

Evaluation of performance stability of lentil genotypes using AMMI, BLUP, MTSI and MGIDI Indexes

Payam Pezeshkpour^{1*}, Reza Amiri², Amir Mirzaei³, Asghar Mehraban⁴, Amin Namdari⁵

1- Assistant Professor, Crop and Horticultural Science Research Department, Lorestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Khorramabad, Iran.

E-mail: Papezeshkpour@yahoo.com ; ORCID: 0000-0001-8454-3878

2- Assistant Professor, Crop and Horticultural Science Research Department, Lorestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Khorramabad, Iran.

ORCID: 0000-0002-5792-2001

3- Assistant Professor, Crop and Horticultural Science Research Department, Ilam Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Ilam, Iran.

ORCID: 0000-0002-6569-3413

4- Assistant Professor, Crop and Horticultural Science Research Department, Ardabil Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Mughan, Iran.

ORCID: 0000-0001-5937-9789

5- Assistant Professor, Dryland Agricultural Research Institute, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Gachsaran, Iran

ORCID: 0009-0008-5738-5673

Abstract

Introduction

Lentil is considered one of the most important legumes due to their protein percentage and high nutritional value. Its yield like other crops, is an important and challenging trait for its genetic improvement because it is influenced by various factors that have detrimental effects on seed yield and traits related to seed quality. One of the important studies in plant breeding and breeding studies is the understanding of the interaction between genotypes and different environments. The existence of genotype-by-environment interaction (GEI) in field trials of many crop plants indicates that yield stability, along with high average yield, should be considered as an important aspect of yield comparison trials. The aim of the present study was to determine stable and high-yielding lentil genotypes in terms of important traits in lentil genotypes using different indices.

Materials and Methods

In this study, fourteen advanced lentil genotypes along with two check cultivars (Gachsaran and Sepehr) were evaluated based on randomized complete blocks design with three replications at Khorramabad, Gachsaran, and Ilam Agricultural Research Stations for two crop years (2020-2022), and at the Mughan Station for one crop year (2020-2021). Seeds were sown with a Wintersteiger research seeder in four lines four meters long and 25 cm between lines (four square meters). Weed control was carried out using a hand cultivator in two stages during the vegetative growth period. Before harvesting, two side lines and half a meter from the beginning and end of the two middle lines were removed and the rest of each plot (1.5 square meters) was harvested manually and the grain yield trait was calculated. Grain yield, 100 seed weight, plant height, days to flowering, days to maturity, kernel filling period, kernel filling rate, rain water productivity, seed yield formation rate, and weight of single seed were measured in all seven environments for each genotype. All statistical analyses were performed using GGE and the multi-environmental analysis package called “Metan” in R software.

Results and Discussion

The mosaic diagram showed that the contribution of the sum of squares of genotype and the genotype-by-environment interaction (GEI) in the total sum of squares was 2.2 and 36.43.19%, respectively. The likelihood ratio test showed that the genotype by environment interaction was significant on grain yield, 100-grain weight, plant height, days to flowering, kernel filling rate, rain water productivity, and weight of single seed. The Scree test showed that the first two principal components had a significant contribution to the GEI matrix derived from BLUP, as the first and second principal components explained 44.4% and 32.2% of the GEI variation, respectively. The predicted grain yield means using BLUP method are shown, which indicates that the highest predicted yield using BLUP method was for genotype 2, followed by genotypes 7, 14, 6, 10, 12, 1 and 4, which had predicted yield higher than the total average. Genotypes 12, 1 and 4 had predicted yield very close to the average, and the lowest predicted yield with a large distance from the total average was related to genotypes 15, 3 and 9 (Gachsaran). Factor analysis based on the traits measured in the studied genotypes showed that four main components remained in the model, and the cumulative variance of these four components was 91.85 percent. For grain yield, the genotype-by-environment interaction (GEI) coefficient of explanation and heritability on average were 0.4319 and 0.2065 percent, respectively. The accuracy of genotype selection and the correlation between genotype values across environments were 0.454 and 0.442, respectively. Also, the genotypic coefficient of variation, the residual coefficient of variation, and the ratio of these two coefficients of variation were 4.48, 21.9, and 0.204 percent, respectively. The traits of grain yield formation rate, rain water productivity, and plant height had the greatest impact on grain yield.

Conclusions

In general, the results showed that the genotype-by-environment interaction was significant on grain yield, 100-seed weight, plant height, days to flowering, days to maturity, grain filling period, grain filling rate, grain yield formation rate, rain water productivity, and single grain weight. Overall, based on the results of all methods and simultaneous selection based on grain yield stability and all measured traits, genotypes 4, 2, 13, 14, 1, 7, and 10 were stable and superior to the average of all genotypes. Genotype number 2 was superior in grain yield (969 kg/ha), plant height (46.6 cm), seed yield formation rate (63.6 kg/ha/day), and rain water productivity (82.2 kg/mm) compared to the average of all traits in the genotypes in this study.

Keywords: Single value decomposition, Multi-trait stability index, Simultaneous selection, Heatmap plot, Mosaic plot

Acknowledgement

Financial support for this research (approved code: 00-59-15-018-001055) is from the Dryland Agriculture Research Institute (DARI), Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Iran. We would like to express our gratitude to the Agricultural Research, Education and Extension Organization, Iran.

ارزیابی پایداری عملکرد دانه ژنوتیپ‌های پیشرفته عدس بر اساس شاخص‌های مبتنی بر مدل‌های AMMI، BLUP، MTSI و MGIDI

پیام پزشکیپور^{۱*}، رضا امیری^۲، امیر میرزایی^۳، اصغر مهربان^۴ و امین نامداری گشنیگانی^۵

- ۱- استادیار پژوهشی، بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان لرستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، خرم‌آباد، ایران
پست الکترونیک: Papezeshkpour@yahoo.com
- ۲- استادیار پژوهشی، بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان لرستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، خرم‌آباد، ایران
- ۳- استادیار پژوهشی، بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان ایلام، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ایلام، ایران
- ۴- استادیار پژوهشی، بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی اردبیل، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مغان، ایران
- ۵- استادیار پژوهشی، مؤسسه تحقیقات کشاورزی دیم کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، گچساران، ایران

چکیده

عدس به واسطه درصد پروتئین و ارزش تغذیه‌ای زیاد، یکی از حبوبات مهم محسوب می‌شود. این پژوهش برای شناسایی ژنوتیپ‌های پایدار و پر محصول عدس انجام شد. در این پژوهش، ۱۴ ژنوتیپ پیشرفته عدس همراه با دو رقم شاهد گچساران و سپهر در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار، در ایستگاه‌های تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی سراب چنگائی خرم‌آباد، گچساران و ایلام به مدت دو سال زراعی (۱۴۰۰-۱۴۰۲)، و در ایستگاه مغان به مدت یک سال زراعی (۱۴۰۰-۱۴۰۱) مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج نمودار موزائیکی نشان داد که سهم مجموع مربعات ژنوتیپ و برهمکنش ژنوتیپ در محیط در مجموع مربعات کل به ترتیب ۲/۲۰ و ۴۳/۱۹ درصد بود. آزمون نسبت درست‌نمایی نشان داد که برهمکنش ژنوتیپ در محیط بر عملکرد دانه، وزن صد دانه، ارتفاع بوته، روز تا گلدهی، سرعت پرشدن دانه، بهره‌وری از بارش و وزن تک دانه معنی‌دار بود. آزمون اسکری نشان داد دو مؤلفه اصلی اولیه سهم قابل توجهی در توجیه برهمکنش ماتریس ژنوتیپ در محیط داشتند، به‌طوری که مؤلفه اصلی اول و دوم به ترتیب ۴۴/۴ و ۳۲/۲ درصد از تغییرات برهمکنش ژنوتیپ در محیط را توجیه کردند. در مجموع، بر اساس نتایج کل روش‌ها و انتخاب همزمان بر اساس پایداری عملکرد دانه و همه صفات اندازه‌گیری شده، ژنوتیپ‌های شماره ۴، ۲، ۱۳، ۱۴، ۱، ۷ و ۱۰ ژنوتیپ‌هایی پایدار و برتر نسبت به میانگین کل ژنوتیپ‌ها بودند. صفات سرعت تشکیل عملکرد دانه، بهره‌وری از بارش و ارتفاع بوته بیشترین تأثیر را بر عملکرد دانه داشتند.

واژه‌های کلیدی: تجزیه مقادیر منفرد؛ پایداری چندصفتی؛ گزینش همزمان؛ نمودار گرمایی؛ نمودار موزائیکی

عدس (*Lens culinaris Medik.*) یکی از حبوبات مهم و سرمادوست در منطقه مدیترانه است که به دلیل بهبود حاصلخیزی خاک و نیز دانه‌های مغذی و سرشار از مواد غذایی مفید برای انسان و دام، به‌طور گسترده کشت و مصرف می‌شود. عملکرد دانه عدس همانند سایر محصولات زراعی، یک صفت مهم و چالش برانگیز برای بهبود ژنتیکی آن است؛ زیرا تحت تأثیر عوامل مختلف ژنتیکی، محیطی، زراعی و مدیریتی است که اثرات مضر بر عملکرد دانه و صفات مرتبط با کیفیت بذر دارد (Sellami et al., 2021).

اثرات گرما و خشکی در تولید عدس با تغییرات آب و هوای جهانی در چند دهه اخیر بیشتر شده است. خشکی به دلیل بسته شدن روزنه‌ها، تأثیر قابل توجهی بر فتوسنتز دارد و جریان دی اکسیدکربن به بافت مزوفیل را کاهش می‌دهد (Chaves et al., 2003). خشکی همچنین کمبودهای متابولیک را تشدید می‌کند و باعث کاهش در تجدید فعالیت آنزیم روبیسکو (Parry et al., 2003)، کاهش تولید ATP، فتوفسفوریلاسیون و فسفر معدنی و هم‌ب‌طور کاهش سطح برگ به دلیل پیری بیشتر برگ می‌شود (De Souza et al., 1997). تنش خشکی منضم به دماهای بالا، با اثرگذاری بر اندازه و تولید دانه عدس (Sehgal et al., 2017)، سبب کاهش عملکرد می‌شود (Kumar et al., 2016).

یکی از مطالعات مهم در اصلاح نباتات و بررسی‌های به‌نژادی، شناخت اثر متقابل بین ژنوتیپ‌ها با محیط‌های گوناگون است. وجود برهمکنش ژنوتیپ در محیط در آزمایش‌های ناحیه‌ای بسیاری از گیاهان زراعی نشان می‌دهد که پایداری عملکرد همراه با میانگین عملکرد بالا، باید به‌عنوان یک جنبه مهم آزمایش‌های مقایسه عملکرد در نظر گرفته شود، زیرا برهمکنش ژنوتیپ در محیط، می‌تواند هرگونه پیشرفت ناشی از گزینش را کاهش دهد. پژوهشگران روش‌های زیادی برای تجزیه پایداری ارائه داده‌اند که به دو دسته کلی پارامتری (تک متغیره یا چند متغیره) و ناپارامتری تقسیم می‌شوند. در بین روش‌های چند متغیره می‌توان روش‌های اثرات اصلی جمع‌پذیر و اثر متقابل ضرب‌پذیر (AMMI) و GGE بای‌پلات را نام برد (Wright & Laffont, 2018).

علی‌رغم مزایای مدل AMMI و استفاده گسترده از آن، این مدل در تشریح ساختار مدل خطی اثر مخلوط خطی (LMM) کارایی ندارد. برای برطرف کردن این مشکل، استفاده از مدل بهترین پیش‌بینی‌های نارایب خطی ($BLUP^1$) پیشنهاد شده است (Olivoto et al., 2019 a). این روش در صورت وجود اثرات LMM، پتانسیل بالایی در پیش‌بینی دقیق‌تر اثرات تصادفی دارد. در محیط‌های اخیر، روش بهترین پیش‌بینی‌های نارایب خطی ($BLUP$) که میانگین‌ها را با دقت بالا، به‌ویژه در مدل‌های مختلط تخمین می‌زند نیز برای ارزیابی داده‌های آزمایش‌های چندمحیطی به کار گرفته شده است (Olivoto et al., 2019 b). مدل آماری $BLUP$ راهکاری برای توانایی پیش‌بینی بهتر است که در آن بهترین پیش‌بینی‌های نارایب 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 b).

¹ Best Linear Unbiased Predictions (BLUP)

a (2019). در هنگام وجود اثر مختلط خطی، این روش پتانسیل پیش‌بینی دقیق اثرات تصادفی را فراهم می‌کند (Smith, 1936). در روش ارائه شده توسط اولیوتو و همکاران (Olivoto et al, 2019 a) برای بهره‌گیری از مزایای دو روش AMMI و BLUP، با مدل اثرهای مختلط خطی، یک ماتریس برهمکنش ژنوتیپ در محیط به دست می‌آید و از تجزیه این ماتریس با روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی با تجزیه ارزش منفرد، یک معیار پایداری ژنوتیپی به نام شاخص پایداری میانگین وزنی نمرات مطلق بهترین پیش‌بینی‌های نارایب خطی معرفی شد که حاصل تلفیق دو روش AMMI و BLUP است (Olivoto et al, 2019 a).

روش حداکثر درست‌نمایی محدود شده ($REML^1$) یکی از روش‌های مهم برای تجزیه داده‌های چند محیطی است. در این روش محدودیت تجزیه واریانس به روش کمترین مربعات برای داده‌های نامتعادل و همچنین متجانس برطرف می‌شود (Holland, 2006). مدل‌های مختلط مانند REML روش‌هایی مناسب برای محاسبه اجزای واریانس و بهترین پیش‌بینی نارایب خطی (BLUP) است که برای پیش‌بینی مقادیر ژنتیکی و اجزای واریانس استفاده می‌شوند (Resende, 2016). تجزیه BLUP روشی مناسب در زمان معنی‌دار بودن برهمکنش ژنوتیپ در محیط می‌باشد (Olivoto et al., 2019 b). این روش، راهکاری برای توانایی پیش‌بینی بهتر است که در آن، بهترین پیش‌بینی نارایب خطی روی ماتریس برهمکنش ژنوتیپ در محیط تخمین زده می‌شود و تجزیه پایداری به روش AMMI روی این پیش‌بینی‌ها انجام می‌شود (Olivoto et al, 2019 a). یکی از مزایای BLUP، تخمین میانگین‌ها با دقت بالا در مدل‌های مخلوط می‌باشد و زمانی که اثر مختلط خطی وجود داشته باشد، این روش پیش‌بینی دقیق‌تری از اثرات تصادفی را فراهم می‌کند (Smit et al., 2005).

با تلفیق روش‌های AMMI و BLUP یک ماتریس اثر متقابل ژنوتیپ با محیط در قالب یک مدل مخلوط خطی مبتنی بر BLUP ایجاد می‌شود که با تجزیه این ماتریس، آماره‌ای تحت عنوان شاخص پایداری میانگین وزنی نمرات مطلق ($WAASB^2$) به دست خواهد آمد که قادر به وزن‌دهی بین عملکرد دانه و پایداری آن است (Olivoto et al, 2019 b). از دیگر شاخص‌های به دست آمده از تلفیق مدل‌های AMMI و BLUP می‌توان به شاخص $WAASBY^3$ اشاره نمود که هر دو معیار عملکرد دانه و پایداری را توأم در نظر گرفته و باعث می‌شود گزینش بر اساس آن با دقت و کارایی بالاتری صورت گیرد (Olivoto et al, 2019 a). در این شاخص، به‌نژادگر بر اساس هدف اصلاحی خود، به هر یک از دو معیار عملکرد دانه و پایداری، وزن‌های متفاوتی داده و می‌تواند ارزیابی ژنوتیپ‌ها را بر اساس آن انجام دهد. در نمودار $WAASB$ از رویکرد مدل مخلوط استفاده می‌شود که با آن تخمین پارامترهای واریانس ژنوتیپی، برهمکنش ژنوتیپ $\times$ محیط، وراثت‌پذیری عمومی، وراثت‌پذیری بر اساس میانگین و همبستگی‌های ژنتیکی در نظر گرفته می‌شود. از دیگر مزایای این شاخص، استفاده از همه مؤلفه‌های اصلی است، بنابراین پایداری را به شکل بهتری نشان می‌دهد و ژنوتیپ‌های انتخابی از پایداری مطمئن‌تری برخوردار خواهند بود (Olivoto et al, 2019 b).

¹ Restricted maximum likelihood

² Weighted average of absolute scores

³ Weighted average of WAASB

جنبه دیگری از تلفیق دو روش AMMI و BLUP، بهره‌گیری از ابزارهای گرافیکی تجزیه AMMI در شاخص‌های برآورد شده است؛ به‌طوری که برای کمک به تفسیر چشمی، گرافیک‌هایی برای نشان دادن میانگین متغیر پاسخ در برابر WAASB ایجاد شدند (Olivoto et al, 2019 a). این ابزارهای گرافیکی که در پدیدآوری آن‌ها از ابزارهای AMMI و بای‌پلات‌های GGE بهره گرفته می‌شوند، برای نشان دادن چشمی جایگاه ژنوتیپ‌ها از نظر پایداری و میزان عملکرد، بسیار کاربردی هستند.

از طرفی، عملکرد دانه صفت کمی پیچیده‌ای است که توسط تعداد زیادی ژن کنترل می‌گردد و شدیداً تحت تأثیر محیط قرار دارد و همچنین صفات بسیاری به تنهایی یا با هم، بر آن اثر می‌گذارند. بنابراین، انتخاب ژنوتیپ‌های مطلوب تنها بر اساس عملکرد سودمند نیست و چنانچه انتخاب بر اساس سایر صفات تأثیرگذار بر آن انجام شود، بسیار مفید خواهد بود (Sharifi et al, 2017). به طور کلی در برنامه‌های اصلاحی، گزینش بر اساس یک صفت، به عنوان یک راهبرد مناسب تلقی نمی‌گردد، زیرا هیچ اطمینانی از دستاوردهای ژنتیکی در سایر صفات مهم وجود ندارد (Jahufer & Casler, 2015). از این رو، به‌نژادگران اغلب تلاش دارند که صفات مطلوب مختلف را در یک ژنوتیپ جدید با عملکرد بالا، تجمع نمایند (Olivoto & Nardino, 2020). برای این منظور، چندین شاخص برای انتخاب ژنوتیپ‌های برتر پیشنهاد شده است که از آن جمله، می‌توان به شاخص فاصله ژنوتیپ-ایدئوتیپ چند صفتی ($MGIDI^1$) اشاره کرد که بر اساس تجزیه و تحلیل عاملی و فاصله از ایدئوتیپ معرفی شده است (Olivoto & Nardino, 2020) که بر گزینش ژنوتیپ و توصیه‌های مبتنی بر اطلاعات چندین صفت تأکید دارد. این شاخص قادر است بیش از یک صفت وابسته را ارزیابی نموده و نقاط قوت و ضعف ژنوتیپ‌های گزینش شده را مشخص نماید (Al-Ashkar et al., 2023). این شاخص عمدتاً برای گزینش ژنوتیپ‌ها در برنامه اصلاح گیاهان زراعی بر اساس چندین صفت طراحی شده است و به طور موفقیت آمیزی در گزینش ژنوتیپ‌های برتر در محصولات زراعی مختلف استفاده شده است (Shirzad et al., 2022; Rahmati et al., 2024).

شاخص پایداری چندصفتی ($MTSI^2$) برای شناسایی ژنوتیپ‌های پربازده و مطلوب از نظر صفات زراعی در آزمایشات چند محیطی نیز به‌عنوان یکی از کاربردی‌ترین شاخص‌های آماری معرفی شده است (Olivoto et al, 2019 b). این شاخص، علاوه بر عملکرد دانه، صفات دیگری را نیز در نظر می‌گیرد (Olivoto et al, 2019 a) و چنانچه همبستگی آن‌ها با عملکرد بالا باشد، انتخاب به نحو مؤثرتری انجام خواهد شد (Authrapun et al., 2021). این شاخص مبتنی بر تحلیل عاملی می‌باشد که نمرات عامل‌های هر ایدئوتیپ، با توجه به فاکتورهای مطلوب و نامطلوب طراحی شده است. بر اساس فاصله ژنوتیپ - ایدئوتیپ، یک احتمال فضایی³ محاسبه می‌شود که رتبه‌بندی ژنوتیپ‌ها را ممکن می‌سازد. از این رو، ژنوتیپ دارای کمترین مقدار $MTSI$ ، به

¹ Multi Trait Genotype Ideotype Distance Index (MGIDI)

² Multi-Trait Stability Index (MTSI)

³ Spatial probability

ایدئوتیپ نزدیک‌تر است و میانگین عملکرد و ثبات بیشتری را در همه متغیرهای تحلیل شده نشان می‌دهد (Olivoto et al., 2019 a).

هدف از پژوهش حاضر، تعیین ژنوتیپ یا ژنوتیپ‌های پایدار با عملکرد بالا و مطلوب از نظر صفات مهم مانند ارتفاع بوته برای برداشت مکانیزه، وزن صد دانه بالاتر، سرعت و دوره پر شدن دانه بالاتر در ژنوتیپ‌های عدس با بهره‌گیری از شاخص‌های مبتنی بر مدل‌های AMMI، BLUP، MTSI و MGIDI بود.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش، ۱۴ ژنوتیپ پیشرفته عدس (جدول ۱) همراه با دو شاهد (رقم‌های گچساران و سپهر) در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار، در ایستگاه‌های تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی سراب چنگائی خرم‌آباد، گچساران و ایلام به مدت دو سال زراعی (۱۴۰۰-۱۴۰۲)، و در ایستگاه مغان به مدت یک سال زراعی (۱۴۰۰-۱۴۰۱) مورد ارزیابی قرار گرفتند (در مجموع هفت محیط). تاریخ کاشت بسته به وضعیت بارندگی مؤثر در هر چهار مکان، از نیمه دوم آذر ماه انجام شد. زمین مورد کشت تحت تناوب غلات - حبوبات دیم بود.

برای تهیه زمین در هر مکان، از گاواهن چيزل مرکب برای شخم زدن استفاده شد و سپس با دیسک زدن، کلوخ شکنی انجام شد. اطلاعات هواشناسی و نتایج تجزیه فیزیکی و شیمیایی خاک در جدول ۲ آورده شده است. بر اساس نتایج آزمون خاک، ۷۵ تا ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار فسفات آمونیوم و ۳۵ تا ۵۰ کیلوگرم در هکتار اوره، به هنگام عملیات تهیه زمین، به طور یکنواخت با خاک مخلوط گردید. بذره‌های ارقام و ژنوتیپ‌های آزمایش قبل از کاشت به منظور جلوگیری از بروز بیماری‌های قارچی، با قارچ‌کش کاربوکسین تیرام به نسبت دو در هزار و به مقدار ۳۰ گرم برای هر آزمایش ضدعفونی شدند. میزان بذر مصرفی ۲۰۰ دانه در متر مربع تعیین شد (Shobeiri et al., 2019). کاشت بذرها با کارنده تحقیقاتی وینتراشتاگر در چهار خط به طول چهار متر و به فاصله ۲۵ سانتی‌متر بین خطوط (چهار متر مربع) انجام شد. مبارزه با علف‌های هرز با استفاده از کولتیواتور دستی در دو مرحله در طول دوره رشد رویشی انجام شد. قبل از برداشت، دو خط کناری و نیم متر از ابتدا و انتهای دو خط وسط حذف و مابقی هر کرت (۱/۵ متر مربع) به صورت دستی برداشت شد و صفت عملکرد دانه محاسبه گردید.

عملکرد دانه، وزن صد دانه، ارتفاع بوته، تعداد روز تا گلدهی، تعداد روز تا رسیدگی، دوره پر شدن دانه، سرعت پر شدن دانه، بهره‌وری از بارش، سرعت تشکیل عملکرد دانه و وزن تک دانه در محیط‌های مختلف برای هر ژنوتیپ اندازه‌گیری شد. تعداد روز تا رسیدگی، از تاریخ کاشت تا رسیدگی دانه با استفاده از دسکرپتور عدس ثبت گردید (IBPGR, 1993). فاصله زمانی بین گلدهی تا رسیدن فیزیولوژیک به عنوان طول دوره پر شدن دانه در نظر گرفته شد (Mohammadi et al., 2006). در زمانی که ۹۰ درصد بوته‌های هر کرت به مرحله رسیدگی فیزیولوژیکی رسیدند، به عنوان تعداد روز تا رسیدگی در نظر گرفته شد. از حاصل

تقسیم میانگین وزن تک دانه بر طول دوره پرشدن دانه، میانگین سرعت پرشدن دانه به میلی گرم دانه در روز، به دست آمد (Mohammadi et al., 2006). سرعت تشکیل عملکرد دانه از تقسیم عملکرد دانه بر تعداد روز تا رسیدگی و بر حسب کیلوگرم در هکتار در روز) اندازه گیری شد (Forouzi et al., 2016). از تقسیم وزن دانه های یک بوته بر تعداد دانه ها، متوسط وزن تک دانه محاسبه گردید (Joudi & Ebadi, 2015). شاخص بهره وری از بارش¹ از تقسیم عملکرد دانه بر حسب کیلوگرم در هکتار بر میزان بارندگی در طول دوره رشد گیاه بر حسب میلی متر محاسبه گردید (Oweis & Hachum, 2003).

ساده ترین مدل خطی با برهمکنش ژنوتیپ در محیط برای تجزیه و تحلیل داده های آزمایشات چند محیطی مدل BLUP به

شرح زیر است:

$$y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \tau_j + (\alpha\tau)_{ij} + \gamma_{jk} + \varepsilon_{ijk} \quad \text{رابطه یک}$$

در این مدل، y_{ijk} متغیر پاسخ (عملکرد دانه) مشاهده شده در بلوک K ام از ژنوتیپ i ام در محیط j ام ($k=1, 2, \dots, b$)؛ μ میانگین کل؛ α_i اثر ژنوتیپ i ام؛ τ_j اثر محیط j ام؛ $(\alpha\tau)_{ij}$ اثر برهمکنش ژنوتیپ i ام با محیط j ام، γ_{jk} اثر بلوک k ام درون محیط j ام؛ و ε_{ijk} خطای تصادفی است. در مدل اثر مخلوط با فرض این که α_i و $(\alpha\tau)_{ij}$ اثرات تصادفی هستند، مدل بالا به صورت رابطه دو نوشته می شود:

$$y = X\beta + Zu + \varepsilon \quad \text{رابطه دو}$$

y یک بردار متغیر پاسخ $n \times 1$ است ($n = \sum gb$)؛ β بردار اثر ثابت ناشناخته $1 \times (eb)$ است ($y = [y_{111}, y_{112}, \dots, y_{geb}]'$)؛ u یک بردار اثرات تصادفی $m \times 1$ است ($m = g + ge$)؛ $\beta = [\gamma_{11}, \gamma_{12}, \dots, \gamma_{geb}]'$ ؛ $u = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_g, (\alpha\tau)_{11}, (\alpha\tau)_{12}, \dots, (\alpha\tau)_{ge}]'$ ؛ X یک ماتریس $n \times (eb)$ است که y را به β مرتبط می کند. Z یک ماتریس $n \times m$ است که y را به u مرتبط می کند؛ ε بردار خطاهای تصادفی $1 \times n$ است ($\varepsilon = [\gamma_{11}, \gamma_{12}, \dots, \gamma_{geb}]$). بردارهای β و u با استفاده از رابطه سه محاسبه می شوند (Henderson, 1975).

$$\begin{bmatrix} \beta \\ u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X1R - 1X & X1R - 1Z \\ Z1R - 1X & Z1R - 1 + G - 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} X1R - 1Y \\ Z1R - 1Y \end{bmatrix} \quad \text{رابطه سه}$$

به منظور تعیین پایداری ژنوتیپ ها، از تجزیه به مقادیر منفرد (SVD)، روی ماتریس BLUP های برهمکنش های ژنوتیپ در محیط با یک مدل اثر مخلوط خطی با روش حداکثر درست نمایی محدود شده برآورد شدند. از کمیت های پایداری WAASB و WAASBY برای کمی سازی پایداری با رابطه های چهار و پنج بهره گرفته شد.

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

¹ Rain water productivity

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

رابطه پنج

که در آن، $WAASB_i$ ، میانگین وزنی نمرات مطلق ژنوتیپ i ام، $IPCA_{ik}$ ، نمره ژنوتیپ i ام در K امین محور مؤلفه اصلی برهمکنش ($IPCA$)، و EP_k ، مقدار واریانس توجیه شده توسط K امین $IPCA$ است. ژنوتیپ با کمترین مقدار $WAASB$ پایدار در نظر گرفته می‌شود. انتخاب همزمان برای میانگین عملکرد و پایداری (MPE^1) با شاخص $WAASBY$ انجام شد که در آن به میانگین عملکرد (Y) و شاخص پایداری ($WAASB$) وزن داده می‌شود و $WAASBY_i$ ، میانگین وزنی $WAASB$ و عملکرد دانه (GY) برای ژنوتیپ i ام، WY ، 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 (در این مورد، شاخص $WAASB$)، $WAASB_i$ ، میانگین وزنی نمرات مطلق ژنوتیپ i ام و $WAASB_{min}$ ، کمترین مقدار $WAASB$ مشاهده شده در بین ژنوتیپ‌ها است. در شاخص $WAASBY_i$ ژنوتیپ‌هایی با بیشترین مقدار، ژنوتیپ‌های برتر از نظر پایداری و عملکرد دانه هستند.

تمام تجزیه‌های آماری با استفاده از بسته تجزیه آزمایش‌های چندمحیطی با نام $Metan^2$ (Olivoto & Lúcio, 2020) و GGE (Wright & Laffont, 2018) در نرم‌افزار R انجام شد. برای تعیین کمیت پایداری ژنوتیپی، از تجزیه مقادیر منفرد^۳، بر روی ماتریس بهترین پیش‌بینی‌های ناریب خطی ($BLUP$) برهمکنش‌های ژنوتیپ در محیط^۴ با یک مدل اثر مختلط خطی^۵ استفاده شد. اجزای واریانس با روش حداکثر درست‌نمایی محدود شده ($REML$) برآورد شدند و برای ارزیابی معنی‌داری اثرهای تصادفی، آزمون نسبت درست‌نمایی^۶ (LRT) به کار گرفته شد. استفاده از مدل $REML$ محدودیت تجزیه واریانس به روش کمترین مربعات را برای داده‌های نامتعادل و همچنین نامتجانس بر طرف می‌کند (Holland, 2006). از طرفی دیگر، چنین مدلی برای به دست آوردن اجزای واریانس و برآورد مقادیر ژنتیکی و اجزای ژنتیکی کارایی بهتری دارند (Resende, 2016)، لذا روش $REML/BLUP$ به دلیل در نظر گرفتن مقادیر ژنوتیپی (نه فنوتیپی) دقت بیشتری در روند برنامه‌های اصلاحی دارد و اجازه انتخاب بهترین ژنوتیپ‌ها را فراهم می‌کند.

انتخاب همزمان برای میانگین عملکرد و پایداری بر اساس چند صفت با استفاده از نمرات به دست آمده از یک تجزیه عاملی اکتشافی انجام شد. تخمین شاخص پایداری چند صفتی، بر طبق رابطه شش انجام شد (Olivoto et al., 2019 a).

$$MTSI_i = [\sum_{j=1}^f (F_{ij} - F_j)]^{0.5}$$

رابطه شش

¹ Mean performance and stability, MPE

² Multi environment trial analysis

³ SVD

⁴ GEI

⁵ LMM

⁶ Likelihood Ratio Test

که در آن 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. ژنوتیپ با کمترین مقدار MTSI، به ژنوتیپ ایده‌آل نزدیک‌تر است و بنابراین میانگین عملکرد و پایداری بالایی را برای همه متغیرهای بررسی شده ارائه می‌دهد. دیفرانسیل یا تفاوت انتخاب برای میانگین عملکرد برای هر صفت با شدت انتخاب ۱۵، محاسبه شد (Olivoto et al., 2019 b).

مقادیر ویژه، واریانس نسبی، تجمعی و نیز ضرایب عاملی پس از چرخش وریماکس در تجزیه به عامل‌ها بر اساس تجزیه به مؤلفه‌های اصلی برای تعیین شاخص پایداری چند صفتی با استفاده از نرم افزار R محاسبه گردید. رتبه‌بندی ژنوتیپ‌های آزمایشی به صورت صعودی بر اساس شاخص پایداری MTSI و نقاط قوت و ضعف ژنوتیپ‌های منتخب به عنوان نسبت هر عامل در شاخص پایداری MTSI مشخص گردید. علاوه بر این، پیش‌بینی دیفرانسیل گزینش و بازده گزینش برای صفات مؤثر بر اساس شاخص پایداری MTSI با استفاده از نرم‌افزار R محاسبه گردید. برای رتبه‌بندی ژنوتیپ‌ها از شاخص MGIDI استفاده شد. این شاخص بر اساس جمع‌آوری اطلاعات و داده‌های صفات مورد بررسی با استفاده از بسته "Metan" در نرم‌افزار R محاسبه گردید (Olivoto & Nardino, 2020). برای محاسبه سود انتخاب (SG%) از رابطه هفت استفاده شد.

$$SG (\%) = \frac{(\bar{X}_S - \bar{X}_0) \times h_2}{\bar{X}_0} \quad \text{رابطه هفت}$$

تحلیل عاملی برای محاسبه کاهش ابعاد داده‌ها و ساختار روابط انجام شد. با انجام تجزیه واریانس AMMI با استفاده از نرم‌افزار R، مقادیر مؤلفه‌های اصلی برای هر ژنوتیپ و محیط به دست آمد و با رسم بای‌پلات‌های آن‌ها، سازگاری عمومی و خصوصی ارقام تعیین شد. برای هر یک از ارقام، BLUP به صورت مجموع میانگین تمامی محیط‌ها و اثر ژنوتیپی پیش‌بینی شد.

جدول ۱- اسامی ارقام و ژنوتیپ‌های پیشرفته عدس

Table 1- Names of advanced lentil cultivars and genotypes

کد	ژنوتیپ	منشأ	کد	ژنوتیپ	منشأ
Code	Genotype	Origin	Code	Genotype	Origin
G1	X02011S97-17	IRAN	G9	ILL7685	ICARDA
G2	X02011S-163-15	IRAN	G10	BARI MASUR-6XLIRL	ICARDA
G3	ILL4605	ICARDA	G11	ILL 10750× ILL1982	ICARDA
G4	X2011S-172-34	IRAN	G12	ILL10800 × 3310	ICARDA
G5	X2011S-183-16	IRAN	G13	ILL4605×ILL6024	ICARDA
G6	X2011S-119-26	IRAN	G14	ILL6002	ICARDA
G7	X2011S-192-45	IRAN	G15	Gachsaran	IRAN
G8	ILL4605×ILL5597	ICARDA	G16	Sepehr	IRAN

جدول ۲- ویژگی‌های جغرافیایی و بارندگی سالانه محیط‌های آزمایشی

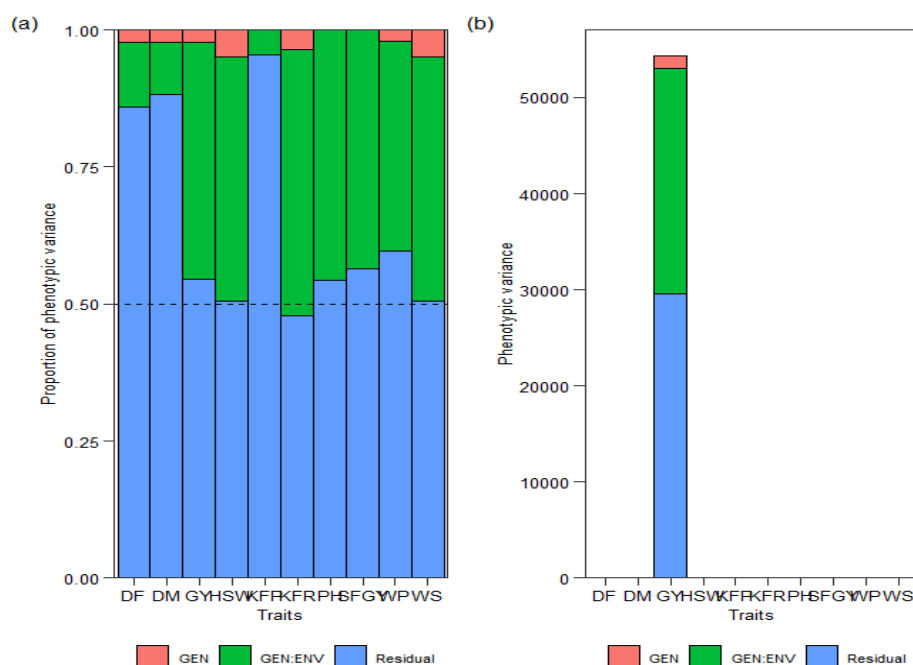
Table 2- Geographical characteristics and annual rainfall of the experimental environments

مکان	ارتفاع از سطح دریا (متر)	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	بارندگی بلند مدت (میلی‌متر)	بارندگی در سال زراعی (میلی‌متر)	بارندگی در سال زراعی (میلی‌متر)	متوسط درجه حرارت در سال زراعی (درجه سانتیگراد)	متوسط درجه حرارت در سال زراعی (درجه سانتیگراد)
Location	Height above sea level (m)	Longitude	Latitude	Long-term rainfall (mm)	Rainfall in the crop year 2020-2021 (mm)	Rainfall in the crop year 2021-2022 (mm)	Average temperature in the crop year 2020-2021	Average temperature in the crop year 2021-2022
					۱۴۰۰-۴۰۱	۱۴۰۱-۴۰۲	۱۴۰۰ (درجه)	۱۴۰۱ (درجه)

							(° C)	(° C)
لرستان Lorestan	1147	48°, 18' E	33°, 29' N	445	307 (E1)	463 (E2)	22.4	21.71
گچساران Gachsaran	710	55°, 50' E	30°, 17' N	450	332 (E3)	491 (E4)	18.8	18.27
ایلام Ilam	975	47°, 33' E	36°, 46' N	350	261 (E5)	313 (E6)	15.65	21.61
مغان Mughan	1650	48°, 18' E	33°, 29' N	445	170 (E7)	-	12.75	-

نتایج و بحث

برای صفات اندازه گیری شده، واریانس های برآورد شده به سه جزء واریانس ژنوتیپی، برهمکنش ژنوتیپ در محیط و باقیمانده تفکیک شد (شکل ۱). بر اساس اطلاعات شکل ۱، ۵۴/۵۳ درصد از واریانس فنوتیپی توسط اثر باقیمانده توجیه گردید. همچنین ۴۳/۱۹ درصد از واریانس فنوتیپی عملکرد دانه توسط برهمکنش ژنوتیپ × محیط توجیه شد. حال آنکه اثر ژنوتیپ، توجیه کننده تنها ۲/۲ درصد از واریانس برآورد شده بود. این موضوع حاکی از تأثیر پایین ژن ها در ایجاد تنوع میان ژنوتیپ ها بود. بنابراین می توان نتیجه گرفت که ژنوتیپ ها از نظر عملکرد دانه، تحت تأثیر شرایط محیطی قرار گرفتند. اثر باقیمانده عمدتاً به اثر محیط مربوط می شود که با توجه به تفاوت های زیاد بین محیط های آزمایشی از نظر ویژگی های خاک، مقدار و پراکنش بارندگی و سایر عوامل قابل توجیه است (جدول ۲). نتایج تحقیقات در مورد گیاه عدس نیز نشان داده است که بخش عمده واریانس توسط اثر محیط توجیه می شود (Amin et al., 2024; Pezeshkpour et al., 2024 a; Sellami et al., 2021).



شکل ۱- (a) نسبت مؤلفه های واریانس برای صفات مورد مطالعه در ژنوتیپ های عدس در آزمایش های چندمحیطی (Gen: ژنوتیپ، Env: محیط) و (b) واریانس فنوتیپی برآورد شده برای عملکرد دانه

عملکرد دانه (GY)، وزن صد دانه (HSW)، ارتفاع بوته (PH)، روز تا گلدهی (DF)، روز تا رسیدگی (DM)، دوره پر شدن دانه (KFR)، سرعت پر شدن دانه (WS)، بهره وری از بارش (WP)، سرعت تشکیل عملکرد دانه (SYFR) و وزن تک دانه (WS)

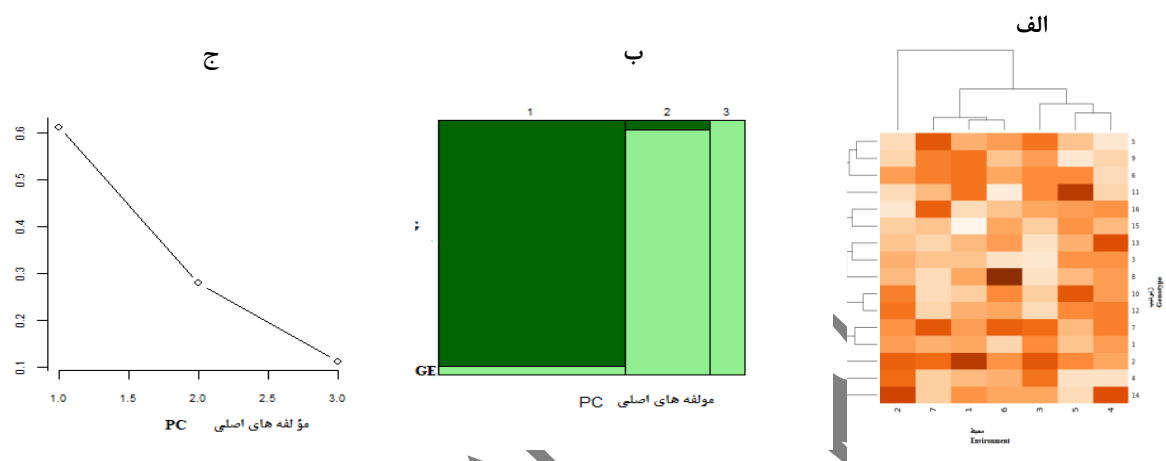
Fig. 1- (a) Ratio of variance components for studied traits in lentil genotypes in multi-environment experiments (Gen: genotype, Env: environment) and (b) Estimated phenotypic variance for grain yield

Grain yield (GY), 100 seed weight (HSW), plant height (PH), days to flowering (DF), days to maturity (DM), kernel filling period (KFP), kernel filling rate (KFR), rain water productivity (WP), seed yield formation rate (SYFR), and weight of single seed (WS)

برای پی بردن به پراکنش عملکرد دانه ژنوتیپ‌ها در محیط‌های مختلف، از نمودار گرمایی استفاده شد (شکل ۲ - الف). در این نمودار، ژنوتیپ دارای عملکرد یکنواخت در تمام محیط‌ها می‌تواند پایدار باشد. بر این اساس، ژنوتیپ‌های ۲، ۷، ۱۴ و ۱۰ را می‌توان پایدار در نظر گرفت. رقم شاهد سپهر پایدار و رقم شاهد گچساران ناپایدار بود. در این نمودار، عملکرد ژنوتیپ‌ها در هر محیط بیانگر تنوع درون آن محیط است، به طوری که هر اندازه رنگ‌های مربوط به ژنوتیپ‌های درون یک محیط متفاوت‌تر باشند، بیانگر گوناگونی بین ژنوتیپ‌های درون آن محیط است (Karimizadeh et al., 2020). در محیط‌های ۶، ۴ و ۵ ژنوتیپ‌ها از تنوع عملکردی بیشتری برخوردار بودند. از طرف دیگر، می‌توان از تفاوت عملکرد هر ژنوتیپ در محیط‌های مختلف برای بیان تنوع در بین محیط‌ها استفاده کرد؛ به طوری که ژنوتیپ‌های ۳، ۵، ۹ و ۱۵ دارای تنوع بیشتر در محیط‌های مطالعه شده بودند (شکل ۲ - الف). بررسی چشمی پراکنش میانگین ژنوتیپ‌ها در محیط‌های مطالعه شده نشان‌دهنده تفاوت ژنوتیپ‌های مختلف از نظر عملکرد دانه در یک محیط و همچنین تفاوت میانگین آن‌ها از محیطی به محیط دیگر است که نشان می‌دهد گزینش ژنوتیپ‌ها فقط بر پایه عملکرد دانه در یک مکان (محیط)، از اعتبار بالایی برخوردار نیست و باید برای به دست آوردن یک نتیجه درست، ژنوتیپ‌ها در محیط‌های مختلف ارزیابی شوند تا پایداری آن‌ها برآورد شود (Finlay & Wilkinson, 1963). پژوهشگران دیگری نیز واکنش‌های متفاوت ژنوتیپ‌های عدس را در محیط‌های مختلف گزارش کرده‌اند (Hossain et al., 2023; Pezeshkpour et al., 2024 b,c; Shobeiri et al., 2024). معنی‌دار بودن اثر محیط نشانگر این است که متوسط دما، میزان و پراکنش بارندگی و توزیع ماهانه بارندگی در دوره‌های مختلف رشدی گیاه، در محیط‌های مختلف یکسان نبودند (جدول ۲).

پیش از تجزیه پایداری، اجزای مجموع مربعات کل (TSS)، شامل مجموع مربعات ژنوتیپ (G) و برهمکنش ژنوتیپ در محیط (GE) با بهره‌گیری از نمودار موزائیکی، از یکدیگر جدا شدند. در این نمودار که به وسیله لافونت و همکاران (Laffont et al., 2007) پیشنهاد شده است، مساحت مربع نمودار، ۱۰۰ درصد مجموع مربعات کل است (شکل ۲ - ب). نواحی با رنگ تیره، تنوع برآمده از اثرات ژنوتیپی یا اختلاف بین میانگین ژنوتیپ‌ها را نشان می‌دهد که در این تحقیق ۲/۲ درصد تنوع کل است (جدول ۴) و ناحیه‌های با رنگ روشن، تنوع ناشی از برهمکنش ژنوتیپ در محیط را نشان می‌دهد که ۴۳/۱۹ درصد از تغییرات کل را در برمی‌گیرد (جدول ۴). شکل ۲ - ب سهم مؤلفه‌ها از واریانس ژنوتیپ و برهمکنش ژنوتیپ در محیط را نشان می‌دهد. ستون‌های این نمودار بیانگر محورهای مؤلفه اصلی است، به گونه‌ای که ستون اول در برگیرنده ۴۴/۴ درصد از کل مساحت مربع است و اولین مؤلفه اصلی از مجموع مربعات کل را تشکیل می‌دهد. ستون (مؤلفه اصلی) دوم، ۳۲/۲ درصد از مجموع مربعات کل را در بر گرفته است. این دو مؤلفه اصلی، با هم ۷۶/۶ درصد از مجموع مربعات کل را تشکیل می‌دهند.

از آزمون اسکری نیز برای شناساندن بهترین شمار مؤلفه‌های توجیه کننده برهمکنش ژنوتیپ در محیط نیز استفاده شد که نشان داد که هر کدام از مؤلفه‌ها سهم قابل توجهی در توجیه برهمکنش ماتریس برهمکنش ژنوتیپ در محیط حاصل از BLUP داشتند (شکل ۲-الف و شکل ۲-ج)، به طوری که مؤلفه اصلی اول و دوم به ترتیب ۳۲/۸۴ و ۲۷/۱۱ درصد از تغییرات برهمکنش ژنوتیپ در محیط را توجیه نمودند.



شکل ۲- برهمکنش ژنوتیپ در محیط (GEI): الف) نمودار گرمایی پراکنش عملکرد ژنوتیپ‌ها در محیط‌ها بر اساس تفاوت رنگ و تنوع ژنوتیپ‌ها و محیط‌ها؛ ب) نمودار موزائیکی جهت نمایش سهم مؤلفه‌ها از واریانس G+GE و ج) ریشه مشخصه ماتریس GEI
Fig. 2- Genotype-by-environment interaction (GEI): a) Heatmap of the distribution of genotype performance across environments based on the color difference and diversity of genotypes and environments; b) Mosaic plot to show the contribution of components to the G+GE variance; and c) The characteristic root of the GEI matrix

با توجه به اینکه در تجزیه داده‌های این آزمایش از مدل مختلط خطی استفاده شده است، آزمون نسبت درست‌نمایی برای ارزیابی معنی‌داری فاکتورهای آزمایشی نیز بکار برده شد و نشان داد که اثر ژنوتیپ بر صفت وزن صد دانه معنی‌دار بود (جدول ۳). همچنین اثر برهمکنش ژنوتیپ در محیط بر صفات عملکرد دانه، وزن صد دانه، ارتفاع بوته، تعداد روز تا گلدهی، سرعت پرشدن دانه، بهره‌وری از بارش، سرعت تشکیل عملکرد دانه و وزن تک دانه معنی‌دار بود (جدول ۳). اثر معنی‌دار برهمکنش ژنوتیپ در محیط، بیانگر احتمال متفاوت بودن عملکرد دانه یک ژنوتیپ از محیطی به محیط دیگر است. بنابراین، تجزیه BLUP برای تجزیه چنین داده‌هایی مناسب است (Olivoto et al., 2019 b). از این‌رو، بهترین پیش‌بینی‌های ناریب خطی (BLUP ها) برآورد شد و تجزیه پایداری به روش AMMI بر روی این BLUP ها انجام گردید. پژوهشگران دیگری نیز برهمکنش معنی‌دار ژنوتیپ در محیط را بر عملکرد دانه و اجزای آن در عدس با تجزیه واریانس به روش کمترین مربعات گزارش نموده‌اند (Dehghani et al., 2008; Biçer et al., 2018).

جدول ۳- ارزیابی معنی‌داری فاکتورها در مدل مختلط و برآورد اجزای واریانس با روش حداکثر درست‌نمایی محدود شده برای صفات مطالعه شده

Table 3- Assessing the significance of factors in the mixed model and estimating variance components using the restricted maximum likelihood method for the studied traits					
آزمون نسبت درست‌نمایی Likelihood ratio test					
آماره	عملکرد دانه	وزن صد دانه	ارتفاع بوته	روز تا رسیدگی	روز تا گلدهی
Statistics					

	Grain yield		100 seed weight		plant height		days to maturity		days to flowering	
	Gen	Gen×Env	Gen	Gen×Env	Gen	Gen×Env	Gen	Gen×Env	Gen	Gen×Env
کای اسکوتر (χ^2)	0.363 ^{ns}	51.943 ^{**}	1.409 ^{**}	58.966 ^{**}	0.0001 ^{ns}	57.416 ^{**}	0.8259 ^{ns}	2.593 ^{ns}	0.7115 ^{ns}	3.9766 [*]

ادامه جدول ۳

Table 3- Continued.

آماره Statistics	Likelihood ratio test آزمون نسبت درست‌نمایی									
	دوره پر شدن دانه kernel filling period		سرعت پر شدن دانه kernel filling rate		سرعت تشکیل عملکرد دانه seed yield formation rate		بهره‌وری از بارش rain water productivity		وزن تک دانه weight of single seed	
	Gen	Gen×Env	Gen	Gen×Env	Gen	Gen×Env	Gen	Gen×Env	Gen	Gen×Env
کای اسکوتر (χ^2)	0.00001 ^{ns}	0.6281 ^{ns}	0.792 ^{ns}	68.454 ^{**}	0.0001 ^{ns}	51.971 ^{**}	7.336 ^{ns}	39.93 ^{**}	1.409 ^{ns}	58.966 ^{**}

^{ns}, * و **: به ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد.
^{ns}, * and **: Non significant, significant at the $p \leq 0.01$ and $p \leq 0.05$, respectively.

در جدول ۴ برخی از پارامتری‌های ژنتیکی شامل واریانس ژنوتیپ، واریانس ژنوتیپ در محیط، واریانس باقیمانده و واریانس فنوتیپی به روش درست‌نمایی محدود شده برآورد شده‌اند و نسبت آن‌ها به واریانس فنوتیپی برای این سه جزء به ترتیب ۲/۲۸، ۴۳/۱۹ و ۵۴/۵۳ درصد بود (جدول ۴). کمترین (۰/۰۹۳۶) و بیشترین (۵۳۳۲۵) واریانس فنوتیپی که به وسیله واریانس باقیمانده توجیه می‌گردد، به ترتیب مربوط به صفات متوسط سرعت پر شدن دانه و عملکرد دانه بود (جدول ۴). همچنین کمترین (۰/۰۴۵۲) و بیشترین (۳۹/۶) واریانس برهمکنش ژنوتیپ × محیط به صفات سرعت پر شدن دانه و وزن تک دانه اختصاص داشت. برآورد اجزای واریانس ژنتیکی و سایر پارامتری‌های مرتبط با آن نشان داد که در بین صفات مختلف، بیشترین سهم واریانس ژنتیکی در توجیه واریانس فنوتیپی مرتبط به صفات وزن صد دانه (۴/۹۱ درصد)، وزن تک دانه (۴/۹۱ درصد) و سرعت پر شدن دانه (۳/۶۸ درصد) بود. میزان وراثت‌پذیری عمومی برای عملکرد دانه در این پژوهش ۰/۰۲۲ درصد بود (جدول ۴) که بیانگر این می‌باشد که بخش از تغییرات عملکرد دانه ناشی از تأثیر عوامل محیطی بود. دقت گزینش در محدوده ۰/۴۵ قرار داشت. این آماره همبستگی بین مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی شده را نشان می‌دهد (Olivoto et al., 2019 b). دقت گزینش بالای صفات نشان‌دهنده پایایی مدل در انتخاب ژنوتیپ‌های برتر بود.

برای عملکرد دانه، ضریب تبیین برهمکنش ژنوتیپ در محیط (GEI) و میزان وراثت‌پذیری بر میانگین به ترتیب برابر ۰/۴۳۱۹ و ۰/۲۰۶۵ درصد بود (جدول ۴). دقت گزینش ژنوتیپ و همبستگی بین ارزش‌های ژنوتیپی در سراسر محیط‌ها به ترتیب ۰/۴۵۴ و ۰/۴۴۲ بود (جدول ۴). همچنین، ضریب تغییرات ژنوتیپی، ضریب تغییرات باقیمانده و همچنین نسبت این دو ضریب تغییرات به ترتیب برابر با ۴/۴۸، ۲۱/۹ و ۰/۲۰۴ درصد بود. برای افزایش دقت پیش‌بینی، یکی از گزینه‌های پیش‌روی به‌نژادگران، بهره‌گیری از مدل‌های آماری با توانایی پیش‌بینی بهتر همچون بهترین پیش‌بینی‌های نارایب خطی است که تجزیه پایداری به روش AMMI می‌تواند روی این پیش‌بینی‌ها انجام شود (Olivoto et al., 2019 a). تجزیه واریانس جداگانه در هر کدام از محیط‌ها نشان داد که در پنج محیط، اثر ژنوتیپ بر عملکرد دانه معنی‌دار بود (داده‌ها ارائه نشده است). سه گزینه اصلی برای افزایش دقت پیش‌بینی در آزمایش‌های چند محیطی، بهبود تکنیک‌های آزمایشی (همچون بهره‌گیری از طرح‌هایی با اندازه و شکل ایده‌آل، پیاده کردن

درست طرح‌ها در منطقه آزمایشی و کاربرد یکنواخت مدیریت زراعی)، افزایش تعداد تکرارها (با استفاده از طرح‌های مناسب همچون طرح‌های چند عاملی) و استفاده از مدل‌های آماری با توانایی پیش‌بینی بهتر هستند (Gauch & Zobel 1988; Olivoto et al., 2019 b).

در شکل ۳، میانگین‌های پیش‌بینی شده عملکرد دانه با روش BLUP نشان داده شده است که بیانگر آن است که بالاترین عملکرد پیش‌بینی شده با روش BLUP برای ژنوتیپ ۲ و در پی آن ژنوتیپ‌های ۷، ۱۴، ۶، ۱۰، ۱۲، ۱ و ۴ بود که دارای عملکرد پیش‌بینی شده بیشتر از میانگین کل بودند. ژنوتیپ‌های شماره ۱۲، ۱ و ۴ عملکرد پیش‌بینی شده بسیار نزدیک به میانگین داشتند و کمترین پیش‌بینی عملکرد با فاصله زیاد از میانگین کل، مربوط به ژنوتیپ‌های ۱۵، ۳ و ۹ (گچساران) بود. دیگر رقم شاهد یعنی ژنوتیپ شماره ۱۶ (رقم سپهر) نیز پیش‌بینی عملکردی کمتر از میانگین داشت. برآورد دقیق میانگین عملکرد ژنوتیپ‌ها به‌ویژه در مدل‌های مختلط از جمله مزیت‌های عمده روش BLUP می‌باشد (Olivoto et al., 2019b). علاوه بر این، در صورتی که اثر مختلط خطی وجود داشته باشد، BLUP امکان پیش‌بینی بهینه اثرهای تصادفی را امکان‌پذیر می‌سازد (Smith et al., 2005). ادغام دو روش BLUP و AMMI موجب افزایش کارایی هر دو روش می‌شود و یافته‌های حاصل از آزمایش‌های چند محیطی دقیق‌تر تفسیر خواهند شد (Verma & Singh, 2021). روش BLUP این ویژگی را دارد که میانگین‌ها را با دقت بالا، به‌ویژه در مدل‌های مختلط، تخمین می‌زند (Nardino et al., 2016; Olivoto et al., 2019 a, b). در این روش، نخست، اثرهای مدل ANOVA تخمین زده می‌شوند و سپس وزن‌هایی به این اثرها داده می‌شود. در عدس روش‌های مبتنی بر BLUP در ارزیابی کارایی ژنوتیپ‌ها و پیش‌بینی دقیق اجزای واریانس ژنوتیپی مؤثر بوده‌اند (Bermejo et al., 2020; Hossain et al., 2023).

در شکل ۴، رتبه‌بندی ژنوتیپ‌ها بر اساس شاخص پایداری چند صفتی انجام شده است که در آن، ژنوتیپ‌های ۴ و ۳ به‌عنوان ژنوتیپ‌های برگزیده، شناسایی شدند. دایره قرمز نقطه برش را نشان می‌دهد. ژنوتیپ‌های شماره ۳، ۴ و ۱۴ که به این دایره قرمز شکل ۴ نزدیک بودند، در تمام روش‌های ارزیابی بر اساس عملکرد و پایداری (GGE Biplot و WAASBY) جزو ژنوتیپ‌های پایدار بودند و در شکل ۵ در رتبه‌های ۲ و ۳ و در شکل ۶ جزء ژنوتیپ‌های پایدار و دارای عملکرد بالا شناسایی شدند. برای معرفی یک رقم جدید زراعی، علاوه بر عملکرد دانه، ویژگی‌های زیاد دیگری نیز در نظر گرفته می‌شوند که بیشتر آن‌ها با یکدیگر و با عملکرد دانه همبستگی بالایی دارند و انتخاب ژنوتیپ توسط MTSI با توجه به ارزش صفات در ژنوتیپ‌ها، یعنی صفاتی که نمود خوبی دارند، نیز مهم است (Olivoto et al., 2019 a).

جدول ۴- پارامترهای برآورد شده به روش درست‌نمایی محدود شده + REML

Table 4- Parameters estimated using the REML

پارامترهای ژنتیکی	عملکرد دانه	وزن صد دانه	ارتفاع بوته	روز تا رسیدگی	روز تا گلدهی
Genetic parameters	Grain yield	100 seed weight	plant height	days to maturity	days to flowering
واریانس ژنوتیپی	1239	0.0436	0.405	1.002	0.2775
Genotypic variance	(2.281)*	(4.911)	(0.43)	(2.286)	(2.187)

واریانس ژنوتیپ در محیط	2.281	0.396	5.20	4.196	1.511
genotype-by-environment variance	(43.19)	(44.6)	(45.54)	(9.569)	(11.91)
واریانس مقادیر باقیمانده	29622	0.4483	6.29	38.65	10.9
Variance of residual values	(54.53)	(50.49)	(54.03)	(88.14)	(85.9)
واریانس فنوتیپی	53325	0.8879	11.83	43.84	12.69
Phenotypic variance					
وراثت‌پذیری عمومی	0.02281	0.04911	0.0001	0.02286	0.02187
Broad heritability					
ضریب تشخیص اثرهای GEI	0.4319	0.446	0.4567	0.09569	0.1191
Detection coefficient of GEI effects					
وراثت‌پذیری میانگین ژنوتیپی	0.2065	0.3588	0.001	0.2912	0.2741
Average genotypic heritability					
دقت انتخاب ژنوتیپ	0.4544	0.599	0.0001	0.5397	0.5236
Genotype selection accuracy					
همبستگی بین مقادیر ژنوتیپی در میان محیط‌ها	0.4420	0.469	0.4567	0.09793	0.1218
Correlation between genotypic values among environments					
ضریب تغییرات ژنوتیپی	4.482	4.414	0.0001	0.6957	0.4978
Genotypic coefficient of variation (CVg)					
ضریب تغییرات مقادیر باقیمانده	21.92	14.15	7.606	4.32	3.12
Residual coefficient of variation (CVr)					
نرخ ضریب تغییرات ژنوتیپی بر ضریب تغییرات مقادیر باقیمانده	0.2045	0.3119	0.0001	11.16	0.1596
CVg/CVr ratio					
انحراف معیار	479.34	1.48	10.69	0.92	18.82
Standard deviation					
خطای استاندارد	26.19	0.08	0.58	0.05	1.03
Standard error					

* اعداد داخل پرانتز درصد واریانس می‌باشند.

* Numbers in parentheses are percentage variance.

ادامه جدول ۴

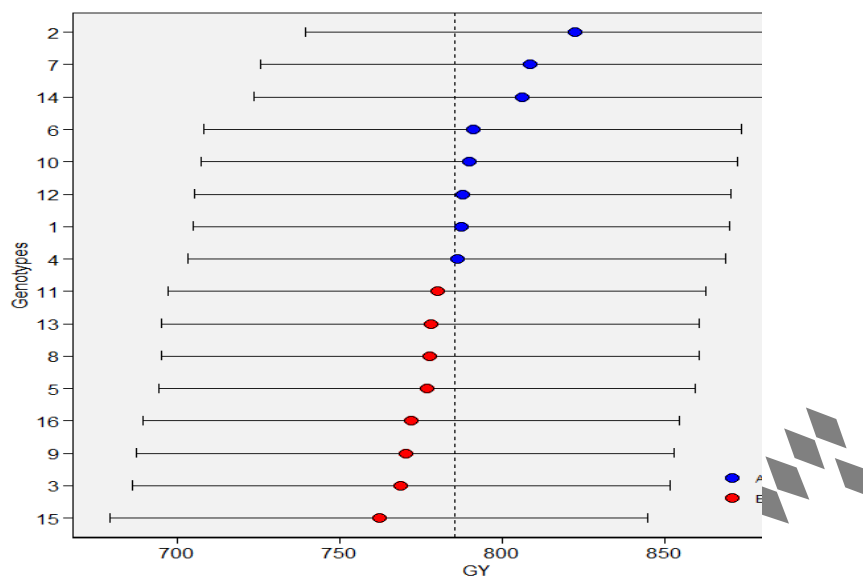
Table 4- Continued.

پارامترهای ژنتیکی	دوره پر شدن دانه	سرعت پر شدن دانه	سرعت تشکیل عملکرد دانه	بهره‌وری از بارش	وزن تک دانه
Genetic parameters	kernel filling period	kernel filling rate	seed yield formation rate	rain water productivity	weight of single seed
واریانس ژنوتیپی	0.00000001323	0.00345	0.0000000025	0.009595	40.36
Genotypic variance	(0.0000002647)*	(3.684)	(0.16)	(2.07)	(4.91)
واریانس ژنوتیپ در محیط	2.263	0.04529	1.281	0.177	39.6
genotype-by-environment variance	(4.527)	(48.37)	(43.30)	(38.17)	(44.6)
واریانس مقادیر باقیمانده	47.72	0.04489	1.654	0.2771	44.83
Variance of residual values	(95.47)	(47.94)	(56.3)	(59.76)	(50.49)
واریانس فنوتیپی	4.999	0.09364	2.935	0.4633	88.79
Phenotypic variance					
وراثت‌پذیری عمومی	0.0000002647	0.03684	0.000000000767	0.0207	0.0491
Broad heritability					
ضریب تشخیص اثرهای GEI	0.0452	0.4837	0.4364	0.3817	0.4934
Detection coefficient of GEI effects					
وراثت‌پذیری میانگین ژنوتیپی	0.00000005098	0.2861	0.000000008605	0.1996	0.6121
Average genotypic heritability					
دقت انتخاب ژنوتیپ	0.0000715	0.5349	0.00002933	0.4468	0.7821
Genotype selection accuracy					
همبستگی بین مقادیر ژنوتیپی در میان محیط‌ها	0.04527	0.5022	0.436	0.3898	0.7011
Correlation between genotypic values among environments					
ضریب تغییرات ژنوتیپی	0.0003020	4.391	0.000762	4.308	6.039
Genotypic coefficient of variation (CVg)					
ضریب تغییرات مقادیر باقیمانده	1.814	15.84	2.367	23.15	5.088
Residual coefficient of variation (CVr)					
نرخ ضریب تغییرات ژنوتیپی بر ضریب تغییرات مقادیر باقیمانده	0.00001665	0.2772	0.00001167	0.1861	1.187
CVg/CVr ratio					
انحراف معیار	17.6	0.45	3.14	1.11	14.79

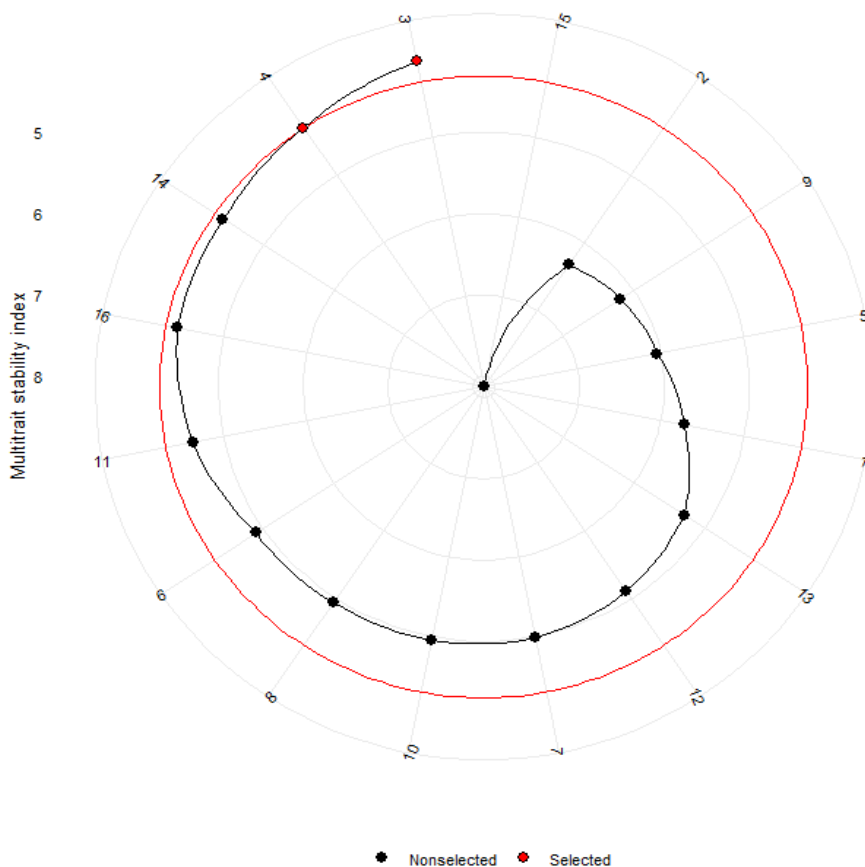
Standard deviation					
خطای استاندارد					
Standard error	0.96	0.02	3.14	0.06	0.81

* اعداد داخل پرانتز درصد واریانس می‌باشند.

* Numbers in parentheses are percentage of variance.

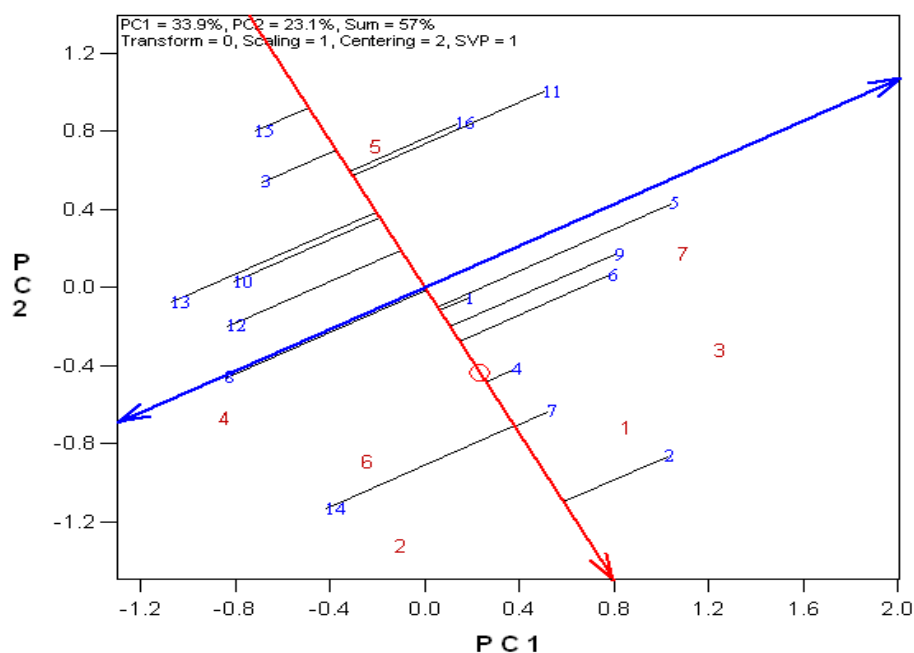


شکل ۳- عملکرد دانه پیش‌بینی شده ژنوتیپ‌های عدس بر پایه بهترین پیش‌بینی نااریب خطی (BLUP)
 Fig. 3- Predicted grain yield of lentil genotypes based on best linear unbiased prediction (BLUP)



شکل ۴- رتبه‌بندی ژنوتیپ‌ها و ژنوتیپ‌های انتخاب شده بر پایه شاخص پایداری چند صفتی (MTSI)

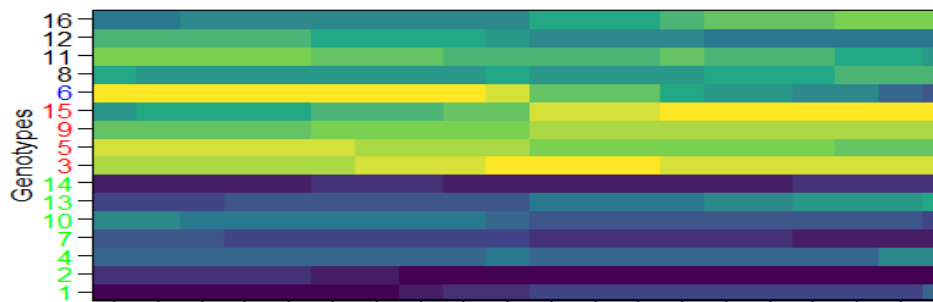
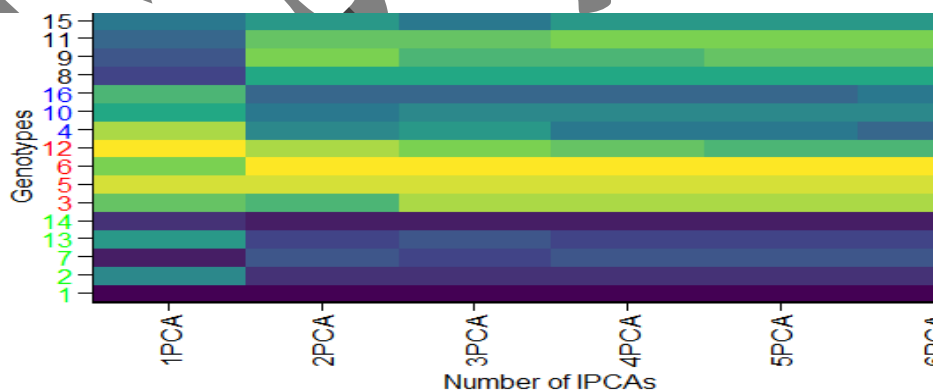
Fig. 4- Ranking of genotypes and selected genotypes based on the Multi-Trait Stability Index (MTSI)



The Average Tester Coordination for entry evaluation

شکل ۵- نمای قدرت تمایز و نمایندگی محیط‌ها یا مقیاس‌بندی مبتنی بر محیط. PC1 و PC2، به ترتیب مؤلفه اصلی اول و دوم هستند (شماره‌های قرمز و آبی رنگ به ترتیب نشانگر محیط‌ها و ژنوتیپ‌ها می‌باشند)

Fig. 5- View of the power of differentiation and representation of environments or scaling based on environment. PC1 and PC2 are the first and second principal components, respectively (Red and blue numbers indicate environments and genotypes, respectively)



شکل ۶- نقشه حرارتی، رتبه‌بندی ژنوتیپ‌ها بر اساس محورهای مؤلفه اصلی مورد استفاده برای تخمین شاخص WAASB و رتبه‌های ژنوتیپ‌های عدس با در نظر گرفتن وزن‌های مختلف برای پایداری و عملکرد دانه. اولین رتبه سمت چپ، صرفاً بر اساس پایداری به دست آمده است. آخرین رتبه سمت راست نیز با در نظر گرفتن عملکرد دانه به دست آمده است. بیان این دو انتها، رتبه‌ها از وزن‌های مختلف پایداری و عملکرد به

دست آمده است. چهار خوشه، چهار گروه ژنوتیپی را نشان می‌دهد: (۱) ژنوتیپ‌های ضعیف از نظر عملکرد و ناپایدار (اعداد با رنگ قرمز)، (۲): ژنوتیپ‌های پر محصول اما ناپایدار (اعداد با رنگ آبی)، (۳) ژنوتیپ‌های پایدار اما کم محصول (اعداد با رنگ سیاه) و (۴) ژنوتیپ‌های بسیار پر محصول و پایدار (اعداد با رنگ سبز)

Fig. 6- Heat map, ranking of genotypes based on the principal component axes used to estimate the WAASB index, and rankings of lentil genotypes considering different weights for stability and grain yield. The first rank on the left is based solely on sustainability. The last rank on the right is based on grain yield. Expressing these two extremes, the ranks are derived from different weights of sustainability and yield. (1) Low yielding and unstable genotypes (red numbers), (2) High yielding but unstable genotypes (blue numbers), (3) Stable but low yielding genotypes (black numbers), and (4) Very high yielding and stable genotypes (green numbers).

با استفاده از تجزیه عاملی اکتشافی، شناسایی تعداد فاکتور، ارتباط بین عوامل و چگونگی ارتباط متغیرها با این عوامل امکان‌پذیر است (Ullman, 2006). سرانجام، برآورد نمرات فاکتور نهایی امکان‌پذیر از چند هم‌خطی، یک مسئله سیستمیک در تجزیه‌های چندمتغیره را فراهم می‌آورد (Olivoto & Nardino, 2021). تجزیه عاملی بر اساس صفات اندازه‌گیری شده در ژنوتیپ‌های مورد مطالعه نشان داد که چهار مؤلفه اصلی در مدل باقی ماندند که واریانس تجمعی این چهار مؤلفه ۹۱/۸۵ درصد بود (جدول ۵). پس از چرخش واریماکس، میانگین میزان اشتراک (۰/۸۹) بود و به این معنی است که عوامل می‌توانند بخش بزرگی از واریانس هر متغیر را توضیح دهند. مقادیر WAASBY هر یک از ۱۰ صفت در چهار عامل یا فاکتور قرار گرفتند. صفات عملکرد دانه، ارتفاع بوته، سرعت پر شدن دانه و وزن تک دانه در عامل اول، صفات سرعت تشکیل عملکرد دانه و دوره پر شدن دانه در عامل دوم، صفت روز تا رسیدگی در عامل سوم، و صفات بهره‌وری از بارش و وزن صد دانه در عامل چهارم، به ترتیب بیشترین سهم را به خود اختصاص دادند (جدول ۵).

جدول ۵- مقادیر هر یک از صفات اندازه‌گیری شده در چهار عامل اول تحلیل عاملی

Table 5- The values of each of the measured traits in the first four factors of factor analysis

صفات Traits	عامل اول Factor 1	عامل دوم Factor 2	عامل سوم Factor 3	عامل چهارم Factor 4	میزان اشتراک Communalities
عملکرد دانه Grain yield	0.887	-0.00958	-0.346	-0.0421	0.908
روز تا رسیدگی days to maturity	-0.168	0.0903	0.960	0.146	0.979
سرعت تشکیل عملکرد دانه seed yield formation rate	0.076	-0.941	-0.0991	0.0784	0.907
بهره‌وری از بارش rain water productivity	-0.198	-0.292	0.293	0.853	0.938
ارتفاع بوته plant height	-0.592	-0.554	-0.346	0.142	0.798
دوره پر شدن دانه kernel filling period	0.367	-0.786	0.102	0.0705	0.768
وزن صد دانه 100 seed weight	-0.24	-0.325	0.661	-0.554	0.907
سرعت پر شدن دانه kernel filling rate	0.946	-0.199	-0.132	-0.0127	0.952
وزن تک دانه weight of single seed	0.884	-0.195	-0.168	-0.0741	0.853
روز تا گلدهی days to flowering	-0.168	0.0903	0.96	0.146	0.979
مقادیر ویژه Eigenvalues	660396	599796	160813	114164	
سهم از واریانس (%) % of variance	39.51	35.89	9.621	6.83	

واریانس تجمعی (%)	39.51	75.4	85.02	91.85
Cumulative variance (%)				

با توجه به میانگین کل صفات در جدول ۶، در بین ده صفت زراعی ارزیابی شده، مقادیر مشاهده شده ژنوتیپ‌های منتخب (Xs) برای صفات تعداد روز تا گلدهی، دوره پر شدن دانه، سرعت پر شدن دانه، بهره‌وری از بارش بالاتر از میانگین بود (X0). همچنین، حداقل و حداکثر دیفرانسیل انتخاب^۱ به ترتیب مربوط به صفات عملکرد دانه (۳۸/۱-) و دوره پر شدن دانه (۰/۴۵۵) بود که این می‌تواند روشنگری را برای اصلاح عدس به ارمغان بیاورد. دیفرانسل انتخاب آماره MGIDI برای صفات وزن تک دانه، سرعت پر شدن دانه، ارتفاع بوته، دوره پر شدن دانه، وزن صد دانه و تعداد روز تا رسیدگی مثبت بود. این موضوع بیانگر توانایی شاخص MGIDI در شناسایی ژنوتیپ‌های برتری است که می‌توانند بعنوان ژنوتیپ ایده‌آل برای اصلاح با صفات زراعی مطلوب استفاده شود. با توجه به شاخص WAASBY (جدول ۶)، دیفرانسیل انتخاب صفات بهره‌وری از بارش، تعدد روز تا رسیدگی، دوره پر شدن دانه، وزن صد دانه، روز تا گلدهی و وزن تک دانه مثبت مشاهده شد و اختلاف انتخاب از ۱۱/۴- تا ۲۴+ متغیر بود که نشان می‌دهد ژنوتیپ‌های انتخاب شده پایدار بودند.

شاخص فاصله ژنوتیپ - ایدئوتیپ چند صفتی (MGIDI) یک شاخص چندصفتی دیگر و مبتنی بر تجزیه عاملی است که بر اساس فاصله هر کدام از ژنوتیپ‌ها از ژنوتیپ ایده‌آل، برآورد می‌شود. در شکل ۷ کاربرد این شاخص در گزینش ژنوتیپ‌های برتر عدس نشان داده شده است. ژنوتیپ شماره ۲ در عامل اول (FA₁)، ژنوتیپ شماره ۲ در عامل دوم (FA₂)، ژنوتیپ شماره ۱۳ در عامل سوم (FA₃) و ژنوتیپ شماره ۱۴ در عامل چهارم (FA₄) که به لبه شکل نزدیک‌تر می‌باشند، دارای بالاترین ظرفیت تولید و پایداری می‌باشند (شکل ۷). سهم فاکتورها در MGIDI به دو عنوان شامل عوامل کمک‌کننده کمتر و بیشتر طبقه‌بندی شدند. عواملی که سهم بیشتری دارند، در نزدیکی مرکز ترسیم قرار دارند، در حالی که عوامل کمک‌کننده کمتر، به سمت لبه ترسیم قرار داشتند (Olivoto & Nardino, 2021). بر اساس این شکل کمترین سهم توجیه شده توسط یک عامل (نزدیک به لبه خارجی) نشان دهنده نزدیک بودن صفات درون آن عامل به حالت ایده‌آل پایدار است. خط چین نشان دهنده ارزش نظری است، در صورتی که همه عوامل به یک اندازه نقش داشته باشند. با توجه به این که هر ژنوتیپ برای عامل‌هایی که سهم کمتری در آن‌ها دارد از لحاظ صفات درون آن عامل به ژنوتیپ ایده‌آل نزدیک‌تر است، ژنوتیپ ایده‌آل با توجه به صفات قرار گرفته در هر عامل و اهدافی که برای بهبود آن صفت مد نظر است، تعریف می‌شود.

برای هر ژنوتیپ گزینش شده، سهم هر عامل در شاخص MGIDI از بیشترین عامل توجیه‌کننده (نزدیک به مرکز نمودار) تا کمترین عامل توجیه‌کننده (دور از مرکز نمودار) طبقه‌بندی شد. کوچکترین سهم توجیه شده توسط هر عامل که به لبه خارجی نزدیک‌تر است، بیانگر نزدیک بودن صفات در آن عامل به ژنوتیپ ایده‌آل است. محققان بر استفاده از شاخص MGIDI

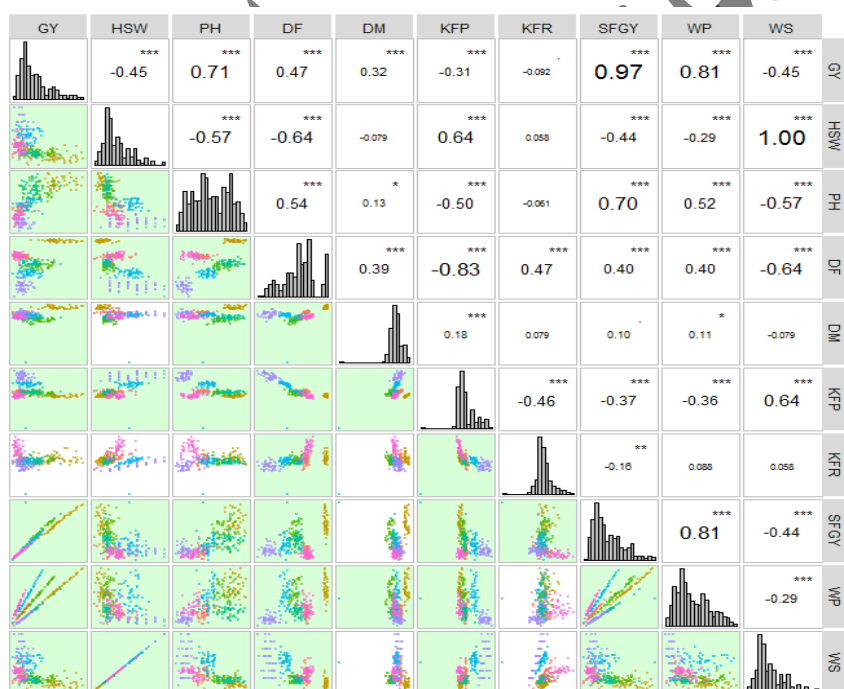
برای گزینش ژنوتیپ‌های برتر تاکید دارند، زیرا این شاخص، دقیق، آسان برای تفسیر، بدون ضرایب وزنی و مشکلات همراهی چندگانه و امکان شناسایی نقاط قوت و ضعف ژنوتیپ‌ها را فراهم می‌کند (Machado e Silva, 2023).



شکل ۷- رتبه‌بندی ژنوتیپ‌ها و ژنوتیپ‌های انتخاب شده بر پایه شاخص فاصله ژنوتیپ - ایدئوتیپ چند صفتی (MGIDI)
Fig. 7- Ranking of genotypes and selected genotypes based on the Multi Trait Genotype Ideotype Distance Index (MGIDI)

میانگین برخی از خصوصیات زراعی ژنوتیپ‌های مورد بررسی در جدول ۷ نشان داده شده است. از نظر روز گلدهی، ارقام و ژنوتیپ‌ها در محدوده ۱۰۴-۱۰۷ روز قرار داشتند، که کمترین آن مربوط به ژنوتیپ ۱۵ (شاهد گچساران) و بیشترین آن مربوط به ژنوتیپ‌های شماره ۱، ۲، ۸ و ۱۳ بود. از نظر روز تا رسیدگی نیز تفاوت هشت روز در محدوده ۱۴۵-۱۳۷ بین ارقام و ژنوتیپ‌ها مشاهده شد (جدول ۷). ژنوتیپ ۱۵ (شاهد گچساران) با کمترین زمان رسیدن (۱۳۷ روز)، زودرس‌ترین ژنوتیپ شناخته شد. تغییرات ارتفاع بوته ارقام و ژنوتیپ‌ها نیز در محدوده بین ۳۱ تا ۳۵ سانتی‌متر بود. کمترین ارتفاع بوته (۳۱/۱ سانتی‌متر) مربوط به ژنوتیپ G15 و بیشترین ارتفاع بوته (۳۵/۱ سانتی‌متر) مربوط به ژنوتیپ ۱۱ بود. وزن صد دانه ارقام و ژنوتیپ‌ها با میانگین ۴/۷۳ گرم بین ۳/۷۸ تا ۵/۱۷ گرم متغیر بود. بیشترین وزن صد دانه مربوط به ژنوتیپ‌های ۳ (۵/۱۷ گرم) و ۱۰ (۵/۱۲ گرم) بود. ژنوتیپ ۲ دارای بیشترین بهره‌وری از بارش (۲/۸۲ کیلوگرم بر میلی‌متر) بود و کمترین بهره‌وری از بارش (۱/۹۵ کیلوگرم بر میلی‌متر) مربوط به ژنوتیپ ۱۵ بود. بیشترین سرعت تشکیل عملکرد دانه (۶/۶۳ کیلوگرم در هکتار در روز) مربوط به ژنوتیپ ۱۰ بود.

در شکل ۸ نتایج حاصل از ضرایب همبستگی ساده میان صفات درج گردیده است. بیشترین میزان همبستگی مثبت و معنی‌دار با عملکرد دانه را صفات سرعت تشکیل عملکرد دانه (**/۹۷)، تعداد روز تا گلدهی (**/۴۷) و ارتفاع بوته (**/۷۱) نشان داده است. احتمالاً ژنوتیپ‌های با ارتفاع بوته بیشتر، حاوی تعداد غلاف بیشتر بوده است. اما همبستگی تعداد روز تا گلدهی با عملکرد دانه مثبت و معنی‌دار بود که احتمالاً این طول دوره رشد تأثیری بر عملکرد و اجزای آن داشته و باعث افزایش عملکرد گردیده است. در رابطه با صفت ارتفاع بوته، دیکسیت و دویی (Dixit & Dubey, 1985) به چنین نتیجه‌ای اشاره داشتند. همبستگی وزن صد دانه و صفات فنولوژیک مدت زمان کشت تا گلدهی با عملکرد منفی و معنی‌دار گردید. در نتیجه ژنوتیپ‌های عدسی که دیررس‌تر بودند، در گریز از شرایط تنش و محدودیت رطوبت خوب عمل نمودند و بر عملکرد آن‌ها تاثیر گذار بوده و کاهش نشان داده‌اند.



شکل ۸- تخمین‌های همبستگی خطی پیرسون برای صفات ارزیابی شده در ۱۶ ژنوتیپ عدس در هفت محیط مختلف
عملکرد دانه (GY)، وزن صد دانه (HSW)، ارتفاع بوته (PH)، روز تا گلدهی (DF)، روز تا رسیدگی (DM)، دوره پر شدن دانه (KFP)، سرعت پر شدن دانه (KFR)، بهره‌وری از بارش (WP)، سرعت تشکیل عملکرد دانه (SYFR) و وزن تک دانه (WS)

Fig. 8- Pearson's linear correlation estimates for characters evaluated in 16 lentil genotypes in seven different environments

Grain yield (GY), 100 seed weight (HSW), plant height (PH), days to flowering (DF), days to maturity (DM), kernel filling period (KFP), kernel filling rate (KFR), rain water productivity (WP), seed yield formation rate (SYFR), and weight of single seed (WS)

نتیجه‌گیری

به طور کلی نتایج نشان داد که برهمکنش ژنوتیپ در محیط بر عملکرد دانه، وزن صد دانه، ارتفاع بوته، روز تا گلدهی، روز تا رسیدگی، دوره پر شدن دانه، سرعت پر شدن دانه، سرعت تشکیل عملکرد دانه، بهره‌وری از بارش و وزن تک دانه معنی‌دار بود. بر

اساس نمودار گرمایی، ژنوتیپ‌های ۲ و ۱۲ را می‌توان پایدار در نظر گرفت. بر اساس شاخص گزینش چند صفتی (MTSI)، ژنوتیپ‌های ۳ و ۴ به‌عنوان ژنوتیپ‌های برتر انتخاب شدند. ژنوتیپ شماره ۲ (X02011S-163-15) عملکرد دانه (۹۶۴ کیلوگرم در هکتار) بیشتر از میانگین کل ژنوتیپ‌ها را به خود اختصاص داد و از لحاظ وزن صد دانه (۳۶/۸ گرم) و ارتفاع بوته (۴۷ سانتی‌متر) جزء ارقام برتر بود و نسبت به شاهد‌های گچساران و سپهر به ترتیب ۱۸ و ۱۰ درصد برتری نشان داد. لذا با توجه به وجود لینکاژ منفی بین عملکرد دانه با دانه درشتی در گیاه عدس در صورتی که فقط افزایش عملکرد ملاک باشد ژنوتیپ شماره ۱۲ (FLIP07-125C) مناسب می‌باشد، اما اگر وزن صد دانه و ارتفاع بوته برای بازارپسندی و برداشت مکانیزه عدس مورد توجه باشد، انتخاب ژنوتیپ شماره ۱۰ می‌تواند مناسب باشد. ژنوتیپ شماره ۲ با عملکرد دانه (۹۶۹ کیلوگرم در هکتار)، ارتفاع بوته (۴۶/۶ سانتی‌متر)، سرعت تشکیل عملکرد دانه (۶/۶۳ کیلوگرم در هکتار در روز) و بهره‌وری از بارش (۲/۸۲ کیلوگرم بر میلی‌متر) بیشتر از میانگین کل صفات در ژنوتیپ‌ها و شاهد‌ها در این پژوهش، برتر بود.

سپاسگزاری

این مقاله مستخرج از پروژه تحقیقاتی با عنوان بررسی سازگاری و پایداری عملکرد دانه ژنوتیپ‌های عدس به صورت کشت پائیزه در مناطق نیمه‌گرمسیر دیم با شماره مصوب ۰۰۱۰۵۵-۰۱۸-۱۵-۵۹-۰۰ می‌باشد که بدین‌وسیله از سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی تشکر و قدردانی می‌گردد.

جدول ۶- دیفرانسیل انتخاب شاخص WAASBY برای صفات مورد مطالعه در ژنوتیپ‌های عدس

Table 6- Differential selection of WAASBY index for studied traits in lentil genotypes

انتخاب بر اساس شاخص WAASB Selection based on WAASB index						انتخاب بر اساس میانگین کل صفات Selection based on the average of all traits					صفات Traits
هدف Aim	وراثت پذیری Heredity	درصد دیفرانسیل انتخاب Selection differential percentage (SD%)	دیفرانسیل انتخاب Selection differential (SD)	میانگین ژنوتیپ‌های انتخابی Average of selected genotypes (Xs)	میانگین کل Total average (X0)	درصد دیفرانسیل انتخاب Selection differential percentage (SD%)	دیفرانسیل انتخاب Selection differential (SD)	میانگین ژنوتیپ‌های انتخابی Average of selected genotypes (Xs)	میانگین کل Total average (X0)	عامل Factor	
افزایش Increase	0.206	-26.6	-11.4	31.3	42.7	-4.85	-38.1	747	785	1	عملکرد دانه Grain yield
کاهش Decrease	2.91	11.4	6.03	59.2	53.1	-0.0207	-0.0298	144	144	1	روز تا رسیدگی days to maturity
افزایش Increase	0.0000000086	-24.3	-8.87	27.6	36.5	-5.79	-0.314	5.12	5.43	1	سرعت تشکیل عملکرد دانه seed yield formation rate
افزایش Increase	0.2	-24.3	-9.55	29.8	39.3	-6.23	-0.144	2.13	2.27	1	بهره‌وری از بارش rain water productivity
افزایش Increase	0	36.0	20.9	78.7	87.9	1.28	0.426	۳۳/۸	33.3	2	ارتفاع بوته plant height
افزایش Increase	0.0000000051	11.2	8.4	83.4	75.0	1.2	0.455	38.5	38.1	2	دوره پرشدن دانه kernel filling period
افزایش Increase	0.359	6.05	4.01	70.3	66.3	0.871	0.0412	4.77	4.73	3	وزن صد دانه 100 seed weight
افزایش Increase	0.286	-4.81	-2.44	48.2	50.6	1.88	0.0125	1.36	1.34	3	سرعت پر شدن دانه kernel filling rate
افزایش Increase	0.359	6.05	4.01	70.3	66.3	0.871	0.422	47.7	47.3	3	وزن تک دانه weight of single seed
کاهش Decrease	0.274	47	24	75.0	51.0	-0.458	-0.485	105	106	4	روز تا گلدهی days to flowering

جدول ۷- میانگین خصوصیات زراعی ژنوتیپ‌های مورد بررسی در محیط‌های مورد آزمایش

Table 6- Differential selection of WAASBY index for studied traits in lentil genotypes

عملکرد نسبت به میانگین کل Yield compared to the total average (%)	عملکرد نسبت به شاهد سپهر Yield compared to the Sepehr control (%)	عملکرد نسبت به شاهد گچساران Yield compared to the Gachsaran control (%)	روز تا گلدهی days to flowering	وزن تک دانه weight of single seed (mg)	سرعت پر شدن دانه kernel filling rate (mg.seed ⁻¹ .day ⁻¹)	وزن صد دانه 100 seed weight (g)	دوره پر شدن دانه kernel filling period (day)	ارتفاع بوته plant height (cm)	بهره وری از بارش rain water productivity (Kg.mm ⁻¹)	سرعت تشکیل عملکرد دانه seed yield formation rate (Kg.ha ⁻¹ .day ⁻¹)	روز تا رسیدگی days to maturity	عملکرد دانه Grain yield (Kg.ha ⁻¹)	ژنوتیپ Genotype
101	110	118	107	46.7	1.35	4.67	38	33.0	2.29	5.41	145	796	G1
123	134	143	107	37.8	1.16	3.77	37	32.8	2.82	6.63	144	964	G2
90	98	105	105	51.7	1.51	5.17	39	33.8	2.04	4.84	144	705	G3
100	109	117	105	43.7	1.22	4.37	39	33.8	2.22	5.39	144	789	G4
95	103	111	105	48.4	1.27	4.83	39	34.0	2.26	5.16	144	744	G5
104	113	121	105	46.2	1.21	4.62	40	32.7	2.43	5.59	145	813	G6
114	125	133	105	43.1	1.19	4.31	39	33.1	2.60	6.18	144	898	G7
95	104	111	107	48.0	1.41	4.80	37	33.8	2.08	5.12	144	749	G8
91	99	106	106	47.9	1.31	4.79	39	32.3	2.11	4.89	145	713	G9
103	112	120	106	51.2	1.50	5.12	38	34.6	2.30	5.50	144	807	G10
97	105	113	105	50.6	1.46	5.06	38	35.1	2.34	5.31	143	760	G11
102	111	119	106	48.8	1.33	4.88	39	33.4	2.25	5.38	145	798	G12
95	104	111	107	48.8	1.42	4.88	37	32.6	2.09	5.18	144	750	G13
113	123	132	106	46.2	1.33	4.62	39	34.2	2.41	6.05	145	887	G14
86	93	100	104	48.6	1.31	4.86	33	31.1	1.95	5.26	137	673	G15
92	100	107	106	49.3	1.42	4.93	38	33.2	2.18	5.03	144	721	G16

پیش از دانش