

DOR: 20.1001.1.23223243.2021.19.1.29.0

ارزیابی برهمکنش ژنوتیپ و محیط بر عملکرد دانه و پایداری عملکرد لاین‌های امیدبخش جو  
(*Hordeum vulgare* L.) با استفاده از مدل AMMI و آماره‌های پایداری

Evaluation of genotype  $\times$  environment interaction on grain yield and yield  
stability of barley (*Hordeum vulgare* L.) promising lines using AMMI model and  
stability statistics

سلیم رحمتی<sup>۱</sup>، رضا عزیزی‌نژاد<sup>۲</sup>، علیرضا پورابوقداره<sup>۳</sup>، علیرضا اطمینان<sup>۴</sup> و لیا شوشتری<sup>۵</sup>

چکیده

رحمتی، س.، ر. عزیزی‌نژاد، ع. ر. پورابوقداره، ع. ر. اطمینان و ل. شوشتری. ۱۴۰۲. ارزیابی برهمکنش ژنوتیپ و محیط بر عملکرد دانه و پایداری عملکرد لاین‌های امیدبخش جو (*Hordeum vulgare* L.) با استفاده از مدل AMMI و آماره‌های پایداری. نشریه علوم زراعی ایران. ۲۵ (۳): ۳۴۱-۳۲۵.

آزمایش‌های چندمحیطی و تجزیه برهمکنش ژنوتیپ و محیط نقش مهمی در برنامه‌های به‌نژادی مرتبط با معرفی ارقام پرمحصول و پایدار مناسب کشت در مناطق مختلف دارند. در این تحقیق، ۱۸ لاین امیدبخش جو همراه با دو رقم اکسین و گلچین (شاهد) در پنج ایستگاه تحقیقاتی اهواز، داراب، زابل، گنبد کاووس و مغان به مدت دو سال زراعی (۱۴۰۰-۰۱ و ۱۴۰۱-۰۲) مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج تجزیه واریانس داده‌ها با استفاده از مدل اثرات اصلی افزایشی و اثر متقابل ضرب‌پذیر (AMMI) نشان داد که اثر محیط، ژنوتیپ و برهمکنش بین آن‌ها بر عملکرد دانه لاین‌های امید بخش جو معنی‌دار بود. بیشترین سهم تغییرات عملکرد دانه توسط اثر محیط و برهمکنش ژنوتیپ و محیط توجیه شد. سه مؤلفه نخست ۶۸/۹ درصد از کل تغییرات برهمکنش ژنوتیپ و محیط را توجیه کردند. نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که لاین‌های امیدبخش شماره ۱۴، ۳، ۱۰ و ۱۷ به ترتیب با ۴۹۶۰، ۴۹۲۰، ۴۷۵۰ و ۴۶۷۰ کیلوگرم در هکتار، دارای عملکرد دانه بالاتری نسبت به ارقام شاهد و سایر لاین‌های امیدبخش بودند. بر اساس آماره‌های پایداری مبتنی بر مدل AMMI، لاین ۱۷ بر اساس آماره‌های مبتنی بر مدل پیش‌بینی‌های خطی نااریب (BLUP)، لاین‌های ۱، ۳، ۱۰، ۱۴ و ۱۷ به ترتیب بیشترین پایداری عملکرد دانه را داشتند. با توجه به بای‌پلات دوطرفه عملکرد دانه و شاخص میانگین وزنی نمرات مطلق (WAASB)، لاین‌های جو مورد بررسی در چهار ربع گروه‌بندی شده و لاین‌های ۳، ۱۰ و ۱۷ در گروه لاین‌های با پایداری عملکرد دانه بالا قرار گرفتند. نتایج این پژوهش نشان داد که لاین‌های امیدبخش ۴ و ۱۴ دارای سازگاری خصوصی به مناطق شمالی (مغان و گنبد کاووس) و لاین‌های امیدبخش ۳ و ۱۰ دارای سازگار خصوصی به مناطق جنوبی (زابل، اهواز و داراب) در اقلیم گرم بودند. پژوهش‌های تکمیلی روی این لاین‌های امید بخش برای انتخاب و معرفی برخی از آنها به عنوان ارقام جدید و یا استفاده از آنها در برنامه‌های ملی به نژادی جو، پیشنهاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: آزمایش‌های چند محیطی، پایداری عملکرد، سازگاری خصوصی، جو و تجزیه به مؤلفه‌های اصلی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۲۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۱۹ این مقاله مستخرج از پروژه تحقیقاتی شماره ۱۴۰-۰۰۱۳۱۳-۱۶۱-۰۰۱۲۴۰ مصوب موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر می‌باشد

۱- دانشجوی دکتری گروه بیوتکنولوژی و به‌نژادی گیاهی، واحد علوم تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲- استادیار گروه بیوتکنولوژی و به‌نژادی گیاهی، واحد علوم تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۳- استادیار موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران (مکاتبه کننده)

(پست الکترونیک: a.poraboghadaresh@gmail.com)

۴- دانشیار گروه بیوتکنولوژی و به‌نژادی گیاهی، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران

۵- استادیار گروه بیوتکنولوژی و به‌نژادی گیاهی، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران

## Evaluation of genotype × environment interaction on grain yield and yield stability of barley (*Hordeum vulgare* L.) promising lines using AMMI model and stability statistics

Rahmati, S.<sup>1</sup>, Azizinezhad, R.<sup>2</sup>, Pour-Aboughadareh, A.R.<sup>3</sup>, Etminan, A.R.<sup>4</sup> and Shooshtari, L.<sup>5</sup>

### ABSTRACT

Rahmati, S., Azizinezhad, R., Pour-Aboughadareh, A.R., Etminan, A.R. and Shooshtari, L. 2024. Evaluation of genotype × environment interaction on grain yield and yield stability of barley (*Hordeum vulgare* L.) promising lines using AMMI model and stability statistic. *Iranian Journal of Crop Sciences*. 25(3): 325-341. (In Persian).

**Introduction:** Multi-environmental trials (METs) and analysis of genotype-by-environment (GE) interaction have a critical role in breeding programs related to the release of high-yielding cultivars with high yield stability for cultivation across different environments. Different statistical and graphical methods have been proposed to evaluate the GE interaction effects. In the present study, the effect of GE interaction on grain yield in set of new promising lines of barley was evaluated using the additive main effect and multiplicative interaction (AMMI) model.

**Materials and methods:** A set of promising lines of barley including 18 new advanced lines along with two commercial cultivars (cv. Golchin and cv. Oxin) as reference checks were evaluated in the multi-environment trials. Experiments were carried out in five geographical regions in the warm agro-climatic of Iran which included Ahvaz (E1 and E2), Darab (E3 and E4), Gonbad (E5 and E6), Zabol (E7 and E8), and Moghan (E9 and E10) for two consecutive cropping seasons (2021-2022 and 2022-2023). The AMMI model and some stability and adaptability statistics were used to evaluate the effect of GE interaction on grain yield and identify the high yielding with yield stability promising lines.

**Results:** The results indicated that grain yield was significantly affected by environments (E), genotypes (G), and their interaction (GEI). Environments and GE interaction effect explained the highest portion of observed variation of grain yield. Moreover, the GEI effect was further divided into three principal components (IPCA) and accounted for 68.99 of the total GE interaction variation. Mean comparison showed that promising lines 14, 3, 10, and 17 had higher grain yield (4960, 4920, 4750, and 4670 kg.ha<sup>-1</sup>, respectively) when compared to the other promising lines and check cultivars. According to the AMMI-based stability statistics, promising lines 17 had the highest yield stability. Moreover, this genotype along with promising lines 1, 3, 10, and 14 were selected as superior promising lines based on the BLUP-based stability and adaptability statistics. Principle components analysis based on biplot rendered using the WAASB index and grain yield clustered all studied promising lines and experimental environments into four quadrants. Accordingly, promising lines 3, 10, and 17 were placed into the highest yield stability group.

**Conclusion:** The results of this research revealed that promising lines 4 and 14 had specific adaptability to the northern regions (Moghan and Gonbad), and promising lines 3 and 10 showed specific adaptability to the southern regions (Ahvaz, Darab, and Zabol). Therefore, further evaluation of these promising lines, for selection and releasing some of them as new commercial cultivars as well as using them as parents in the national barley breeding programs, is required.

**Key words:** Barley, Multi-environmental trials, Principal component analysis and Specific adaptability

Received: January, 2024 Accepted: March, 2024

1. PhD Student, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

2. Assistant Prof., Department of Biotechnology and Plant Breeding, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

3. Assistant Prof., Seed and Plant Improvement Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Karaj, Iran (Corresponding author) (Email: a.poraboghadaresh@gmail.com)

4. Associate Prof., Department of Plant Breeding and Biotechnology, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran

5. Associate Prof., Department of Plant Breeding and Biotechnology, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran

## مقدمه

جو (*Hordeum vulgare* L.) یکی از گیاهان زراعی مهم خانواده غلات است که دامنه سازگاری وسیعی به انواع شرایط محیطی و تنش‌های غیرزنده، به ویژه خشکی، شوری و سرما دارد (Vaezi et al., 2019). جو نقش مهمی در تأمین انرژی و پروتئین مورد نیاز انسان و دام دارد در ایران مصرف عمده جو برای تغذیه دام بوده و تنها مقدار کمی از تولید دانه برای تولید مالت مورد استفاده قرار می‌گیرد (Ghazvini et al., 2022). براساس گزارش فائو، جو پس از گندم، برنج و ذرت با تولید جهانی ۱۵۴ میلیون تن و سطح زیر کشت نزدیک به ۵۰ میلیون هکتار، رتبه چهارم را در سال میلادی ۲۰۲۲ به خود اختصاص داده است. در ایران جو با تولید سه میلیون تن و سطح زیر کشت حدود یک میلیون و ۷۰۰ هزار هکتار پس از گندم در رتبه دوم قرار دارد (FAO, 2023). با توجه به دامنه سازگاری وسیع و امکان افزایش سطح زیر کشت جو در مناطق مختلف ایران، لازم است تنوع ارقام زراعی برای افزایش تولید آن در اقلیم‌های مختلف مورد توجه قرار داده شود.

عملکرد دانه به عنوان یک صفت مهم کمی زراعی و اقتصادی، همواره تحت تأثیر عوامل ژنوتیپی (G)، محیطی (E) و برهمکنش ژنوتیپ و محیط (GE) می‌باشد و برهمکنش ژنوتیپ و محیط بسیار مهم است (Yan and Kang, 2003). برهمکنش ژنوتیپ و محیط جهت شناسایی و معرفی ژنوتیپ‌های پرمحصول سازگار و پایدار دارای اهمیت ویژه‌ای است. از این‌رو ارزیابی برهمکنش ژنوتیپ و محیط علاوه بر داده‌های آزمایشی مناسب، نیاز به روش‌ها و مدل‌های آماری مناسبی دارد. در این رابطه آزمایش‌های چند محیطی (Multi-environment trials; MET) نقش مهمی در فراهم آوردن داده‌های آزمایشی مورد نیاز برای تجزیه برهمکنش ژنوتیپ و محیط و شناسایی ارقام پرمحصول و سازگار به مناطق هدف دارند (Pour-Aboughadareh et al., 2019).

مدل‌های آماری دیگری برای تجزیه برهمکنش ژنوتیپ و محیط معرفی شده‌اند. این روش‌ها به دو گروه اصلی تک متغیره و چندمتغیره دسته‌بندی می‌شوند. مدل اثرات اصلی افزایشی و اثرمتقابل ضرب‌پذیر (AMMI) (Additive Main Effects and Multiplicative Interaction) به‌عنوان یک مدل چندمتغیره مهم، ترکیبی از تجزیه واریانس تک متغیره و تجزیه به مؤلفه‌های اصلی است. اثرات افزایشی یا جمع‌پذیر از طریق تجزیه واریانس و اثرات ضرب‌پذیر از طریق تجزیه به مؤلفه‌های اصلی قابل برآورد هستند (Gauch, 1992). مدل AMMI به‌دلیل توانایی در تفکیک اثرات اصلی و متقابل و توجیه بخش عمده‌ای از مجموع مربعات برهمکنش ژنوتیپ و محیط، استفاده گسترده‌ای دارد (Gauch and Zobel, 1997). در روش AMMI با استفاده از نمره مؤلفه‌های اصلی می‌توان شاخص‌های آماری مانند Average of the EV (Zobel, 1994) squared eigenvector value (ASV)، AMMI stability value (Purchase et al., 2000) FA، (Raju, 2002) (Fitted AMMI model) ASTAB، (Rao and (AMMI-based stability parameter) (AMMI stability index) ASI، Prabhakaran, 2005) (Jambhulkar et al., 2017) را محاسبه کرد. نمایش گرافیکی ژنوتیپ‌های پایدار و بررسی روابط بین محیط‌ها در قالب بای‌پلات‌های AMMI-1 و AMMI-2 از دیگر مزایای استفاده از روش AMMI محسوب می‌شوند (Gauch and Zobel, 1997).

از مدل AMMI برای تجزیه برهمکنش ژنوتیپ و محیط و ارزیابی پایداری ژنوتیپ‌های انواع گیاهان زراعی استفاده شده است. نجفی‌میرک و همکاران (Najafi-Mirak et al., 2019) در ارزیابی پایداری مجموعه‌ای از ژنوتیپ‌های گندم دوروم از روش AMMI استفاده کرده و گزارش دادند که دو مؤلفه نخست ۸۷/۱۴ درصد از کل تغییرات مربوط به برهمکنش ژنوتیپ و محیط را توجیه کردند. آن‌ها با

استفاده از بای پلات AMMI-2 ژنوتیپ‌های سازگار با هر یک از مناطق هدف مورد مطالعه را شناسایی کردند. خزایی و همکاران (Khazaei *et al.*, 2019) نیز با استفاده از این مدل، پایداری لاین‌های دو منظوره سورگوم دانه‌ای و علوفه‌ای را مورد بررسی قرار دادند و با استفاده از بای پلات AMMI-1 و شاخص ASV، دو لاین پرمحصول و پایدار را شناسایی کردند. پورابوقداره و همکاران (Pour-Aboughadareh *et al.*, 2023a) جهت ارزیابی پایداری ژنوتیپ‌های امیدبخش جو برای کشت در مناطق سردسیر ایران از تجزیه AMMI استفاده و با استفاده از بای پلات‌های AMMI-1 و AMMI-2 ژنوتیپ‌های برتر از نظر عملکرد دانه و پایداری آن‌ها برای هر یک از مناطق هدف را شناسایی کردند. نیکخواه و همکاران (Nikkhah *et al.*, 2007) در جو، مؤمنی و همکاران (Moumeni *et al.*, 2019) در برنج، حمایتی و همکاران (Hemayati *et al.*, 2023) در چغندر قند و پورابوقداره و همکاران (Pour-Aboughadareh *et al.*, 2022, 2023b) نیز در آزمایش‌های خود از مدل AMMI برای ارزیابی برهمکنش ژنوتیپ و محیط بر عملکرد محصول استفاده کرده و سودمندی بالای این مدل را گزارش کردند. علی‌رغم مزایای مدل AMMI و استفاده گسترده از آن، این مدل در تشریح ساختار مدل خطی اثر مختلط (Linear mixed effect model; LMM) کارایی ندارد. برای برطرف کردن این مشکل، استفاده از مدل بهترین پیش‌بینی‌های خطی نااریب (Best linear unbiased predictors; BLUP) پیشنهاد شده است (Olivoto *et al.*, 2019). این روش در صورت وجود اثرات LMM، پتانسیل بالایی در پیش‌بینی دقیق‌تر اثرات تصادفی دارد. بر این اساس، رزنده و دتور (Resende and de Duarte, 2007) سه آماره میانگین هارمونیک ارزش‌های ژنوتیپی (Harmonic mean of genotypic value; HMGV)، کارایی نسبی ارزش‌های ژنوتیپی (Relative

performance of genotypic value; RPGV) هارمونیک کارایی ارزش‌های ژنوتیپی (Harmonic mean of relative performance of genotypic values; HRPGV) را برای ارزیابی پایداری، سازگاری و بررسی توأم پایداری و سازگاری ارائه نمودند. کارایی استفاده از این آماره‌ها در تعیین سازگاری و پایداری ژنوتیپ‌های گیاهان زراعی توسط سایر محققان نیز گزارش شده است (Resende and de Duarte, 2007; Borges *et al.*, 2010; Pour-Aboughadareh *et al.*, 2023c; Zali *et al.*, 2023) اولیوتو و همکاران (Olivoto *et al.*, 2019) با ادغام ویژگی‌های مدل AMMI و BLUP اقدام به معرفی یک معیار پایداری ژنوتیپی بر مبنای میانگین وزنی نمرات مطلق (Weighted average of absolute scores; WAASB) کردند. این معیار حاصل تلفیق دو روش AMMI و BLUP می‌باشد و قادر به وزن‌دهی عملکرد دانه و پایداری آن است. بیش از ۱۰۰ هزار هکتار از اراضی زیر کشت جو در کشور در اقلیم گرم واقع شده و بیشتر مناطق هدف برای زراعت جو در استان‌های خوزستان، سیستان و بلوچستان، بوشهر، قسمت‌هایی از استان‌های کرمان، شیراز و ایلام در نواحی جنوبی و قسمت‌هایی از استان‌های گلستان، مازندران و دشت مغان در نواحی گرم و مرطوب شمال کشور قرار دارند (Ghazvivni *et al.*, 2019). با توجه به سطح زیر کشت بالای جو در مناطق گرمسیری و با در نظر گرفتن تغییرات اقلیمی گسترده در این مناطق، لازم است توسعه ارقام جدید پرمحصول و پایدار در برنامه‌های اصلاحی جو مورد توجه قرار داده شود. این تحقیق با هدف ارزیابی عملکرد دانه و پایداری آن در مجموعه‌ای از ژنوتیپ‌های امیدبخش جو حاصل از برنامه‌های به‌نژادی جو آبی کشور اجرا شد تا با استفاده از نتایج آن، ژنوتیپ‌های برتر جهت معرفی به عنوان رقم تجاری و یا استفاده در برنامه‌های دورگ‌گیری شناسایی شوند.

## مواد و روش‌ها

مواد گیاهی مورد استفاده در این تحقیق شامل ۱۸ لاین امیدبخش جو همراه با دو رقم تجاری اکسین و گلچین (شاهد) بودند (جدول ۱). ژنوتیپ‌های مورد ارزیابی انتخاب شده از برنامه‌های دورگ‌گیری داخلی

و ارزیابی‌های مربوط به برنامه‌های به‌نژادی جو آبی کشور بودند. ارقام جو اکسین و گلچین نیز دامنه سازگاری بالایی به شرایط اقلیمی گرم کشور دارند و در نواحی مختلف به عنوان ارقام تجاری پر محصول و سازگار مورد استفاده قرار می‌گیرند.

جدول ۱- شجره لاین‌های امیدبخش جو مورد ارزیابی

Table 1. Pedigree of evaluated barley promising lines

| ژنوتیپ‌های جو<br>Barley genotypes | شجره<br>Pedigree                                                                                    |
|-----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| G1                                | Oxin [Check 1]                                                                                      |
| G2                                | Golchin [Check 2]                                                                                   |
| G3                                | Rojo/3/LB.Iran/Una8271//Gloria'S"/Com'S"/4/ Briges                                                  |
| G4                                | Rojo/3/LB.Iran/Una8271//Gloria'S"/Com'S"/4/Rihane-03                                                |
| G5                                | Zarjau/80-5151//OK84817ICBH94-0402-0AP-0AP-17AP-0AP-12AP-11AP-0AP-0TR-0TR-0AREC                     |
| G6                                | Zarjau/80-5151//OK84817ICBH94-0402-0AP-0AP-17AP-0AP-12AP-16AP-0AP-0TR-0TR-0AREC                     |
| G7                                | Lignee 527/Nk1272//JLB 70-63/3/Rhn-03//Lignee527/As45                                               |
| G8                                | Karoon/Kavir//Rhodes'S"/Tb/Chzo/3/Gloria'S' /4/Sahra/5/Yousef                                       |
| G9                                | Anoidium/Arbayan-01/3/Lignee527/Nk1272//JLB70-63/4/ Beecher                                         |
| G10                               | Anoidium/Arbayan-01/3/Lignee527/Nk1272//JLB70-63/4/Bgs/Dujia//L.1242                                |
| G11                               | Bgs/Dajia//L.1242/3/(L.B.Iran/Una8271//Gloria'S'/3/Alm/Una80//....)/4/Nosrat/5/Rhn-03//L.527/Nk1272 |
| G12                               | ciru/Tocte                                                                                          |
| G13                               | Courlis/Rhn-03//Jonoob                                                                              |
| G14                               | Zahak/4/Bgs/Dajia//L.1242/3/L.B.IRAN/Una8271//Gloria'S'/3/Alm/Una80//....)/4/Rojo...                |
| G15                               | Rojo/3/LB.Iran/Una8271//Gloria'S"/Com'S"/4/Gloria'S'/Copal'S'/As46/Aths/3/Rhn-03                    |
| G16                               | Rojo/3/LB.Iran/Una8271//Gloria'S"/Com'S"/4/Anoidium/Arbayan-01/3/Lignee527/...                      |
| G17                               | Merzaga(Orge077)/Alanda-01 ICB98-0908-0AP-13AP-0AP-3TR-10AP-0AP-0TR-0TR                             |
| G18                               | Penco/Chevron-Bar/6/P.STO/3/LB.Iran/UNA80//Ligne640/4/BLLU/5/Petunia 1                              |
| G19                               | (Salt-4) LB.Iran/Una 8271//Gloria'S"/Come's"-11M/3/Kavir/4/Karoon                                   |
| G20                               | W-98-10                                                                                             |

آزمایش‌های چندمحیطی به مدت دو سال زراعی (۱۴۰۰-۰۱ و ۱۴۰۱-۰۲) در پنج ایستگاه تحقیقاتی در اهواز، داراب، زابل، گنبد کاووس و مغان اجرا شدند (جدول ۲). اطلاعات هواشناسی ایستگاه‌های تحقیقاتی در جدول ۳ ارائه شده است. آزمایش‌ها در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شدند. در کلیه محیط‌ها زمین محل اجرای آزمایش در سال قبل آیش بود. عملیات تهیه زمین مطابق دستورالعمل کارشناسی هر ایستگاه انجام شد. قبل از کاشت، نیتروژن (از منبع کود اوره)، فسفر (از منبع کود سوپرفسفات ترپیل) و پتاس (از منبع کود سولفات پتاس) به میزان ۱۵، ۵۰ و ۲۵ کیلوگرم در هکتار به خاک داده شدند. هر

کرت آزمایشی شامل شش ردیف کاشت پنج متری بوده و فاصله بین ردیف‌ها ۲۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. کاشت بذر بسته به شرایط هر محیط در آذر ماه با استفاده از دستگاه بذرکار (Wintersteiger, Ried, Austria) و با تراکم ۳۵۰ بذر در مترمربع انجام شد. برای کنترل علف‌های هرز از علف‌کش‌های پوماسوپر و گرانستار استفاده شد. در مرحله ساقه‌دهی ۲۰ کیلوگرم نیتروژن (از منبع کود اوره) به خاک داده شد. در مرحله رسیدگی فیزیولوژیک دانه‌ها، محصول کلیه کرت‌های آزمایشی پس از حذف حاشیه‌ها با استفاده از کمباین ویژه آزمایش‌ها (Wintersteiger, Ried, Austria) برداشت و مقدار عملکرد دانه بر مبنای کیلوگرم در هکتار ثبت شد.

جدول ۲- اطلاعات جغرافیایی محیط‌های آزمایشی

Table 2. Geographical information of the experimental environments

| کد | Location | مکان  | Year      | سال     | Coordinates                 | Geographical location | موقعیت جغرافیایی | Climate condition | شرایط اقلیمی |
|----|----------|-------|-----------|---------|-----------------------------|-----------------------|------------------|-------------------|--------------|
| 1  | Ahvaz    | اهواز | 2021-2022 | ۱۴۰۰-۰۱ | 31° 19' 13" N 48° 40' 09" E | South                 | جنوب             | Warm and dry      | گرم و خشک    |
| 2  |          |       | 2022-2023 | ۱۴۰۱-۰۲ |                             |                       |                  |                   |              |
| 3  | Darab    | داراب | 2021-2022 | ۱۴۰۰-۰۱ | 28° 45' 07" N 54° 32' 40" E | South                 | جنوب             | Warm and dry      | گرم و خشک    |
| 4  |          |       | 2022-2023 | ۱۴۰۱-۰۲ |                             |                       |                  |                   |              |
| 5  | Gonbad   | گنبد  | 2021-2022 | ۱۴۰۰-۰۱ | 31° 01' 43" N 61° 30' 04" E | Northeast             | شمال شرقی        | Warm and humid    | گرم و مرطوب  |
| 6  |          |       | 2022-2023 | ۱۴۰۱-۰۲ |                             |                       |                  |                   |              |
| 7  | Zabol    | زابل  | 2021-2022 | ۱۴۰۰-۰۱ | 37° 15' 00" N 55° 10' 02" E | Southeast             | جنوب شرقی        | Warm and dry      | گرم و خشک    |
| 8  |          |       | 2022-2023 | ۱۴۰۱-۰۲ |                             |                       |                  |                   |              |
| 9  | Moghan   | مغان  | 2021-2022 | ۱۴۰۰-۰۱ | 39° 38' 54" N 47° 55' 03" E | Northwest             | شمال غربی        | Warm and humid    | گرم و مرطوب  |
| 10 |          |       | 2022-2023 | ۱۴۰۱-۰۲ |                             |                       |                  |                   |              |

جدول ۳- اطلاعات هواشناسی ایستگاه‌های تحقیقاتی محل اجرای آزمایش‌ها (۱۴۰۰-۰۱ و ۱۴۰۱-۰۲)

Table 3. Meteorological information of the research stations of the experiments (2021-22 and 2022-23)

| Environment | محیط °  | کمینه دما<br>Min. temperature (°C) | بیشینه دما<br>Max. temperature (°C) | میانگین دما<br>Mean temperature (°C) | بارش<br>Precipitation (mm) |
|-------------|---------|------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------|
| Ahvaz-1     | اهواز-۱ | 15.8                               | 29.5                                | 23.3                                 | 167.2                      |
| Darab-1     | داراب-۱ | 11.7                               | 24.7                                | 19.1                                 | 217.1                      |
| Zabol-1     | زابل-۱  | 11.4                               | 24.8                                | 18.6                                 | 70.0                       |
| Gonbad-1    | گنبد-۱  | 9.7                                | 22.2                                | 16.1                                 | 413.6                      |
| Moghan-1    | مغان-۱  | 7.8                                | 17.1                                | 12.8                                 | 254.6                      |
| Mean        | میانگین | 11.3                               | 23.7                                | 18.0                                 | 224.5                      |
| Ahvaz-2     | اهواز-۲ | 15.7                               | 28.5                                | 22.6                                 | 398.3                      |
| Darab-2     | داراب-۲ | 11.8                               | 23.9                                | 18.7                                 | 251.2                      |
| Zabol-2     | زابل-۲  | 12.4                               | 25.0                                | 19.4                                 | 68.6                       |
| Gonbad-2    | گنبد-۲  | 11.2                               | 23.7                                | 17.3                                 | 384.4                      |
| Moghan-2    | مغان-۲  | 8.8                                | 18.2                                | 13.8                                 | 279.9                      |
| Mean        | میانگین | 12.0                               | 23.9                                | 18.4                                 | 276.5                      |

\* 1 and 2; Cropping seasons 2021-2022 and 2022-2023, respectively

باقیمانده هستند. به منظور ارزیابی پایداری عملکرد ژنوتیپ‌های جو بر اساس مقادیر مؤلفه اول و عملکرد دانه و ارزیابی سازگاری آن‌ها با محیط‌های مختلف، از بای‌پلات‌های AMMI-1 و AMMI-2 استفاده شد. جهت بررسی دقیق‌تر پایداری عملکرد ژنوتیپ‌های جو آماره‌های پایداری مبتنی بر مدل AMMI و BLUP به شرح جدول زیر محاسبه شدند (جدول ۴).

تجزیه AMMI روی داده‌ها با استفاده از رابطه ۱ انجام شد (Gauch, 1992):  
(رابطه ۱)

$$\mu_{ij} = \mu + \alpha_i + \tau_j + \sum_{k=1}^p \lambda_k \alpha_{ik} t_{jk} + \rho_{ij} + \varepsilon_{ij}$$

$\alpha_i$ ،  $\tau_j$ ،  $\lambda_k$ ،  $t_{jk}$ ،  $\alpha_{ik}$  و  $\rho_{ij}$ : به ترتیب اثر افزایشی ژنوتیپ، میانگین محیطی، ارزش منفرد برای مؤلفه اصلی  $k$ ، عنصر  $\lambda_k$  بردار ویژه  $k$ ام، عنصر  $t_{jk}$  بردار ویژه  $k$ ام و

جدول ۴- آماره‌های پایداری و سازگاری محاسبه شده بر اساس مدل AMII و BLUP

Table 4. Calculated the AMMI and BLUP-based stability and adaptability statistics

| مدل<br>Model | آماره<br>Statistic                                  | نماد<br>Symbol | مرجع<br>Reference                                   |
|--------------|-----------------------------------------------------|----------------|-----------------------------------------------------|
| AMMI-based   | Averages of the squared eigenvector values          | Ev             | (Zobel, 1994)                                       |
|              | Sums of the absolute value of the IPC scores        | SIPC           | (Sneller <i>et al.</i> , 1997)                      |
|              | Sum across environments of the GEI modelled by AMMI | AMGE           | (Sneller <i>et al.</i> , 1997)                      |
|              | Distance of IPCAs point with origin in space        | D              | (Annicchiarico, 1997), (Zhang <i>et al.</i> , 1998) |
|              | AMMI stability value                                | ASV            | (Purchase <i>et al.</i> , 2000)                     |
|              | Stability measure based on fitted AMMI model        | $W_{i(AMMI)}$  | (Raju, 2002)                                        |
|              | AMMI Based Stability Parameter                      | ASTAB          | (Rao and Prabhakaran, 2005)                         |
|              | Modified AMMI Stability Value                       | MASV           | (Zali <i>et al.</i> , 2012)                         |
|              | Absolute value of relative contribution of IPCAs    | Za             | (Zali <i>et al.</i> , 2012)                         |
|              | AMMI stability index                                | ASI            | (Jambhulkar <i>et al.</i> , 2017)                   |
|              | Modified AMMI stability index                       | MASI           | (Ajay <i>et al.</i> , 2018)                         |
| BLUP-based   | Harmonic mean of genotypic values                   | HMGV           | (Resende and de Duarte, 2007)                       |
|              | Relative performance of genotypic values            | RPGV           | (Resende and de Duarte, 2007)                       |
|              | Harmonic mean of RPGV                               | HMRPGV         | (Resende and de Duarte, 2007)                       |
|              | Weighted average of absolute scores                 | WAASB          | (Olivoto <i>et al.</i> , 2019)                      |

در هر دو سال زراعی در ایستگاه زابل و بیشترین میزان بارش در ایستگاه گنبد کاووس ثبت شد (جدول ۳).

نتایج حاصل از تجزیه AMMI بر اساس داده‌های عملکرد دانه جمع‌آوری شده از ۱۰ محیط (ترکیب دو سال و پنج مکان) نشان داد که اثر اصلی ژنوتیپ، محیط و برهمکنش آن‌ها بر عملکرد دانه معنی‌دار بود. نتایج نشان داد که محیط بیشترین سهم تغییرات عملکرد دانه را توجیه کرد (۸۷/۴ درصد) و سهم برهمکنش ژنوتیپ و محیط و ژنوتیپ به ترتیب ۱۰/۴ و ۲/۱ درصد بودند. این نتایج نشان دهنده اثر بالای محیط بر تغییرات عملکرد دانه در ژنوتیپ‌های جو بود. یکی از دلایل

تجزیه به مؤلفه‌های اصلی با هدف بررسی روابط بین عملکرد دانه و آماره‌های پایداری و سازگاری محاسبه شده انجام شد. تجزیه‌های آماری با استفاده از بسته آماری Metan و در محیط R انجام شدند (Olivoto and Lucio, 2020).

## نتایج و بحث

بر اساس نتایج اطلاعات هواشناسی، در هر دو سال زراعی کمترین و بیشترین کمینه دمایی به ترتیب مربوط به ایستگاه‌های مغان و اهواز بود. در بین ایستگاه‌های هدف نیز اهواز و مغان به ترتیب دارای بیشترین و کمترین بیشینه دمایی بودند. کمترین میزان بارش

بالا بودن سهم اثر محیط را می‌توان به شرایط آب و هوایی حاکم بر اقلیم گرم نسبت داد. این اقلیم شامل دو شرایط گرم و خشک در جنوب (ایستگاه‌های اهواز، داراب و زابل) و گرم و مرطوب در شمال (مغان و گنبد کاووس) است (Zali et al., 2023). نتایج سایر تحقیقات نیز نشان داده است که محیط سهم بالایی از تغییرات عملکرد دانه را توجیه می‌کند (Vaezi et al., 2019; Ahakpaz (Ghazvini et al., 2022 et al., 2021; Pour-Aboughadareh et al., 2022; 2023a).

نتایج نشان داد که سه مؤلفه نخست برهمکنش ژنوتیپ و محیط در سطوح احتمال یک و پنج درصد معنی‌دار بودند. مؤلفه‌های اول، دوم و سوم، به ترتیب با ۳۱/۸، ۲۴/۸ و ۱۲/۳ درصد (در مجموع ۶۸/۹ درصد) تغییرات برهمکنش ژنوتیپ و محیط را تبیین کردند. مجموع مربعات باقیمانده مدل نیز با کمترین مقدار میانگین مربعات غیرمعنی‌دار بود که نشان دهنده دقت بالای مدل AMMI بود (Hemayati et al., 2023). میانگین عملکرد دانه ژنوتیپ‌های جو بین ۷۴۰ کیلوگرم در هکتار (لاین ۱۵- سال اول در زابل) و ۷۵۴۰ کیلوگرم در هکتار (لاین ۳- سال دوم در مغان) متغیر بود. میانگین عملکرد دانه ژنوتیپ‌های جو در مجموع محیط‌ها بین ۴۱۱۰ (لاین ۱۸) و ۴۹۶۰ (لاین ۱۴) کیلوگرم در هکتار متغیر بود. لاین ۳ با عملکرد ۴۲۸۰ و ۵۸۹۰ کیلوگرم در هکتار و لاین ۱۴ با عملکرد ۴۲۵۰ و ۶۰۳۰ کیلوگرم در هکتار دارای بیشترین عملکرد دانه در مقایسه با سایر لاین‌ها و ارقام شاهد به ترتیب در مناطق جنوبی و شمالی بودند (جدول ۵).

نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که کمترین عملکرد دانه مربوط به ایستگاه زابل در سال اول (۱۰۱۱ کیلوگرم در هکتار) و بیشترین مقدار آن (۶۴۱۸/۵ کیلوگرم) مربوط به ایستگاه مغان در سال دوم بود (جدول ۵). به منظور ارزیابی واکنش

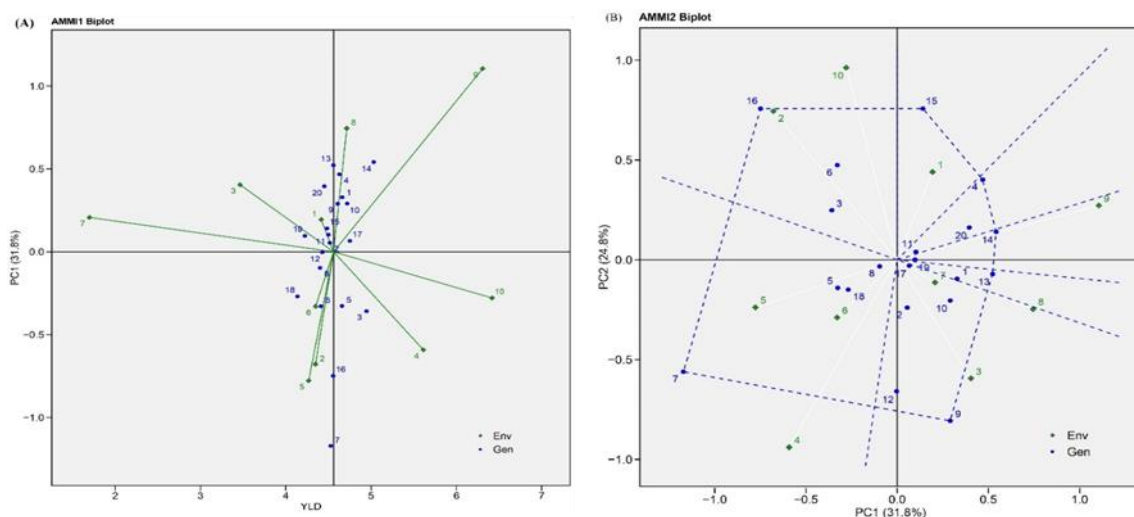
ژنوتیپ‌های جو در محیط‌های مختلف از روش تجزیه بای‌پلات‌های AMMI-1 و AMMI-2 استفاده شد. این تجزیه‌ها به دلیل نمایش گرافیکی واکنش ژنوتیپ‌ها و محیط‌ها در برهمکنش ژنوتیپ و محیط، ابزار مناسبی جهت شناسایی ژنوتیپ‌های سازگار به تمام و یا برخی از محیط‌های ویژه هستند (Squadric et al., 2006). در بای‌پلات AMMI-1 محورهای افقی و عمودی به ترتیب مربوط به عملکرد دانه و ضرایب عامل اول برای ژنوتیپ‌ها و محیط‌ها (IPCA1) هستند که به ترتیب نشان دهنده اثرات اصلی جمع‌پذیر و متقابل ضرب‌پذیر هستند. نتایج نشان داد که ژنوتیپ‌های ۱، ۳، ۴، ۵، ۹، ۱۰، ۱۴ و ۱۷ دارای عملکرد دانه بیشتر از میانگین کل بودند و در بین آن‌ها ژنوتیپ‌های ۱، ۱۰ و ۱۷ با کمترین مقادیر IPCA (نزدیک صفر) به عنوان پایدارترین ژنوتیپ‌ها شناسایی شدند (شکل ۱- الف).

ژنوتیپ‌های واقع در مرکز بای‌پلات (۲، ۸، ۱۱ و ۱۲) دارای برهمکنش نزدیک به صفر بوده و دارای سازگاری عمومی بیشتری هستند. در مقابل، ژنوتیپ‌های ۳، ۱۴ و ۱۶ که در نقاط دورتری از مرکز بای‌پلات قرار داشتند، دارای سازگاری خصوصی با برخی از محیط‌ها بودند و بیشترین تأثیر را در برهمکنش ژنوتیپ و محیط داشتند. گاوچ و زوبل (Gauch and Zobel, 1997) اظهار داشتند در صورتی که دو مؤلفه نخست بیشترین سهم برهمکنش ژنوتیپ و محیط را توجیه کنند می‌توان از آنها برای شناسایی ژنوتیپ‌های مطلوب از نظر عملکرد دانه و پایداری استفاده کرد. براساس بای‌پلات AMMI-2 (شکل ۱- ب) محیط‌ها به چهار بخش تفکیک شدند. محیط‌های E1، E2 و E10 (به ترتیب مربوط به داده‌های دو سال اهواز و سال دوم مغان) در یک بخش قرار گرفتند. در این محیط‌ها لاین‌های ۱۵ و ۱۶ به عنوان ژنوتیپ‌های پرمحصول و سازگار شناسایی شدند. لاین ۱۴ در محیط E9 (سال اول- مغان) دارای سازگاری خصوصی بود. لاین ۹ نیز

جدول ۵- عملکرد دانه لاین‌های امیدبخش جو در محیط‌های آزمایشی اقلیم گرم ایران (۱۴۰۰-۰۱ و ۱۴۰۱-۰۲)

Table 5. Grain yield (kg.ha<sup>-1</sup>) of barley promising lines in experimental environments of warm climate of Iran (2021-22 and 2022-23)

| ژنوتیپ‌های جو<br>Barley genotypes | اهواز<br>Ahvaz     |                    | داراب<br>Darab     |                    | گنبد کاووس<br>Gonbad |                    | زابل<br>Zabol      |                    | مغان<br>Moghan     |                    | میانگین عملکرد در محیط‌ها<br>Mean of environments |           | موقعیت جغرافیایی<br>Geographical location |           |               |           |
|-----------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------------------------------------|-----------|-------------------------------------------|-----------|---------------|-----------|
|                                   | ۱۴۰۰-۰۱<br>2021-22 | ۱۴۰۱-۰۲<br>2022-23 | ۱۴۰۰-۰۱<br>2021-22 | ۱۴۰۱-۰۲<br>2022-23 | ۱۴۰۰-۰۱<br>2021-22   | ۱۴۰۱-۰۲<br>2022-23 | ۱۴۰۰-۰۱<br>2021-22 | ۱۴۰۱-۰۲<br>2022-23 | ۱۴۰۰-۰۱<br>2021-22 | ۱۴۰۱-۰۲<br>2022-23 | میانگین<br>Mean                                   | رتبه<br>R | جنوب<br>South                             | رتبه<br>R | شمال<br>North | رتبه<br>R |
| G1                                | 4250               | 4320               | 4730               | 5450               | 4000                 | 4690               | 1230               | 4690               | 6680               | 6600               | 4660                                              | 5         | 4110                                      | 5         | 5490          | 8         |
| G2                                | 4210               | 4310               | 3420               | 5790               | 4460                 | 4540               | 1170               | 4580               | 6660               | 5790               | 4490                                              | 12        | 3910                                      | 11        | 5360          | 13        |
| G3                                | 4390               | 5200               | 3960               | 6090               | 4910                 | 4680               | 1250               | 4780               | 6440               | 7540               | 4920                                              | 2         | 4280                                      | 1         | 5890          | 2         |
| G4                                | 4650               | 4690               | 3920               | 5510               | 3430                 | 4630               | 930                | 5000               | 6860               | 7010               | 4660                                              | 6         | 4120                                      | 4         | 5480          | 9         |
| G5                                | 3880               | 4140               | 3080               | 5960               | 4920                 | 4530               | 960                | 5100               | 5960               | 6970               | 4550                                              | 8         | 3850                                      | 13        | 5590          | 5         |
| G6                                | 3810               | 5170               | 2580               | 5070               | 4100                 | 4260               | 990                | 4260               | 6260               | 6540               | 4300                                              | 18        | 3650                                      | 19        | 5290          | 15        |
| G7                                | 3660               | 4830               | 3640               | 7020               | 5210                 | 4020               | 970                | 3650               | 5080               | 6320               | 4440                                              | 14        | 3960                                      | 8         | 5160          | 17        |
| G8                                | 4270               | 3880               | 3190               | 5330               | 4640                 | 4560               | 970                | 4120               | 6380               | 6230               | 4360                                              | 17        | 3630                                      | 20        | 5450          | 11        |
| G9                                | 4360               | 3490               | 3480               | 6440               | 3930                 | 5340               | 970                | 5860               | 6010               | 5690               | 4560                                              | 7         | 4100                                      | 6         | 5240          | 16        |
| G10                               | 4570               | 4250               | 3470               | 6130               | 4390                 | 4810               | 1530               | 5070               | 7150               | 6110               | 4750                                              | 3         | 4170                                      | 3         | 5620          | 4         |
| G11                               | 4550               | 4070               | 3790               | 5030               | 4400                 | 5160               | 910                | 5090               | 5740               | 6530               | 4530                                              | 10        | 3910                                      | 12        | 5460          | 10        |
| G12                               | 3810               | 4370               | 3720               | 6000               | 4080                 | 5330               | 930                | 4910               | 5980               | 5180               | 4430                                              | 15        | 3950                                      | 9         | 5140          | 18        |
| G13                               | 4510               | 3520               | 3530               | 5640               | 3870                 | 4840               | 900                | 4900               | 7060               | 6560               | 4530                                              | 9         | 3830                                      | 14        | 5580          | 6         |
| G14                               | 5250               | 4170               | 3630               | 5710               | 4530                 | 5150               | 920                | 5810               | 7430               | 7000               | 4960                                              | 1         | 4250                                      | 2         | 6030          | 1         |
| G15                               | 4330               | 5200               | 2850               | 4840               | 3800                 | 4720               | 740                | 4590               | 6860               | 6760               | 4470                                              | 13        | 3760                                      | 16        | 5530          | 7         |
| G16                               | 5430               | 5080               | 2220               | 5470               | 4540                 | 4620               | 990                | 4370               | 5190               | 7290               | 4520                                              | 11        | 3930                                      | 10        | 5410          | 12        |
| G17                               | 4960               | 4140               | 3790               | 5620               | 4590                 | 4790               | 1100               | 4320               | 6950               | 6450               | 4670                                              | 4         | 3990                                      | 7         | 5700          | 3         |
| G18                               | 4640               | 3880               | 3390               | 5410               | 3920                 | 4170               | 870                | 3940               | 5050               | 5830               | 4110                                              | 20        | 3690                                      | 17        | 4740          | 20        |
| G19                               | 4430               | 4070               | 3180               | 5020               | 3800                 | 4600               | 930                | 4380               | 5930               | 5720               | 4210                                              | 19        | 3670                                      | 18        | 5010          | 19        |
| G20                               | 4350               | 4210               | 3720               | 4700               | 3890                 | 4680               | 960                | 4880               | 6500               | 6250               | 4410                                              | 16        | 3800                                      | 15        | 5330          | 14        |
| Mean                              | 4415.5             | 4349.5             | 3464.5             | 5611.5             | 4270.5               | 4706.0             | 1011.0             | 4715.0             | 6308.5             | 6418.5             |                                                   |           |                                           |           |               |           |



شکل ۱- بای پلات AMMI-1 (A) و AMMI-2 (B) حاصل از تجزیه AMMI بر اساس عملکرد دانه لاین‌های امیدبخش جو

Fig. 1. The AMMI-1 and AMMI-2 biplots obtained based on the AMMI model for the grain yield (YLD) of barley promising lines

داد که لاین‌های ۳، ۹، ۱۰، ۱۴ و ۱۹ بالاترین میزان پایداری عملکرد را داشتند. از نظر آماره RPGV، ژنوتیپ‌های ۱، ۳، ۱۰، ۱۴ و ۱۷ دارای بیشترین میزان سازگاری به محیط‌های مختلف بودند. ژنوتیپ‌های یاد شده از نظر آماره پایداری و سازگاری (HMRPGV) نسبت به سایر ژنوتیپ‌ها و رقم گلچین برتری داشتند. مدل BLUP نیز قادر به برآورد ارزش اصلاحی ژنوتیپ‌های مورد ارزیابی در محیط‌های مختلف است و می‌توان از آن در فرآیند گزینش استفاده کرد. یکی از شاخص‌های گزینشی مبتنی بر این مدل HMGV می‌باشد (جدول ۶). این شاخص بر اساس میانگین هارمونیک ارزش‌های ژنوتیپی قادر به شناسایی ژنوتیپ‌های پایدار در محیط‌های مختلف است (Resende and Duarte, 2007). شاخص‌های RPGV و HMRPGV نیز به ترتیب با بهره‌مندی از پاسخ ژنوتیپی در هر محیط و ایجاد الگوی رتبه‌بندی برای ژنوتیپ‌های مورد بررسی، قادر به برآورد سازگاری و پایداری و سازگاری همزمان هستند (Borges et al., 2010).

دارای سازگاری خصوصی مطلوبی با محیط‌های زابل (E7 و E8) و سال اول داراب (E3) داشت. لاین ۷ نیز به عنوان ژنوتیپ برتر در محیط‌های گنبد (E5 و E6) و سال دوم داراب (E4) شناسایی شد. توحیدی و همکاران (Tohidi et al., 2015) جهت ارزیابی واکنش ژنوتیپ‌های گندم در مناطق مختلف ایران از بای پلات‌های مدل AMMI استفاده کردند. فلاحی و همکاران (Fallahi et al., 2011) نیز به منظور شناسایی ژنوتیپ‌های پایدار گندم دوروم از روش AMMI استفاده کرده و اظهار داشتند که استفاده از بای پلات مدل AMMI-2 برای انتخاب ژنوتیپ‌های دارای سازگاری عمومی برای برخی از مناطق هدف مورد مطالعه مناسب بود.

بر اساس آماره‌های پایداری مبتنی بر مدل AMMI، چهار لاین ۸، ۱۱، ۱۷ و ۱۹ همراه با رقم گلچین، به عنوان پایدارترین ژنوتیپ‌ها شناسایی شدند. مقایسه میانگین عملکرد ژنوتیپ‌های منتخب نشان داد که جز لاین ۱۷، سایر ژنوتیپ‌ها از عملکرد پایینی برخوردار بودند. بررسی مقادیر آماره HMGV نشان

جدول ۶- آماره‌های پایداری برآورد شده بر اساس مدل AMMI و BLUP در لاین‌های امیدبخش جو

Table 6. Estimated stability statistics based on the AMMI and BLUP models in barley promising lines

| ژنوتیپ‌های جو<br>Barley genotypes | Grain yield (kg.ha <sup>-1</sup> ) | ASTAB | ASI  | ASV  | AVAMGE | DA   | DZ   | EV   | FA   | MASI | MASV | SIPC | ZA   | HMGV | RPGV | HMRPGV |
|-----------------------------------|------------------------------------|-------|------|------|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|--------|
| G1                                | 4660                               | 0.54  | 0.11 | 0.43 | 2.89   | 1.18 | 0.47 | 0.07 | 1.38 | 0.13 | 0.80 | 1.08 | 0.12 | 4.07 | 1.02 | 1.02   |
| G2                                | 4490                               | 0.08  | 0.06 | 0.25 | 1.14   | 0.49 | 0.17 | 0.01 | 0.24 | 0.06 | 0.50 | 0.43 | 0.05 | 3.96 | 0.99 | 0.99   |
| G3                                | 4920                               | 0.35  | 0.13 | 0.52 | 2.48   | 1.01 | 0.35 | 0.04 | 1.01 | 0.14 | 0.79 | 1.00 | 0.13 | 4.24 | 1.06 | 1.06   |
| G4                                | 4660                               | 0.52  | 0.18 | 0.72 | 3.12   | 1.28 | 0.42 | 0.06 | 1.63 | 0.19 | 1.07 | 1.24 | 0.17 | 4.04 | 1.01 | 1.01   |
| G5                                | 4550                               | 0.21  | 0.11 | 0.44 | 1.92   | 0.80 | 0.27 | 0.02 | 0.65 | 0.12 | 0.59 | 0.76 | 0.10 | 4.07 | 1.02 | 1.01   |
| G6                                | 4300                               | 0.34  | 0.16 | 0.64 | 2.80   | 1.06 | 0.32 | 0.03 | 1.13 | 0.16 | 1.05 | 0.89 | 0.13 | 3.84 | 0.97 | 0.97   |
| G7                                | 4440                               | 1.88  | 0.40 | 1.60 | 7.02   | 2.53 | 0.75 | 0.19 | 6.42 | 0.40 | 1.93 | 2.18 | 0.31 | 3.89 | 0.99 | 0.99   |
| G8                                | 4360                               | 0.01  | 0.03 | 0.13 | 0.50   | 0.19 | 0.05 | 0.00 | 0.04 | 0.03 | 0.14 | 0.13 | 0.02 | 3.84 | 0.97 | 0.97   |
| G9                                | 4560                               | 1.15  | 0.22 | 0.89 | 4.40   | 1.82 | 0.64 | 0.14 | 3.32 | 0.23 | 1.78 | 1.74 | 0.21 | 4.10 | 1.01 | 1.01   |
| G10                               | 4750                               | 0.13  | 0.11 | 0.43 | 1.75   | 0.66 | 0.19 | 0.01 | 0.44 | 0.11 | 0.55 | 0.50 | 0.08 | 4.11 | 1.02 | 1.02   |
| G11                               | 4530                               | 0.04  | 0.03 | 0.14 | 0.85   | 0.32 | 0.12 | 0.00 | 0.10 | 0.04 | 0.22 | 0.30 | 0.04 | 4.00 | 1.00 | 1.00   |
| G12                               | 4430                               | 0.45  | 0.16 | 0.66 | 3.11   | 1.19 | 0.38 | 0.05 | 1.42 | 0.16 | 1.33 | 0.78 | 0.10 | 3.95 | 0.98 | 0.98   |
| G13                               | 4530                               | 0.28  | 0.17 | 0.68 | 2.84   | 1.01 | 0.28 | 0.03 | 1.02 | 0.17 | 0.69 | 0.66 | 0.10 | 3.99 | 1.00 | 1.00   |
| G14                               | 4960                               | 0.46  | 0.18 | 0.71 | 3.37   | 1.21 | 0.39 | 0.05 | 1.46 | 0.18 | 0.84 | 1.07 | 0.14 | 4.35 | 1.08 | 1.07   |
| G15                               | 4470                               | 0.63  | 0.19 | 0.78 | 3.90   | 1.41 | 0.45 | 0.07 | 1.99 | 0.20 | 1.54 | 1.09 | 0.15 | 3.91 | 0.98 | 0.98   |
| G16                               | 4520                               | 1.67  | 0.30 | 1.22 | 5.96   | 2.25 | 0.76 | 0.19 | 5.07 | 0.32 | 1.94 | 2.24 | 0.29 | 3.93 | 1.00 | 0.99   |
| G17                               | 4670                               | 0.01  | 0.02 | 0.09 | 0.42   | 0.16 | 0.06 | 0.00 | 0.03 | 0.02 | 0.12 | 0.16 | 0.02 | 4.09 | 1.03 | 1.03   |
| G18                               | 4110                               | 0.12  | 0.09 | 0.38 | 1.46   | 0.62 | 0.19 | 0.01 | 0.38 | 0.09 | 0.48 | 0.56 | 0.08 | 3.69 | 0.93 | 0.93   |
| G19                               | 4210                               | 0.02  | 0.03 | 0.12 | 0.71   | 0.26 | 0.10 | 0.00 | 0.07 | 0.03 | 0.17 | 0.22 | 0.03 | 3.77 | 0.95 | 0.95   |
| G20                               | 4410                               | 0.19  | 0.13 | 0.53 | 2.09   | 0.82 | 0.23 | 0.02 | 0.67 | 0.13 | 0.61 | 0.65 | 0.10 | 3.95 | 0.99 | 0.99   |

See table 4 for the abbreviations

برای مشاهده حروف اختصاری به جدول ۴ رجوع شود

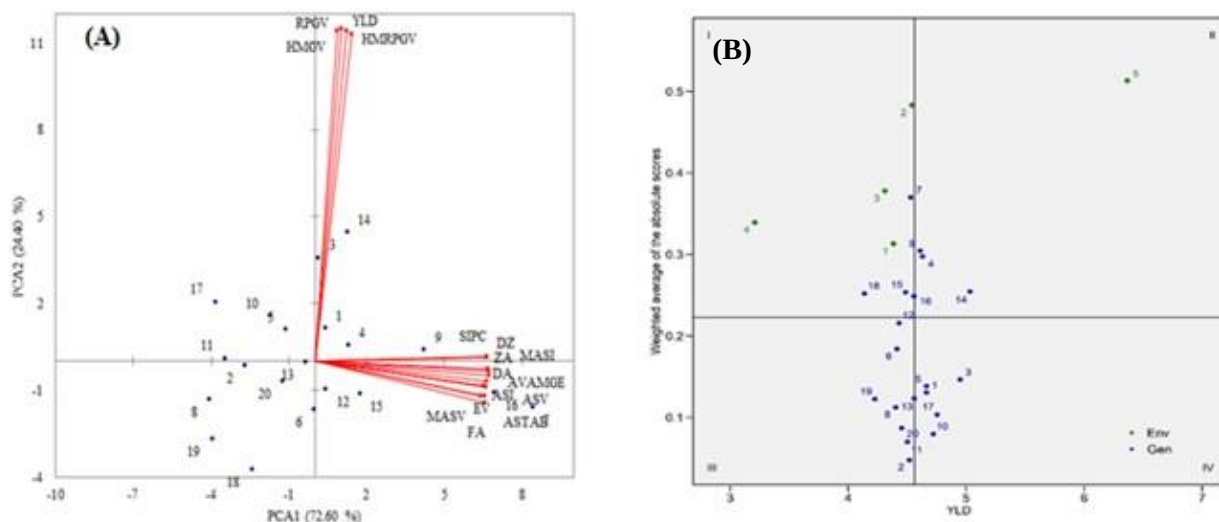
به منظور ارزیابی روابط بین عملکرد دانه و آماره‌های سازگاری و پایداری، تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA) انجام شد. نتایج حاصل نشان داد که دو مؤلفه نخست در مجموع ۹۷ درصد از تغییرات مشاهده شده در عملکرد دانه و آماره‌های پارامتری را توجیه کردند. براساس بای پلات ترسیم شده با استفاده از دو مؤلفه نخست، روابط بین آماره‌های پایداری و عملکرد دانه مورد بررسی قرار گرفت. در این روش، با توجه به زاویه بین بردارهای هر یک از آماره‌ها می‌توان همبستگی بین آن‌ها را تعیین کرد. چنانچه کوسینوس زاویه بین بردارهای دو آماره کوچکتر از ۹۰ درجه باشد، آن دو آماره دارای همبستگی مثبت و معنی‌داری با یکدیگر هستند. همان‌طور که در شکل ۱-الف مشاهده می‌شود، کلیه آماره‌های مبتنی بر مدل AMMI دارای همبستگی مثبت و معنی‌داری با یکدیگر بودند. وجود همبستگی مثبت و معنی‌دار بین آماره‌های مبتنی بر AMMI دور از انتظار نبود، زیرا این آماره بر اساس ضرایب و نمرات استخراج شده از مدل AMMI برآورد شده‌اند. استفاده از این آماره در تحقیقات انجام شده روی جو و سایر گیاهان زراعی نیز جهت ارزیابی پایداری ژنوتیپ‌ها گزارش شده است. نتایج تحقیق حمایتی و همکاران (Hemayati *et al.*, 2023) نشان داد که آماره‌های AMGE، MASV، MASI و ASI دارای روابط مثبتی با یکدیگر بودند و الگوی مشابهی در انتخاب ژنوتیپ‌های چغندر قند ارائه دادند. خزایی و همکاران (Khazaei *et al.*, 2021) نیز جهت شناسایی لاین‌های پایدار سورگوم از آماره ASV استفاده کردند و اظهار داشتند که نتایج به دست آمده از این آماره با نتایج ارائه شده توسط مدل AMMI-1 مشابه بود. پورابوقداره و همکاران (Pour-Aboughadareh *et al.*, 2023c) نیز در ارزیابی مجموعه‌ای از لاین‌های جو، کارایی بالای شاخص‌های ASTAB، EV، ASI و ASV در شناسایی لاین‌های پایدار جو را گزارش کردند. عملکرد دانه تنها با

آماره‌های مبتنی بر مدل BLUP همبستگی مثبت و معنی‌دار داشت. پیش از این پورابوقداره و همکاران (Pour-Aboughadareh *et al.*, 2023d) همبستگی مثبت و معنی‌داری بین آماره‌های HMGV، RPGV و HMRPGV با عملکرد دانه در برخی از ژنوتیپ‌های جو گزارش کردند و اظهار داشتند این آماره‌ها نشان دهنده مفهوم دینامیکی از پایداری بوده و می‌توان از آنها در گزینش ژنوتیپ‌های پایدار استفاده کرد.

گروه‌بندی ژنوتیپ‌های جو با استفاده از شاخص WAASB محاسبه شده، براساس میانگین داده‌های دو ساله در شکل ۲-ب نشان داده شده است. براساس بای پلات حاصل از این شاخص و عملکرد دانه، ژنوتیپ‌ها و محیط‌های آزمایشی در چهار ربع گروه‌بندی شدند. در این الگوی گروه‌بندی، ربع اول شامل ژنوتیپ‌های کم‌محصول و ناپایدار همراه با محیط‌هایی با قابلیت تمایز بالا بود. در ربع دوم ژنوتیپ‌های پرمحصول اما ناپایدار قرار داشتند. محیط‌های این گروه مشابه گروه اول از قدرت تمایز بالایی برخوردار هستند. ربع سوم شامل ژنوتیپ‌های کم‌محصول اما سازگار به طیف وسیعی از محیط‌ها بودند. محیط‌های موجود در این گروه از قدرت تمایز خوبی برخوردار نیستند. در ربع چهارم ژنوتیپ‌های پرمحصول و پایدار همراه با محیط‌های دارای قدرت تمایز پایین قرار داشتند. براساس نتایج در گروه ربع اول لاین‌های ۷، ۱۵ و ۱۸ همراه با محیط‌های اهواز، داراب، گنبد و زابل قرار داشتند. لاین‌های این گروه دارای عملکرد دانه کمتر از میانگین کل و جزء ناپایدارترین لاین‌ها بودند و بیشترین نقش را در برهمکنش ژنوتیپ و محیط داشتند. محیط‌های واقع در این ربع دارای بیشترین قدرت تمایز بودند. در ربع دوم لاین‌های ناپایدار اما پرمحصول ۴، ۹ و ۱۴ قرار داشتند. محیط مغان نیز با قدرت تمایز بالا در این ربع قرار گرفت. ربع سوم دربرگیرنده ژنوتیپ‌های کم‌بازده اما پایدار بود. در این ربع ژنوتیپ‌های ۲، ۶، ۸، ۱۲،

ژنوتیپ‌های امیدبخش جواز مدل WASSB استفاده و گزارش کردند که بای پلات ترسیم شده براساس این مدل مطابقت بالایی با نتایج تجزیه GGE داشته و به خوبی قادر به ارائه الگوی واضحی از سازگاری و پایداری ژنوتیپ‌ها در محیط‌های هدف می‌باشد.

۱۹ و ۲۰ قرار گرفتند. در ربع چهارم ژنوتیپ‌های ۱، ۳، ۵، ۱۰ و ۱۷ به عنوان پایدارترین ژنوتیپ‌ها با عملکرد بالاتر از میانگین کل و کمترین مقدار شاخص WAASB قرار گرفتند. پیش از این، آهک‌پز و همکاران (Ahakpaz *et al.*, 2021) و پورابوقداره و همکاران (Pour-Aboughadareh *et al.*, 2022) در رابطه با شناسایی



شکل ۲- نمایش بای پلات براساس دو مؤلفه نخست PCA با استفاده از آماره‌های پایداری و سازگاری (A). نمایش بای پلات براساس شاخص WASSB و عملکرد دانه جهت گروه‌بندی ژنوتیپ‌های جو و محیط‌های آزمایشی (B)

Fig. 2. The biplot based on the first two components using stability and adaptability statistics (A). The biplot based on the WAASB index and grain yield (YLD) to grouping the barley genotypes and experimental environments (B)

عملکرد بالاتری نسبت به سایر لاین‌ها و ارقام شاهد در مناطق جنوبی اقلیم گرم (اهواز، داراب و زابل) داشتند. نتایج حاصل از آماره‌های پایداری و بای پلات‌های بدست آمده از مدل AMMI و BLUP نیز پایداری ژنوتیپ‌های منتخب را تأیید نمود. با توجه به بای پلات به دست آمده از شاخص WAASB و عملکرد دانه، لاین‌های ۴ و ۱۴ با سازگاری خصوصی برای مناطق شمالی و لاین‌های ۳ و ۱۰ با سازگاری خصوصی، برای مناطق جنوبی شناسایی شدند.

### نتیجه‌گیری

در این تحقیق پس از حصول اطمینان از معنی‌دار بودن برهمکنش ژنوتیپ و محیط، پایداری و سازگاری لاین‌های امیدبخش جو مورد بررسی ارزیابی شد. نتایج مقایسه میانگین‌های عملکرد دانه نشان داد که لاین‌های ۱۴ و به دنبال آن ۳، ۱۰ و ۱۷ در مجموع محیط‌های آزمایشی، دارای بیشترین مقدار عملکرد دانه نسبت به ارقام شاهد و سایر لاین‌ها بودند. لاین‌های ۳، ۱۴ و ۱۷ دارای بیشترین عملکرد در مناطق شمالی اقلیم گرم (مغان و گنبد کاووس) بودند. لاین‌های ۳، ۱۰ و ۱۴ نیز

## سپاسگزاری

تحقیقاتی همکار در فراهم نمودن داده‌های آزمایشی این مقاله (شماره مصوب ۰۳-۰۳-۰۳۱۳-۱۶۱-۰۰۱۲۴۰) کمال تشکر و قدردانی را دارند.

نگارندگان مقاله از مساعدت موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر و همچنین کارکنان محترم مراکز

## References

## منابع مورد استفاده

- Aharpaz, F., Abdi, H., Neyestani, E., Hesami, A., Mohammadi, B., Nader Mahmoudi, K., Abedi-Asl, G., Jazayeri Noshabadi, M.R., Aharpaz, F. and Alipour, H. 2021. Genotype-by-environment interaction analysis for grain yield of barley genotypes under dryland conditions and the role of monthly rainfall. *Agricultural Water Management*, 245, pp.10665. DOI: 10.1016/j.agwat.2020.106665
- Ajay, B.C., Aravind, J. Abdul Fiyaz, R., Bera, S.K., Narendra, K., Gangadhar, K. and Kona. P. 2018. Modified AMMI stability index (MASI) for stability analysis. *Ground News*, 18, pp.4-5.
- Annicchiarico, P. 1997. Joint regression vs AMMI analysis of genotype-environment interactions for cereals in Italy. *Euphytica*, 94, pp.53-62. DOI: 10.1023/A:1002954824178
- Borges, V., Soares, A.A., Reis, M.S., Resende, M.D.V., Cornelio, V.M.O., Leite, N.A. and Vieira, A.R. 2010. Desempenho genotípico de linhagens de arroz de terras altas utilizando metodologia de modelos mistos. *Bragantia*, 69, pp.833-841. DOI: 10.1590/S0006-87052010000400008
- Fallahi, H.A., Jafarabi, J.A. and Saidi, F. 2001. Evaluation of drought tolerance in durum wheat genotypes using drought tolerance indices. *Journal of Seed and Plant*, 1(27), pp.15-22. [In Persian].
- FAOSTAT Statistical Database. 2023. Available online: <http://www.fao.org/faostat/en/#home> (accessed on 6 November 2023)
- Gauch, H.G. 1992. Statistical Analysis of Regional Trials. AMMI Analysis of Factorial Design. (1<sup>st</sup> Ed.) Elsevier, New York, USA.
- Gauch, H.G. and Zobel, R.W. 1997. Identifying mega-environments and targeting genotypes. *Crop Science*, 37, pp.311-326. DOI: 10.2135/cropsci1997.0011183X003700020002x
- Ghazvini, H., Bagherikia, S., Pour-Aboughadareh, A.R., Sharifalhossaini, M., Razavi, S. A., Mohammadi, S., Ghasemi Kalkhoran, M., Fathi Hafshejani, A. and Khakizade, G. 2022. GGE biplot analysis of promising barley lines in the cold regions of Iran. *Journal of Crop Improvement*, 36, pp.461-547. DOI: 10.1080/15427528.2021.1977448
- Ghazvini, H., Lakzade, I., Kouhkan S. A., Jabari, M., Barati, A., Fallahi H. A., Soflaee, H.K.G., Shahbazi K., Yousefi, A., Aghnoum, R., Safavi, S.A., Zakeri, A., Kazerani, N.K., Nikkhah, H., Tahmasebi, S., Dadrezaee, S.T., Nazeri, S.M., Sharifi Alhossaini, M., Dalvand, M. and Rakhshanderoo, M. 2019. Oksin, a new irrigated six-rowed barley cultivar with wide adaptability in warm agro-climate zone of Iran. *Research Achievements for Field and Horticulture Crops*, 7, pp.149-159. [In Persian]. DOI: 10.22092/RAFHC.2019.121086.1125

- Hemayati S.S., Saremirad, A., Mohammadian, R., Jalilian, A., Rezaei, J., Sharifi, M. and Redram, A. 2023. Study of genotypes-environment interaction effect on sugar yield of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) hybrid. *Journal of Crop Science Research in Arid Regions*, 5, pp.345–364. [In Persian]. DOI: 10.52547/jcb.14.44.103
- Jambhulkar N.N., Bose, L.K. and Singh, O.N. 2017. AMMI Stability Index for Stability Analysis. p. 15. In: Mohapatra, T. (Ed.). CRRRI Newsletter. Central Rice Research Institute, Cuttack, India.
- Khazaei, A., Torabi, M. Mokhtarpour, H. and Beheshti, A.R. 2019. Evaluation of yield stability of forage sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] using AMMI analysis. *Iranian Journal of Crop Sciences*, 21(3), pp.225–236. [In Persian]. DOI: 10.29252/abj.21.3.225
- Khazaei, A., Torabi, M., Fyzbakhsh, M.T. and Azari Nasrabad, A. 2021. Analysis of grain yield stability and assessment of genotype  $\times$  environment interaction for grain sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) genotypes. *Iranian Journal of Crop Sciences*, 23(3), pp.211–222. [In Persian]. DOI: 20.1001.1.15625540.1400.23.3.2.0
- Moumeni, A., Mohaddesi, A., Amo-oughli-Tabari, M., Tavassoli-Larijani F. and Khosravi, V. 2019. Stability analysis and genotype  $\times$  environment interaction for grain yield of rice (*Oryza sativa* L.) promising breeding lines. *Iranian Journal of Crop Sciences*, 20(4), pp.329–343. [In Persian]. DOI: 20.1001.1.15625540.1397.20.4.5.4
- Najafi Mirak, T., Moayedi, A.A., Sasani, S. and Ghandi, A. 2019. Evaluation of adaptation and grain yield stability of durum wheat (*Triticum turgidum* L.) genotypes in temperate agro-climate zone of Iran. *Iranian Journal of Crop Sciences*, 21(2), pp.127–138. [In Persian]. DOI: 10.29252/abj.21.2.127
- Nikkhah, H.R., Yousefi, A., Mortazavian, S.M. and Arazmjoo, M. 2007. Analysis of yield stability of barley (*Hordeum vulgare* L.) genotypes- using additive main effects and multiplicative interaction (AMMI) model. *Iranian Journal of Crop Sciences*, 9 (1), pp.1–13. [In Persian]. DOI: 20.1001.1.15625540.1386.9.1.1.7
- Olivoto, T. and Lucio, A.D. 2020. Metan: an R package for multi-environment trial analysis. *Methods in Ecology and Evolution*, 11, pp.783–789. DOI: 10.1111/2041-210X.13384
- Olivoto, T., Licio, A.D.C., da Silva, J.A.G., Marchioro, V.S., de Souza, V.Q. and Jost, E. 2019. Mean performance and stability in multi-environment trials I: Combining features of AMMI and BLUP techniques. *Agronomy Journal*, 111, pp.2949–2960. DOI: 10.2134/agronj2019.03.0220
- Pour-Aboughadareh A., Ghazvini, H., Jasemi, S.Sh., Mohammadi, S., Razavi, S.A., Chaichi, M.R., Ghasemi Kalkhoran, M., Monirifar, H., Tajali, H., Fathihafshjani, A. and Bocianowski, J. 2023a. Selection of high-yielding and stable genotypes of barley for the cold climate in Iran. *Plants*, 12, pp. 2410. DOI: 10.3390/plants12132410
- Pour-Aboughadareh, A.R., Koohkan, S.A., Zali, H., Marzooghian, A., Gholipour, A., Kheirgo, M., Barati, A., Boci-anowski, J. and Askari-Kelestani, A. 2023b. Identification of high-yielding genotypes of barley in

- the warm regions of Iran. *Plants*, 12, pp.3837. DOI: 10.3390/plants12223837
- Pour-Aboughadareh A.R., Barati, A., Gholipoor, A., Zali, H., Marzoghian, A., Koohkan, S.A., Shahbazi-Homonloo, K. and Houseinpour, A. 2023c.** Deciphering genotype-by-environment interaction in barley genotypes using different adaptability and stability methods. *Journal of Crop Science and Biotechnology*, 26, pp.547–562. DOI: 10.1007/s12892-023-00199-z
- Pour-Aboughadareh A.R., Yousefian, M., Moradkhani, H., Pocza, P. and Siddique, K.H.M. 2019.** STABILITYSOFT: A new online program to calculate parametric and non- parametric stability statistics for crop traits. *Applied in Plant Sciences*, 7, pp.e1211. DOI: 10.1002/aps3.1211
- Pour-Aboughadareh, A.R., Barati, A., Koohkan, S.A., Jabari, M., Marzoghian, A., Gholipoor, A., Shahbazi-Homonloo, K., Zali, H., Poodineh, O. and Kheirgo, M. 2022.** Dissection of genotype-by-environment interaction and yield stability analysis in barley using AMMI model and stability statistics. *Bulletin of the National Research Centre*, 46, pp.19. DOI: 0.1186/s42269-022-00703-5
- Purchase J.L., Hatting, H. and Van Deventer, C.S. 2000.** Genotype  $\times$  environment interaction of winter wheat in South Africa: II. Stability analysis of yield performance. *South African Journal of Plant and Soil*, 17, pp.101–107. DOI: 10.1080/02571862.2000.10634878
- Raju B.M.K. 2002.** A study on AMMI model and its biplots. *Journal of the Indian Society of Agricultural Statistics*, 55, pp.297–322.
- Rao, A.R. and Prabhakaran, V.T. 2005.** Use of AMMI in simultaneous selection of genotypes for yield and stability. *Journal of the Indian Society of Agricultural Statistics*, 59, pp.76–82. DOI: 10.4067/S0718-58392014000100001
- Resende, M.D.V. and de Duarte, J.B. 2007.** Precisão e controle de qualidade em experimentos de avaliação de cultivares. *Pesquisa Agropecuaria Tropical*, 37, pp.182–194.
- Sneller, C.H., Kilgore-Norquest, L. and Dombek, D. 1997.** Repeatability of yield stability statistics in soybean. *Crop Science*, 37, pp.383–390. DOI: 10.2135/cropsci1997.0011183X003700020013x
- Suadric, A., Simic, D. and Vratric, M. 2006.** Characterization of genotype by environment interactions in soybean breeding programmes of southeast Europe. *Plant Breeding*, 125, pp.191-125. DOI: 10.1111/j.1439-0523.2006.01185.x
- Tohidi, B., Mohammadi Nejad, Gh., Nakhoda, B. and Sabouri, H. 2015.** Evaluation of grain yield stability of recombinant inbred lines in bread wheat (*Triticum aestivum* L.) based on AMMI method. *Journal of Plant Production Research*, 2(22), pp.189–202. [In Persian]. DOI: 20.1001.1.23222050.1394.22.2.10.9
- Vaezi, B., Pour-Aboughadareh, A.R., Mohammadi, R., Mehraban, A., Hossein-Pour, T., Koohkan, E., Ghasemi, S., Moradkhani, H. and Siddique, K.H.M. 2019.** Integrating different stability models to investigate genotype  $\times$  environment interactions and identify stable and high yielding barley genotypes. *Euphytica*, 215, pp. 63. DOI: 10.1007/s10681-019-2386-5

- Yan, W., Kang, M.S., Ma, B., Woods, S. and Cornelius, P.L. 2007.** GGE biplot vs. AMMI analysis of genotype-by- environment data. *Crop Science*, 47, pp.643–653. DOI: 10.2135/cropsci2006.06.0374
- Yan, W. and Kang, L.A. 2003.** GGE Biplot Analysis: A graphical Tool for Breeders, Geneticists and Agronomist. CRC Press, Boca Raton, FL. USA.
- Zali H., Farshadfar, E., Sabaghpour, S.H. and Karimizadeh, R. 2012.** Evaluation of genotype  $\times$  environment interaction in chickpea using measures of stability from AMMI model. *Annals of Biological Research*, 3, pp.3126–3136.
- Zali, H., Barati, A., Pour-Aboughadareh, A.R., Gholipour, A., Koohkan, S., Marzoghiyan, A., Bocianowski, J., Bujak, H. and Nowosad, K. 2023.** Identification of superior barley genotypes using selection index of ideal genotype (SIIG). *Plants*, 12, pp.1843. DOI: 10.3390/plants12091843
- Zhang, Z., Lu, C. and Xiang, Z. 1998.** Analysis of variety stability based on AMMI model. *Acta Agronomica Sinica*, 24, pp.304–309.
- Zobel, R. W. 1994.** Stress resistance and root systems. *In: Proceedings of the Workshop on Adaptation of Plants to Soil Stress*, Lincoln, NE, USA, 1–4 August 1993, The University of Nebraska: Lincoln, Nebrask, USA.