	15
G3	711	0.672	-1.043	6.652	1.92	23.6	0.035	0.089	12	1	1
G4	792	4.642	-5.41	6.463	12.4	35.4	0.051	0.172	4	6	7
G5	731	1.179	2.555	-7.835	3.81	41.7	0.089	0.138	10	2	11
G6	799	-5.107	8.971	-6.756	15.2	31.9	0.042	0.163	3	9	5
G7	792	9.056	-1.474	1.216	21.7	27.3	0.049	0.161	5	13	3
G8	717	4.575	-9.87	-0.247	14.7	47.4	0.109	0.198	11	8	13
G9	782	-6.912	4.862	6.346	17.2	38.1	0.071	0.185	6	11	9
G10	850	3.982	3.883	-8.625	10.3	27.5	0.034	0.139	1	5	4
G11	768	2.126	-4.413	-12.14	6.74	33.5	0.051	0.15	8	4	6
G12	807	-6.653	14.44	-6.12	21.5	43.8	0.068	0.245	2	12	12
G13	410	-24.4	-0.215	11.53	58.4	52.3	0.109	0.39	15	15	14
G14	606	1.126	-16.74	3.749	17	40.2	0.090	0.181	14	10	10
G15	683	-5.251	-7.424	-8.369	14.6	37.7	0.046	0.194	13	7	8

ASV: ارزش پایداری امی، SIPC: مجموع نمره‌های محورهای مؤلفه‌ها، EV: مقدار ویژه پارامتر پایداری AMMI، ZA: قدر مطلق سهم نسبی IPC در برهمکنش ASV: AMMI stability value، SIPC: Sum of IPCs scores، EV: Eigenvalue stability parameter of AMMI، ZA: Absolute value of the relative contribution of IPCs to the interaction

ادامه جدول ۶- شاخص‌های پایداری، رتبه ژنوتیپ‌ها و شاخص انتخاب همزمان

Table 6 Continued. Table 6. Stability indices, rank of genotypes and simultaneous selection index (SSI)

Code	rEV	rZa	ssiASV	ssiSIPC	ssiEV	ssiZa	WAAS	rWAAS	ssiWAAS	AMMI distance	Pi-a	R pi
G1	1	2	12	11	10	11	2.69	2	9	4.55	81988.7	9
G2	15	15	21	22	22	22	15.1	15	28	27.42	119011.6	13
G3	3	1	13	13	15	13	2.4	1	10	6.77	72864.3	6
G4	7	8	10	11	11	12	5.24	8	19	9.62	84462.1	10
G5	11	3	12	21	21	13	3.66	3	15	8.32	95594.5	11
G6	4	7	12	8	7	10	5.08	6	9	12.34	74997.0	7
G7	6	6	18	8	11	11	5.4	9	15	9.26	66036.0	4
G8	13	12	19	24	24	23	5.83	10	11	10.88	105639.2	12
G9	10	10	17	15	16	16	5.83	11	19	10.57	58746.9	2
G10	2	4	6	5	3	5	4.29	4	8	10.26	63551.7	3
G11	8	5	12	14	16	13	4.35	5	15	13.09	75027.9	8
G12	9	13	14	14	11	15	7.67	13	28	17.04	67827.6	5
G13	14	14	30	29	29	29	13.7	14	28	26.99	155458.7	14
G14	12	9	24	24	26	23	5.22	7	12	17.19	338480.0	15
G15	5	11	20	21	18	24	5.83	12	14	12.36	39889.3	1

WAAS: میانگین وزنی نمرات مطلق، SSI: شاخص انتخاب همزمان، Pi-a: شاخص برتری لین و بینس WASS: Weighted average of absolute scores، SSI: Simultaneous selection index، Pi-a: Superiority index Lin & Binns

جدول ۷- ژنوتیپ انتخابی هر محیط توسط روش AMMI

Table 7. selected genotypes in each environment based on AMMI method

رتبه چهارم Forth rank	رتبه سوم Third rank	رتبه دوم Second rank	رتبه اول First rank	رتبه Score	عملکرد (کیلوگرم در هکتار) Yield (kg/ha)	محیط Environment
11	10	7	2	31.10	1486	E1
7	10	6	12	-12.53	753	E2
6	12	9	2	8.12	679	E3
10	5	11	12	-13.19	974	E4
10	8	9	12	-6.11	286	E5
5	3	8	1	-3.95	409	E6
7	11	4	14	0.93	754	E7
14	10	15	8	-1.41	630	E8
3	6	9	4	-2.41	607	E9

تفسیر بای پلات

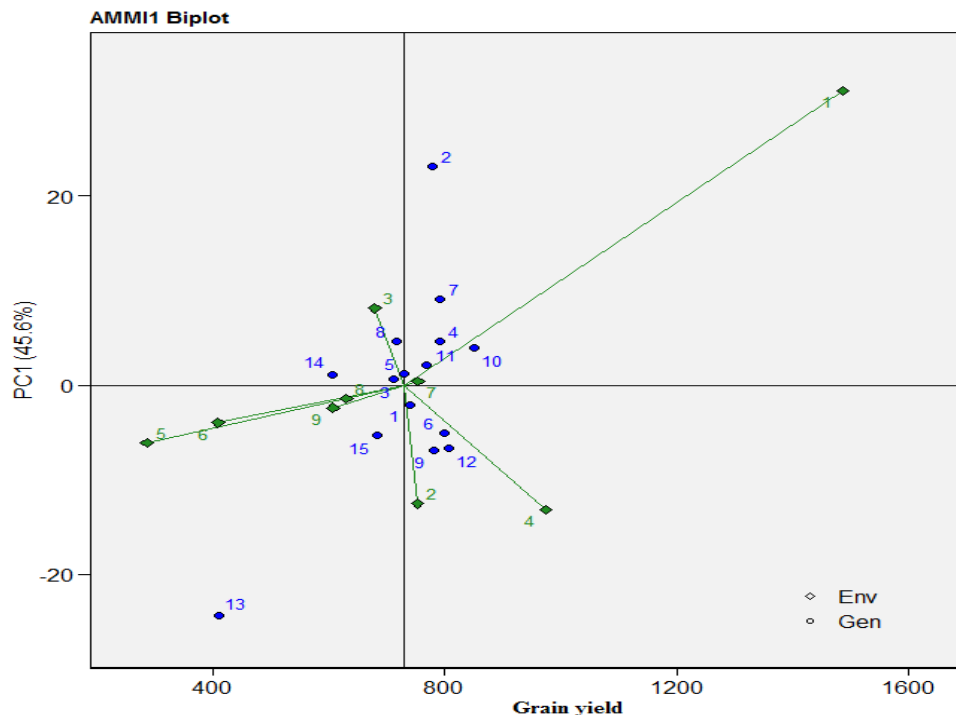
و ارقام شاهد بود و به‌عنوان ژنوتیپ‌های پایدار با سازگاری عمومی بالا معرفی شدند (شکل ۱).

از سوی دیگر، ژنوتیپ‌های ۲ و ۱۳ دورترین ژنوتیپ‌ها از مبدأ بای پلات (دارای بیشترین ضرایب در مؤلفه اصلی اول) بودند و براساس این شاخص، ناپایدار بودند (شکل ۱)، البته بیشتر ژنوتیپ‌ها در اطراف محور عمودی پراکنده بودند و کمترین فاصله را از این محور داشتند. محیط‌های شماره ۸ (سال دوم کرمانشاه/ سرارود)، ۹ (سال اول کرمانشاه/ سرارود)، ۶ (سال سوم ایلام/ چرداول)، ۵ (سال اول ایلام/ چرداول) و ۳ (سال سوم لرستان/ خرم آباد) دارای کمترین مقدار IPCA1 و کمترین برهمکنش ژنوتیپ در محیط بودند. به این ترتیب، این محیط‌ها به نسبت محیط‌های دیگر، پایداری عملکرد بهتری داشتند. محیط‌های ۱ (سال اول لرستان/ خرم آباد)، ۲ (سال دوم لرستان/ خرم آباد)، ۴ (سال اول ایلام/ چرداول) و ۷ (سال اول کرمانشاه/ سرارود) عملکرد دانه بالاتری نسبت به میانگین کل داشتند (شکل ۱).

دو محور افقی و عمودی بای پلات نوع اول AMMI (عملکرد دانه در برابر مؤلفه اصلی اول)، به‌ترتیب به عملکرد دانه (به‌عنوان نمودار یا بیان فنوتیپی یک ژنوتیپ) و نخستین مؤلفه اصلی برهمکنش ژنوتیپ در محیط (IPCA1) اختصاص داده می‌شوند و بر مبنای بزرگی (مثبت یا منفی) و کوچکی (نزدیک به صفر و مبدأ مختصات) ضرایب ژنوتیپ‌ها و محیط‌ها در این مؤلفه اصلی، پایداری آن‌ها شناسایی می‌شود. ژنوتیپ‌های دارای مقادیر اولین مؤلفه اصلی بزرگ (مثبت یا منفی)، برهمکنش بالایی با محیط دارند، در حالی که ژنوتیپ‌ها و محیط‌های دارای مقادیر اولین مؤلفه اصلی نزدیک به صفر، دارای برهمکنش پایینی هستند. بنابراین بر این اساس، ژنوتیپ‌های شماره ۳، ۵، ۱، ۶، ۱۰ و ۱۱ دارای کمترین مقادیر IPCA1 بودند اما فقط میانگین عملکرد دانه ژنوتیپ‌های شماره ۱، ۶، ۱۰ و ۱۱ بیشتر از میانگین کل (۷۳۱ کیلوگرم در هکتار)

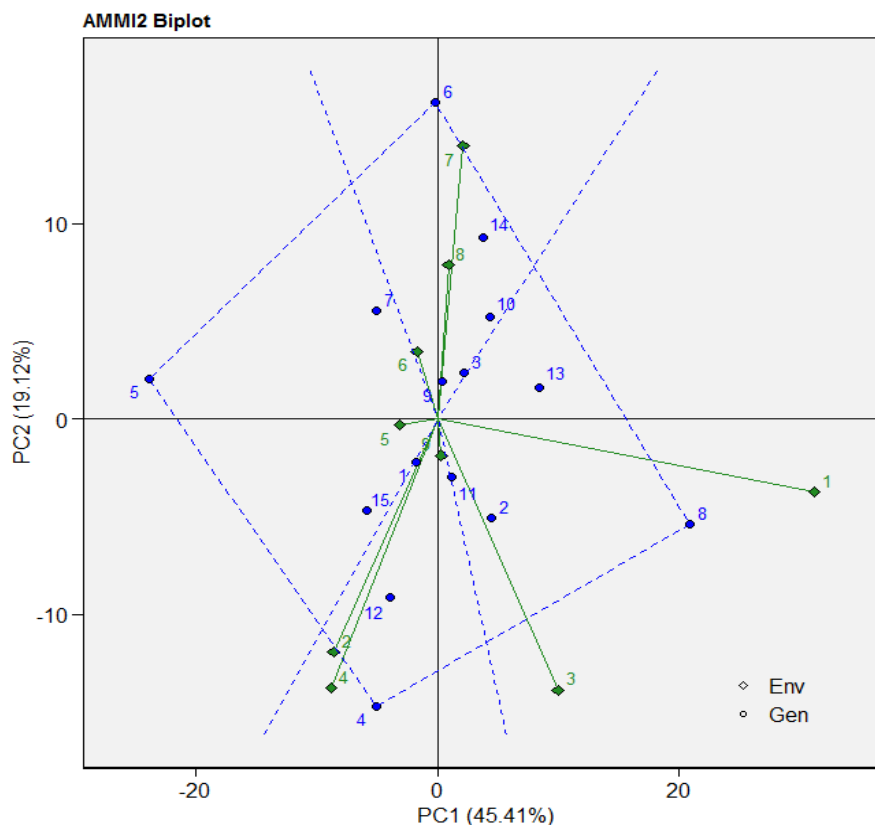
بهترین ژنوتیپ‌ها برای محیط‌های شماره ۶ و ۵ بودند. در بخش بعدی این چند ضلعی، ژنوتیپ‌های شماره ۳، ۶، ۱۰ و ۱۴ بهترین ژنوتیپ‌ها برای محیط‌های ۷ و ۸ بودند. در بخش سوم، ژنوتیپ‌های شماره ۱۳، ۸، ۲ و ۱۱ بهترین ژنوتیپ‌ها برای محیط‌های ۱ و ۳ بودند. در آخرین بخش از این نمودار، ژنوتیپ‌های ۱۲ و ۴ مناسب برای محیط‌های شماره ۲ و ۴ بودند (شکل ۲). از دیگر کاربردهای نمودار بای‌پلات، علاوه بر شناسایی ژنوتیپ‌های سازگار به هر محیط، معرفی ژنوتیپ‌های با پایداری عمومی است، به‌طوری‌که ژنوتیپ‌های شماره ۹، ۳، ۱۱ و ۱ تا حدودی ژنوتیپ‌های شماره ۱۰ و ۱۳ دارای پایداری عمومی بالایی بودند. در تطابق با یافته حاضر، پژوهشگران دیگری نیز با استفاده از روش بای‌پلات نوع دوم، ژنوتیپ‌های پایدار عدس را شناسایی کرده‌اند (Karimizadeh & Mohammadi, 2010; Karimizadeh et al., 2013a; Karimizadeh et al., 2013b). در این پژوهش، علاوه بر شاخص‌های مختلف AMMI، از شاخص برتری لین و بینز (Lin & Binns, 1988) که برتری عمومی رقم را در تمام محیط‌ها (Pi-a) اندازه‌گیری می‌کند نیز استفاده شد. بر اساس شاخص Pi-a ژنوتیپ‌های شماره ۱۵، ۹، ۱۰، ۷ و ۱۲ ژنوتیپ‌های برتر بودند. در تطابق با این نتیجه، دهقانی و همکاران (Dehghani et al., 2008) نیز با استفاده از شاخص Pi در ژنوتیپ‌های عدس، پایدارترین ژنوتیپ‌ها را شناسایی کردند.

توضیح این نکته ضروری است که اگر تصمیم‌گیری برای شناساندن ژنوتیپ‌های پایدار بر مبنای این نمودار باشد که در کشیدن آن، فقط از مؤلفه اصلی نخست بهره گرفته شده است که تنها ۴۵/۶ درصد از تغییرات برهمکنش ژنوتیپ × محیط را توجیه می‌کند، می‌تواند به نتایج نادرستی بیانجامد. از این‌رو، از روش بای‌پلات نوع دوم AMMI استفاده شد که در آن از ضرایب هر دو مؤلفه اصلی اول و دوم بهره گرفته شده است. با توجه به سهم بالای دو مؤلفه اصلی اول و دوم در برهمکنش ژنوتیپ × محیط (۶۴/۶ درصد) نسبت به بای‌پلات نوع اول، به نظر می‌رسد که ارزیابی ژنوتیپ‌ها با بای‌پلات نوع دوم AMMI به واقعیت نزدیک‌تر باشد و ژنوتیپ‌های پایدار را به‌شکل بهتری شناسایی کند (Olivoto et al., 2019). در این نمودار (شکل ۲)، ژنوتیپ‌های شماره ۵، ۶، ۸ و ۴ با بیشترین فاصله از مبدأ بای‌پلات، سهم بالایی در برهمکنش ژنوتیپ × محیط داشته و ژنوتیپ‌های ناپایداری بودند. اما این ژنوتیپ‌ها، بهترین یا ضعیف‌ترین در برخی یا تمام محیط‌ها و دارای سازگاری به برخی از محیط‌ها بودند، به‌طوری‌که در هر بخش، ژنوتیپ قرار گرفته در رأس آن، بهترین ژنوتیپ برای محیط‌های واقع در آن است (Yan et al., 2000). در هر کدام از بخش‌های این نمودار چندضلعی، ژنوتیپ‌های سازگار با برخی از محیط‌ها قابل شناسایی است. بر این اساس، ژنوتیپ ۵ به‌عنوان ژنوتیپ رأسی و ژنوتیپ‌های شماره ۷، ۱ و ۱۵ درون آن بخش‌ها،



شکل ۱- بای‌پلات AMMI1 برای شناسایی ژنوتیپ‌های برتر عدس بر پایه میانگین عملکرد دانه و مؤلفه اصلی اول. ژنوتیپ‌ها مطابق با جدول ۱ و اسامی محیط‌ها مطابق با جدول ۳ است

Figure 1. AMMI1 biplot to identify the superior lentil genotype based on mean grain yield and PC1. The name of genotypes and environments are based on the Tables 1 and 3, respectively



شکل ۲- بای پلات AMMI2 برای شناسایی ژنوتیپ‌های برتر عدس بر پایه دو مؤلفه اصلی اول. اسامی ژنوتیپ‌ها مطابق با جدول ۱ و اسامی محیط‌ها مطابق با جدول ۳ است

Figure 2. AMMI2 biplot to identify the superior lentil genotype based on the first two PCs. The name of genotypes and environments are based on the Tables 1 and 3, respectively

نتیجه‌گیری کلی

از آنجاکه نتایج تجزیه واریانس مرکب، گویای معنی‌دار بودن اثر محیط، ژنوتیپ و برهمکنش ژنوتیپ در محیط بود. تجزیه پایداری با شاخص‌ها و بای پلات‌های AMMI انجام شد. سهم محیط، ژنوتیپ و برهمکنش این دو در مجموع مربعات کل، به ترتیب ۵۴/۵۶، ۵/۴۵ و ۱۶/۹ درصد بود. تجزیه واریانس AMMI نشان داد که هفت مؤلفه اصلی اول، اثر معنی‌داری در برهمکنش ژنوتیپ و محیط داشتند. در بین ژنوتیپ‌های مطالعه شده، بیشترین عملکرد دانه در ژنوتیپ شماره ۱۰ (۸۵۰ کیلوگرم در هکتار) و در پی آن در ژنوتیپ‌های شماره ۱۲، ۶ و ۴ دیده شد. بر اساس شاخص پایداری ASV، ژنوتیپ‌های شماره ۳، ۵ و ۱، بر اساس شاخص SIPC، ژنوتیپ‌های ۳، ۱، ۷ و ۱۰ و بر اساس شاخص EV، ژنوتیپ‌های شماره ۱، ۱۰ و ۳ و بر اساس شاخص‌های Za و WAAS نیز ژنوتیپ‌های ۳، ۱، ۵ و ۱۰ پایداری‌ترین ژنوتیپ‌ها بودند. بر مبنای شاخص انتخاب همزمان ssiASV، ژنوتیپ‌های ۱۰، ۴، ۵ و ۱، بر مبنای شاخص ssiSIPC، ژنوتیپ‌های شماره ۱۰، ۶، ۷ و ۴، بر مبنای شاخص ssiEV، ژنوتیپ‌های ۱۰، ۶، ۱ و ۷، بر مبنای شاخص ژنوتیپ‌های شماره ۱، ۱۰، ۶ و ۷ و بر مبنای شاخص ssiWAAS، ژنوتیپ‌های ۱، ۱۰، ۶ و ۳ برترین ژنوتیپ‌ها بودند. بر پایه بای پلات AMMI1، ژنوتیپ‌های شماره ۱، ۶، ۱۰ و ۱۱ با میانگین بیشتر از میانگین کل (۷۳۱ کیلوگرم در هکتار) و

شاهدهای محلی، کیمیا و بیله‌سوار و کمترین مقادیر IPCA1، به عنوان ژنوتیپ‌های پایدار با سازگاری عمومی بالا بودند. بر پایه بای پلات AMMI2، ژنوتیپ‌های ۹، ۱۱، ۱ و ۱۰ علاوه بر پایداری عمومی بالا، دارای میانگینی بالاتر از میانگین کل بودند. در ارتباط با مقایسه شاخص‌ها، از آنجاکه در محاسبه شاخص WAAS، تمامی مؤلفه‌های اصلی معنی‌دار با وزن‌های متفاوت به کار گرفته شده‌اند، پایداری عملکرد را به شکل بهتری نشان می‌دهند و ژنوتیپ‌های برگزیده با این شاخص از پایداری مطمئن‌تری برخوردار هستند و پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده برای تعیین پایداری ژنوتیپ‌ها، این روش بیشتر مورد توجه قرار گیرد. علاوه بر شاخص‌های AMMI، از شاخص برتری لین و بینز نیز برای شناسایی ژنوتیپ‌های برتر استفاده شد که بر این اساس نیز ژنوتیپ‌های شماره ۱، ۱۰، ۹ و ۱۵، برترین ژنوتیپ‌ها در محیط‌های مطالعه شده بودند. با استفاده از پارامتر فاصله امی، ژنوتیپ‌های شماره ۱، ۳، ۵ و ۷ به عنوان ژنوتیپ‌های دارای عملکرد پایدار شناخته شدند. در مجموع و بر پایه شاخص‌های مختلف، ژنوتیپ‌های شماره ۱۰ (ILL2261) و ۶ (09S96510-13) در بسیاری از محیط‌ها (ترکیبی از سال و مکان) و در بیشتر روش‌ها، دارای عملکرد و پایداری مطلوبی بودند و می‌توانند نامزد معرفی ارقام جدید باشند.

تشکر و قدردانی

بدین وسیله از مسئولین محترم موسسه تحقیقات کشاورزی دیم
سپاسگزاری می شود.

این تحقیق منتج از پروژه مصوب مؤسسه تحقیقات
کشاورزی دیم به شماره ۹۸۰۹۹۸-۹۸-۰۳۷-۱۵-۰۱ می باشد که

References

- Anonymous. (2023). Agricultural statistics farming year of 2022, Vol. 1: crops. Tehran, Ministry of Agriculture - Jahad, Deputy of Planning and Economics, Information and Communication Technology Center. [In Persian]
- Bortz, J., Lienert G. A., & Boehnke, K. (1990). Verteilungsfreie Methoden in der Biostatistik (1st ed.). Springer-Verlag Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1002/bimj.4710340114>
- Dehghani, H., Sabaghpour, S. H., & Sabaghnia, N. (2008). Genotype $\times$ environment interaction for grain yield of some lentil genotypes and relationship among univariate stability statistics. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 6(3), 385-394. <https://doi.org/10.5424/sjar/2008063-5292>
- Farshadfar, E. (2008). Incorporation of AMMI stability value and grain yield in a single non-parametric index (GSI) in bread wheat. *Pakistan Journal of Biological Science*, 11, 1791-1796. <https://doi.org/10.3923/pjbs.2008.1791.1796>
- 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>
- Grusak, M. A. (2009). Nutritional and health-beneficial quality. *The lentil: Botany, Production and Uses*, 368-390.
- Hasan, M. J., Kulsum, M. U., Sarker, U., Matin, M. Q. I., Shahin, N. H., Kabir, M. S., Ercisli, S., & Marc, R. A. (2022). Assessment of GGE, AMMI, regression, and its deviation model to identify stable rice hybrids in Bangladesh. *Plants*, 11(18), 2336. <https://doi.org/10.3390/plants11182336>
- Hawtin, G., Iwanage, M., & Hodykin, T. (1996). Genetic resources in breeding for adaptation. *Euphytica*, 92, 255-266. <https://doi.org/10.1007/BF00022853>
- Hossain, M. A., Sarker, U., Azam, M. G., Kobir, M. S., Roychowdhury, R., Ercisli, S., & Golokhvast, K. S. (2023). Integrating BLUP, AMMI, and GGE models to explore GE interactions for adaptability and stability of winter lentils (*Lens culinaris* Medik.). *Plants*, 12(11), 2079. <https://doi.org/10.3390/plants12112079>
- Islam, M. A., Sarker, U., Hasan, M. R., Islam, M. R., & Mahmud, M. N. H. (2012). Genotype $\times$ Environment (Fertilizer Dose) Interaction Analysis of Hybrid Seed Production of Rice (*Oryza sativa* L.). *Journal Of Eco-Friendly Agriculture*, 5, 183-185.
- Karimizadeh, R., & Mohammadi, M. (2010). AMMI adjustment for rainfed lentil yield trials in Iran. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 16(1), 66-73.
- Karimizadeh, R., Mohammadi, M., & Sabaghnia, N. (2013a). Site regression biplot analysis for matching new improved lentil genotypes into target environments. *Journal of Plant Physiology and Breeding*, 3(2), 51-65.
- Karimizadeh, R., Mohammadi, M., Sabaghnia, N., Mahmoodi, A. A., Roustami, B., Seyyedi, F., & Akbari, F. (2013b). GGE biplot analysis of yield stability in multi-environment trials of lentil genotypes under rainfed condition. *Notulae Scientia Biologicae*, 5(2), 256-262. <https://doi.org/10.15835/nsb529067>
- Lin, C. S., & Binns, M. R. (1988). A superiority measure of cultivar performance for cultivar $\times$ location data. *Canadian Journal of Plant Science*, 68(1), 193-198. <https://doi.org/10.4141/cjps88-018>
- Lin, C. S., Binns, M. R. & Lefcovitch, L. P. (1986). Stability analysis: Where do we stand? *Crop Science*, 26, 894-900.
- Moghadam, A. (2003). Simultaneous selection for yield and stability and its comparison with different stability statistics. *Seed and Plant Journal*, 19(1), 1-13. 10.22092/SPIJ.2017.110935 [In Persian]
- Nassar, R., & Huehn, M. (1987). Studies on estimation of phenotypic stability: Tests of significance for nonparametric measures of phenotypic stability. *Biometrics*, 43(1), 45-53. <https://doi.org/10.2307/2531947>
- Olivoto, T., & Lúcio, A. D. C. (2020). Metan: an R package for multi-environment trial analysis. *Methods in Ecology and Evolution*, 11(6), 783-789. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13384>
- 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>
- Parihar, A. K., Basandrai, A. K., Saxena, D. R., Kushwaha, K. P. S., Chandra, S., Sharma, K., Singha, K. D., Singh, D., Lal, H. C., & Gupta, S. (2017). Biplot evaluation of test environments and identification of lentil genotypes with durable resistance to fusarium wilt in India. *Crop and Pasture Science*, 68(11), 1024-1030. <https://doi.org/10.1071/CP17258>
- Purchase, J. L., Hatting, H., & Van Deventer, C. S. (2000). Genotype $\times$ environment interaction of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) in South Africa: II. Stability analysis of yield performance. *South African Journal of Plant and Soil*, 17(3), 101-107. <https://doi.org/10.1080/02571862.2000.10634878>
- Sabaghnia, N., Dehghani, H., & Sabaghpour, S. H. (2006). Non parametric methods for interpreting genotype $\times$ environment interaction of Lentil genotypes. *Crop Science*, 46(3), 1100-1106. <https://doi.org/10.2135/cropsci2005.06-0122>

- Sabaghpour, S. H. (2007). Stability analysis of grain yield for promising lentil lines in autumn planting under dryland conditions. *Iranian Journal of Crop Sciences*, 8(4), 312-322. 20.1001.1.15625540.1385.8.4.3.8 [In Persian]
- Shrestha, R., Rizvi, A. H., Sarker, A., Darai, R., Paneru, R. B., Vandenberg, A., & Singh, M. (2018). Genotypic variability and genotype $\times$ environment interaction for iron and zinc content in lentil under Nepalese environments. *Crop Science*, 58(6), 2503-2510. <https://doi.org/10.2135/cropsci2018.05.0321>
- Sneller, C. H., Kilgore-Norquest, L., & Dombek, D. (1997). Repeatability of yield stability statistics in soybean. *Crop Science*, 37(2), 383-390. <https://doi.org/10.2135/cropsci1997.0011183X003700020013x>
- SolhNejad, B. (2004). *Evaluation of yield stability of new lentil cultivars*. MSc Thesis. Islamic Azad University of Ardabil Branch, Iran. [In Persian]
- Wright, K., & Laffont, J. L. (2018). *R package for GGE biplot*. Github Company, Newyork, USA.
- Yan, W., Hunt, L. A., Sheng, Q., & Szlavnics, Z. (2000). Cultivar evaluation and mega-environment investigation based on the GGE biplot. *Crop Science*, 40(3), 597-605. <https://doi.org/10.2135/cropsci2000.403597x>
- Zali, H., Farshadfar, E., Sabaghpour, S. H., & Karimizadeh, R. (2012). Evaluation of genotype $\times$ environment interaction in chickpea using measures of stability from AMMI model. *Annals of Biological Research*, 3(7), 3126-3136.
- Zobel, R. W., Wright, A. J., & Gauch, H. G. (1988). Statistical analysis of a yield trial. *Agronomy Journal*, 80(3), 388-393. <https://doi.org/10.2134/agronj1988.00021962008000030002x>