

Original article

Investigation and comparison of different methods of multi-trait selection in the selection of genotypes tolerant to heat stress in the hull-less barley

Hamed Aflatooni¹, Omid Sofalian², Hasan Zali^{3*}, Ali Asghari²

1. PhD Student of Plant Breeding, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agricultural Sciences and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

2. Professor, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agricultural Sciences and Natural Resources University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

3. Assistant Professor, Crop and Horticultural Science Research Department, Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Darab, Iran

Received 22 March 2024; Revised 11 April 2024; Accepted 20 April 2024

Extended abstract

Introduction

Temperature is a major abiotic factor for regulating both growth and development of crop. But heat stress due to high ambient temperature is a serious threat to crop production worldwide. Heat stress is one of the major challenges in barley cultivation because it coincides with the flowering period and limits the crop productivity.

Materials and methods

To identify heat-tolerant genotypes, 17 promising genotypes of hull-less barley with three check genotypes were evaluated at the Darab Agricultural Research Station. The evaluation was conducted in a randomized complete block design with three replications at cropping year (2022-2023), under conditions non-stress and heat stress. The studied genotypes were planted in six lines along 6 m at a distance of 15 cm from each other. Seed consumption was determined by 400 seeds per square meter and thousand kernel weight for each genotype. Seeds were sown using an experimental plot planter (Wintersteiger, Ried, Austria). The fertilizer composition was 150 kg.ha⁻¹ nitrogen (twice), and diammonium phosphate and potassium sulfate were 100 and 50 kg.ha⁻¹, respectively (before planting). After the removal of perimeter plants, all experimental plots were harvested with an experimental grain harvester (Wintersteiger, Ried, Austria). The indices of stress tolerance studied were Yp: yield under non-stress condition; Ys: yield under stress condition; TOL: tolerance index; SSI: stress susceptibility index; MP: mean productivity; GMP: geometric mean productivity; STI: stress tolerance index; HM: harmonic mean; YI: yield index; YSI: yield stability index; RSI: relative stress index. Indices of FAI-BLUP (Factor analysis and ideotype-design), SIIG (selection index of ideal genotype), CSI (combination of significant indices) and MGIDI (multi-trait genotype-ideotype distance index) were used in order to integrate different indices of heat tolerance and better selection of genotypes in terms of heat tolerance.

Results and discussion

The results of the variance analysis for grain yield indicate a significant difference among genotypes at a 1% probability level in both heat stress and non-stress conditions. Heat stress led to a 24.8% decrease in grain yield in the examined genotypes. The results showed that based on the MP, GMP, HM and STI indices, genotypes 10, 16, 9 and 11 with the highest values of these indices were stress tolerant genotypes.

* Corresponding author: Hassan Zali; E-Mail: Hzali90@yahoo.com

Genotypes 6, 5, 3 and 18 with the highest values of RSI and YSI, respectively, were among the best genotypes. Based on the YI index, genotypes 10, 16, 5 and 6 with the highest YI value were introduced as stress-tolerant genotypes. The results of TOL and SSI indices showed that genotypes 6, 5 and 3 with the lowest values of these indices were tolerant genotypes. Positive and significant correlations were observed between the SIIG, FAI-BLUP, and CSI indices with Yp and Ys, while the MGIDI index showed negative significant correlations with Yp and Ys. The principal component analysis, capturing 99.8% of the variance in the relationships between the indices, grouped stress tolerance indices into three categories and genotypes into four groups. Genotypes 10, 16, and 9, with the highest values of SIIG, FAI-BLUP, and CSI indices and the lowest MGIDI values, were classified as heat tolerant genotypes.

Conclusion

In total, the results showed that by selecting indicators that have a significant correlation with grain yield in both stressed and non-stressed conditions and integrating them using combined indicators, the efficiency of selection increases. On the other hand, the results of FAI-BLUP, SIIG, MGIDI and CSI combined indices were completely similar in selecting the best genotypes and did not have any superiority over each other. Also, based on the results of the combined indices, genotypes 10, 16 and 9 were the superior barley genotypes in terms of tolerance to heat stress at the end of the season.

Keywords: CSI index, Factor analysis, FAI-BLUP index, MGIDI index, SIIG index

بررسی و مقایسه روش‌های مختلف انتخاب چند صفتی در انتخاب ژنوتیپ‌های متحمل به تنش گرمایی در جو بدون پوشینه

حامد افلاطونی^۱، امید سفالیان^۲، حسن زالی^{۳*}، علی اصغری^۴

۱. دانشجوی دکتری ژنتیک و به‌نژادی گیاهی، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل
۲. استاد، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل
۳. استادیار، بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی فارس، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، داراب

مشخصات مقاله	چکیده
واژه‌های کلیدی: تحلیل عاملی شاخص CSI شاخص FAI-BLUP شاخص MGIDI شاخص SHIG	به‌منظور ارزیابی تحمل به تنش گرمایی ۱۷ لاین امیدبخش جو بدون پوشینه به‌همراه سه ژنوتیپ شاهد، آزمایشی در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در ایستگاه تحقیقات کشاورزی داراب، طی سال زراعی ۱۴۰۲-۱۴۰۱ اجرا شد. به‌منظور اعمال تنش گرما، کاشت ژنوتیپ‌های موردنظر در دو تاریخ کاشت مناسب منطقه (۱۵ آذر) و کشت دیر هنگام (۱۹ دی) انجام شد. نتایج تجزیه واریانس عملکرد دانه نشان داد که اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد بین ژنوتیپ‌ها در هر دو شرایط تنش گرمایی و بدون تنش وجود دارد. تنش گرمایی باعث ۲۴/۸ درصد کاهش عملکرد دانه در ژنوتیپ‌های موردبررسی شده بود. بر مبنای بای‌پلات تجزیه به مؤلفه‌های اصلی که ۹۹/۸ درصد تغییرات ارتباط بین شاخص‌ها را بیان نموده است شاخص‌های مختلف در سه گروه و ژنوتیپ‌ها در چهار گروه قرار گرفتند. بر مبنای شاخص انتخاب ژنوتیپ ایده‌آل (SHIG)، شاخص تحلیل عاملی و طراحی ایدئوتیپ (FAI-BLUP) و ترکیب شاخص‌های معنی‌دار (CSI)، ژنوتیپ‌های ۱۰، ۱۶ و ۹ به ترتیب با بیشترین این شاخص‌ها و کمترین مقدار شاخص فاصله ژنوتیپ ایدئوتیپ چند صفتی (MGIDI) جزء ژنوتیپ‌های متحمل به گرما بودند. در مجموع نتایج نشان داد با انتخاب شاخص‌هایی که همبستگی معنی‌داری با عملکرد دانه در هر دو شرایط تنش و بدون تنش دارند و ادغام آن‌ها با استفاده از شاخص‌های ترکیبی، کارایی گزینش افزایش می‌یابد. از طرفی نتایج شاخص‌های ترکیبی FAI-BLUP، SHIG، MGIDI و CSI در انتخاب ژنوتیپ‌های برتر کاملاً مشابه بود و برتری خاصی نسبت به یکدیگر نداشتند. همچنین بر اساس نتایج شاخص‌های ترکیبی، به ترتیب ژنوتیپ‌های ۱۰، ۱۶ و ۹ جزء ژنوتیپ‌های جو برتر از نظر تحمل به تنش گرمای انتهای فصل بودند.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۰۳ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۱/۲۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۰۱ تاریخ انتشار: پائیز ۱۴۰۴ ۵۰۰-۴۸۳ (۳): ۱۸	

مقدمه

جو معمولی (پوشینه‌دار) است (Goldenberg and Kvachadze, 1990). جو بدون پوشینه عوامل محدودکننده جو معمولی را در تغذیه ندارد و درصد فیبر پایین و پروتئین بالا از محاسن آن است. محتوای بتاگلوکان جو بدون پوشینه بالا است و به‌عنوان مانعی در مسیر سنتز کلسترول عمل می‌کند (Simic et al., 2021). درصد اسیدهای آمینه به‌ویژه لیزین در جو بدون پوشینه نسبت به ذرت بالاتر است. وجود مواد بازدارنده در جو معمولی مصرف آن را در تغذیه طیور

جو (*Hordeum vulgare* L.) یکی از سازگارترین محصولات زراعی در بسیاری از مناطق مختلف جهان شناخته شده است. جو لخت (بدون پوشینه) نیز سابقه کشت طولانی دارد. جو بدون پوشینه در تغذیه انسان، دام و طیور، تولید و مورد استفاده قرار می‌گیرد. جو بدون پوشینه در مقایسه با جو معمولی از نظر انرژی برتری دارد و ارزش غذایی آن برابر با ذرت و گندم است (FAOSTAT, 2019). علاوه بر این، محتوای پروتئین و میزان لایسین جو بدون پوشینه بیشتر از

با توجه به پیچیدگی سازوکارهای تحمل به گرما و چون روش مستقیمی برای اندازه‌گیری آن وجود ندارد این امر شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل را مشکل می‌کند (Reynolds et al., 2001)؛ بنابراین، یکی از راه‌های ارزیابی و هم‌چنین غربال ژنوتیپ‌ها برای تحمل به تنش گرمای آخر فصل در شرایط مزرعه، کاشت ژنوتیپ‌ها در تاریخ کشت تأخیری است (Rane and Nagarajan, 2004). از طرفی انتخاب ژنوتیپ‌های متحمل به گرما را می‌توان با استفاده از شاخص‌های مختلف تحمل به تنش انجام داد.

شاخص‌های متعددی برای ارزیابی ژنوتیپ‌های متحمل به تنش‌های محیطی معرفی شده‌اند. از آن جمله می‌توان به شاخص تحمل (TOL) و شاخص میانگین بهره‌وری (MP) (Rosielle and Hamblin, 1981)، شاخص تحمل تنش (STI) (Fernandez, 1992)، شاخص حساسیت به تنش (SSI) و شاخص خشکی نسبی (RDI) (Fischer and Maurer, 1978)، شاخص عملکرد (YI) (Gavuzzi et al., 1997) و شاخص پایداری عملکرد (YSI) (Bouslama and Schapaugh, 1984) اشاره کرد.

محققین به‌منظور انتخاب ژنوتیپ‌های برتر در شرایط تنش‌های محیطی، از شاخص‌های مختلف استفاده می‌کنند؛ بنابراین، ترکیب این شاخص‌ها می‌تواند کارایی انتخاب ژنوتیپ‌ها را افزایش دهند؛ بنابراین شاخص‌های ترکیبی از جمله شاخص انتخاب ژنوتیپ ایده‌آل (SIIG)^۱ (Zali et al., 2015؛ Zali et al., 2023b)، شاخص فاصله ژنوتیپ ایدئوتیپ چند صفتی (MGIDI)^۲ (Olivoto and Nardino, 2020)، شاخص فاصله ژنوتیپ-ایدئوتیپ چند صفتی (FAI-BLUP)^۳ (Rocha et al., 2018) و ترکیب شاخص‌های معنی‌دار (CSI)^۴ (Sabouri et al., 2022) به‌منظور ادغام شاخص‌ها و یا صفات مختلف معرفی شدند.

SIIG یک شاخص چند معیاره است که برای انتخاب ژنوتیپ‌های برتر از نظر شاخص‌ها (صفات) مختلف مناسب است (Zali et al., 2015؛ Zali et al., 2023b). شاخص MGIDI (Olivoto and Nardino, 2020) مبتنی بر انتخاب ژنوتیپ‌های برتر که در آن‌ها چندین شاخص/صفت اندازه‌گیری شده است، می‌باشد. شاخص FAI-BLUP بر اساس تجزیه و تحلیل عاملی است که بر مبنای فاصله هر کدام از ژنوتیپ‌ها از ژنوتیپ ایده‌آل برآورد می‌شود (Rocha et

al., 2020). محدود می‌کند، به‌طوری‌که در صورت استفاده زیاد از جو معمولی در ترکیب تغذیه طیور سبب کاهش قابلیت هضم خوراک، کندی رشد، کندی عبور مواد غذایی در مجرای گوارشی طیور و کاهش هضم چربی می‌شود. در مقابل، با توجه به این‌که درصد فیبر موجود در جو بدون پوشینه پایین‌تر از ذرت است و مواد بازدارنده کم‌تری دارد، لذا می‌تواند به‌عنوان جایگزین مناسبی برای ذرت در تغذیه طیور مورد استفاده قرار گیرد (Prasadi and Joye, 2020).

تولید غذای مورد نیاز جهان به‌شدت توسط تنش‌های محیطی محدود می‌شود و یافتن محیط‌های بدون تنش که گیاه بتواند به سطح پتانسیل عملکردی خود برسد بسیار مشکل است (Reynolds et al., 2001). دمای بالای دائمی یا موقت باعث تغییرات ظاهری، فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی در گیاهان شده و رشد و نمو گیاه را تحت تأثیر قرار می‌دهد و در نهایت منجر به کاهش شدید عملکرد اقتصادی گیاه می‌شود. در غلات هنگامی که گیاه برای دوره کوتاهی در طول دوره پر شدن دانه در معرض دمای بالا قرار می‌گیرد، پیری تسریع شده، تشکیل میوه کاهش می‌یابد و وزن دانه و عملکرد نیز کم می‌شود. تنش گرما موجب محدودیت فتوسنتز در مرحله زایشی و در طول دوره گرده‌افشانی باعث عقیمی می‌شود (Wahid et al., 2007).

در مناطق جنوبی ایران به‌دلیل شرایط آب و هوایی از قبیل درجه‌حرارت مناسب و نور مطلوب در فصل پاییز و زمستان، غلات رشد رویشی زیادی کرده و پتانسیل عملکرد بالایی دارا است، ولی به‌دلیل افزایش ناگهانی درجه‌حرارت در ماه‌های فروردین و اردیبهشت، از مرحله گل‌دهی تا رسیدگی فیزیولوژیک، با تنش گرمایی آخر فصل رشد مواجه شده و عملکرد کمی و کیفی آن به‌شدت کاهش می‌یابد (Jalal Kamali and Duveiller, 2008). در این مناطق هرگونه تأخیر در تاریخ کاشت، درجات حرارت را طی دوره رشد و پر شدن دانه‌ها تا حد زیادی افزایش داده و تنش گرما را تشدید می‌کند (Rane et al., 2007). برای مقابله با این مشکل، می‌توان از روش‌های به‌زراعی و به‌نژادی استفاده نمود که در این بین می‌توان به شناسایی ارقام متحمل به گرما و استفاده از ارقام زودرس (Mondal et al., 2016) اشاره کرد. از برنامه‌های اصلاحی غلات در CIMMYT، توجه به زودرسی لاین‌ها و مقاومت آن‌ها به گرما است.

³ - Factor analysis and ideotype-design

⁴ - Combination of significant indices

¹ - Selection index of ideal genotype

² - Multi-trait genotype-ideotype distance index

مواد و روش‌ها

به‌منظور ارزیابی تحمل به تنش گرمایی انتهای فصل، ۱۷ ژنوتیپ امیدبخش جو بدون پوشینه انتخاب‌شده از دو آزمایش مقدماتی مقایسه عملکرد (۱۴۰۰-۱۳۹۹) و آزمایش مقایسه عملکرد پیشرفته (۱۴۰۱-۱۴۰۰) (جدول ۱)، به‌همراه سه ژنوتیپ شاهد (رقم لوت و دو لاین EHB-87-4 و EHB-85-9) در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در ایستگاه تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی داراب طی سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۲ اجرا شد.

al., 2018). شاخص CSI یک ترکیب خطی از شاخص‌های تحمل یا حساسیت به تنش است که همبستگی معنی‌داری با عملکرد دانه در هر دو شرایط تنش و بدون تنش دارد (Sabouri et al., 2022).

به‌دلیل پدیده گرم شدن جهانی در مناطق گرم و خشک کشور که یکی از عوامل کاهش عملکرد جو است، تولید و معرفی ارقام و لاین‌های متحمل به گرما امری اجتناب‌ناپذیر شده است. به همین دلیل، تحقیق حاضر با هدف ارزیابی تحمل به تنش گرمایی در تعدادی از ژنوتیپ‌های امیدبخش جو لخت و از طرفی بررسی و مقایسه شاخص‌های مختلف ترکیبی SIIG، MGIDI، FAI-BLUP و CSI بود.

جدول ۱. شجره ژنوتیپ‌های جو لخت موردبررسی در سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۲.

Table 1. Pedigree of examined hull-less barley genotypes in the 2022-2023 cropping year.

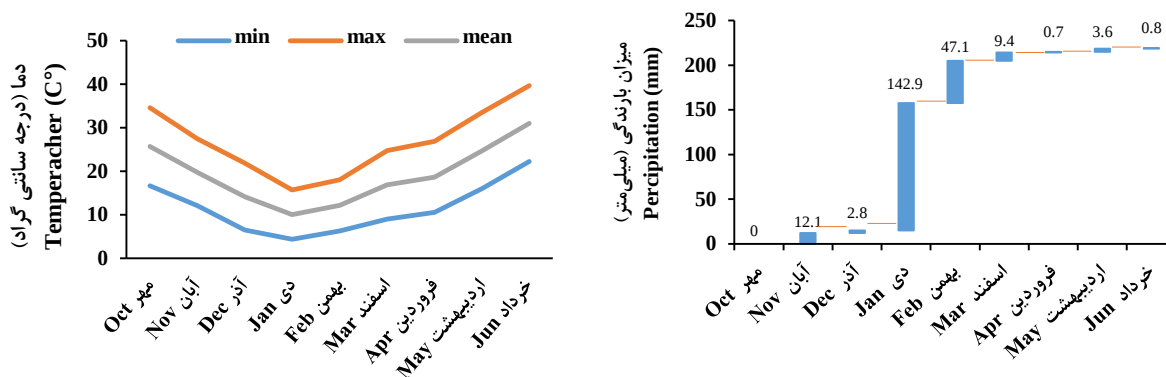
ژنوتیپ genotype	Origin PHBWT*	منشأ AHBYT**	Pedigree	شجره
1	PH-1	CH-1	LOOT	
2	PH-20	CH-2	LINAZA-BAR/HIGO/4/CEDRO//MATNAN/EH165/3/MATICO/5/RABANO/CHINIA//HIGO/6/ PETUNIA2 (EH-87-4)	
3	PH-3	AH 1-3	Aths/Lignee686/5/Alanda-01/4/WI2291/3/Api/CM67//L2966-69/6/Atahualpa/7/CANELA/GOB//ALELI	
4	PH-5	AH 1-5	VMorales/6/LEGACY//PENCO/CHEVRON-BAR	
5	PH-7	AH 1-7	PETUNIA 1/PEREGRINE	
6	PH-8	AH 1-8	Atahualpa/IraqiBlack/6/Viringa'S'//WI2291/WI2269/5/Atahualpa/4/300Union/Sv73608//Perugia/3/ W28G15-1-N/Weihestephani173	
7	PH-9	AH 1-9	J09046F310/030549J09046F310/030549-0TR-10MR	
8	PH-11	AH 1-11	BF891M-617/4/Hma-02//11012-2/CM67/3/Arar/5/BlackTaridana	
9	PH-13	AH 1-13	CABUYA/MJA//PETUNIA1/5/PENCO/CHEVRONBAR/3/ATACO/BERMEJO//HIGO/4/PETUNIA1	
10	PH-14	AH 1-14	PENCO/CHEVRON-BAR/3/LEGACY//PENCO/CHEVRON-BAR	
11	PH-18	AH 1-18	CABUYA/MJA//PETUNIA1/5/PENCO/CHEVRON-AR/3/ATACO/BERMEJO//HIGO/4/PETUNIA 1	
12	PH-46	AH 2-6	ZIGZIG/3/ZVA/PETUNIA 1//CABUYA	
13	PH-54	AH 2-10	ICNB93-369/5/Roho/4/Zanbaka/3/ER/Apm//Lignee131	
14	PH-55	AH 2-11	Atahualpa/IraqiBlack/7/W13159/6/ANCA/2469//TOJI/3/SHYRI/4/ATACO/5/ALELI	
15	PH 56	AH 2-12	Assiya	
16	PH-59	AH 2-14	WI3257/4/ALISO/CI3909-2//HB602/3/MOLA/SHYRI//ARUPO*2/JET/5/DD-21/WI3257	
17	PH-65	AH 2-16	NB1054/Aleli//Gairdnaer/3/DD-21/WI3257	
18	PH-71	AH 2-17	NACKTA/HJA A33//FNC1/3/Sebastian	
19	PH-72	AH 2-19	C1-12//UC1134/Lacey	
20	PH-10	CH-3	PETUNIA1/8/POST/COPAL/5/GLORIA-BAR/4/SOTOL//2762/BC-B/3/11012.2/TERN-B//H272/6/ SIND89A -148/7/CARDO (EH-85-9)	

*: آزمایشات مقدماتی انجام شده در داراب و اهواز؛ **: آزمایش پیشرفته انجام شده در مناطق داراب، اهواز و گرگان

*: Preliminary experiments conducted in Darab and Ahvaz; **: Advanced experiments conducted in Darab, Ahvaz and Gorgan regions

شد به‌نحوی که دوره پر شدن تاریخ کشت دوم به دمای بالاتر از دمای رشد و نمو جو برخورد نماید. اطلاعات هواشناسی داراب در شکل ۱ نشان داده شده است.

به‌منظور اعمال تنش گرما و مقایسه آن با شرایط دمای مطلوب، کاشت ارقام و لاین‌های موردنظر در دو تاریخ کاشت مناسب منطقه (۱۵ آذر) و کشت دیر هنگام (۱۹ دی) انجام



شکل ۱. داده‌های هواشناسی ماهیانه در سال زراعی ۱۴۰۲-۱۴۰۱ در داراب.

Fig. 1. Monthly meteorological data in 2022–2023 cropping year in Darab.

عملکرد دانه در هر دو شرایط تنش گرمایی (Ys) و بدون تنش (Yp) استفاده شد.

محاسبه شاخص MGIDI

برای محاسبه شاخص MGIDI (Olivoto and Nardino, 2020) از روابط ۱، ۲ و ۳ استفاده شده و مراحل محاسبه آن به‌صورت زیر است:

۱- تغییر مقیاس شاخص‌ها/صفات:

یک جدول دوطرفه با i ردیف یا ژنوتیپ و j ستون یا صفت است. مقدار تغییر مقیاس یافته برای ردیف i و ستون j (rX_{ij}) به‌صورت رابطه ۱ محاسبه گردید:

$$rX_{ij} = \frac{\eta_{nj} - \varphi_{nj}}{\eta_{oj} - \varphi_{oj}} \times (\theta_{ij} - \eta_{oj}) + \eta_{nj} \quad [1]$$

η_{oj} و φ_{oj} به ترتیب مقادیر اصلی حداقل و حداکثر برای صفت j در تمام ژنوتیپ‌ها هستند. η_{nj} و φ_{nj} به ترتیب مقادیر حداقل و حداکثر برای صفت j پس از تغییر مقیاس هستند و θ_{ij} مقدار اصلی برای صفت j از ژنوتیپ i ام است. برای تغییر مقیاس، مقادیر η_{nj} و φ_{nj} به‌صورت زیر محاسبه شدند: برای صفاتی که در آن‌ها مقدار بالا موردنظر است، φ_{nj} برابر با صفر و η_{nj} برابر با ۱۰۰ در نظر گرفته شد، درحالی‌که برای صفاتی که در آن‌ها مقدار پایین موردنظر بود، φ_{nj} برابر با ۱۰۰ و η_{nj} برابر با صفر در نظر گرفته شد. در جدول دوطرفه تغییر مقیاس یافته (rX_{ij})، هر ستون دارای محدوده ۰-۱۰۰ است که مفهوم انتخاب موردنظر (افزایش یا کاهش) را در نظر می‌گیرد و ساختار همبستگی مجموعه اصلی متغیرها را حفظ می‌کند.

زمین مورد کشت تحت تناوب غلات-آیش بوده و عملیات تهیه زمین شامل یک نوبت شخم بهاره، یک نوبت شخم قبل از کاشت، دو نوبت دیسک، دو بار لولر عمود برهم، کودپاشی و ایجاد فارو بود. بذور آزمایشی قبل از کاشت به‌منظور جلوگیری از سیاهک پنهان و بیماری‌های بذرزاد با قارچ‌کش کاربوکسین تیرام به نسبت سه در هزار ضدعفونی گردید. میزان بذر مصرفی با در نظر گرفتن وزن هزار دانه و بر اساس ۴۰۰ بذر در مترمربع برای هر ژنوتیپ تعیین گردید. کشت بر روی پشته و همچنین آبیاری به‌صورت نوار تیپ انجام گرفت. هر کرت آزمایشی شامل ۶ خط ۵ متری به فاصله ۲۰ سانتی-متر بود. کودهای مورد استفاده شامل سولفات پتاس (۵۰ کیلوگرم در هکتار) و فسفات آمونیوم (۱۰۰ کیلوگرم در هکتار) و اوره (۱۵۰ کیلوگرم در هکتار) بود. کودهای پتاس و فسفر به‌صورت پایه و کود اوره به‌صورت سرک به مصرف رسید. برای مبارزه با علف‌های هرز پهن‌برگ و باریک برگ، مخلوطی از علف‌کش‌های 2-4-D و اکسیال در مرحله شروع پنجه‌زنی استفاده شد.

برای ارزیابی واکنش ژنوتیپ‌ها نسبت به تنش گرمایی از شاخص‌های جدول ۲ استفاده شد. همچنین به‌منظور ادغام شاخص‌های مختلف تحمل به تنش گرمایی و انتخاب بهتر ژنوتیپ‌ها از نظر تحمل به تنش گرمایی از شاخص‌های SIIG (Zali et al., 2015; Zali et al., 2023a)، FAI-BLUP (Rocha et al., 2018)، MGIDI (Olivoto and Nardino, 2020) و CSI (Sabouri et al., 2022) استفاده شد. برای محاسبه شاخص CSI از شاخص‌هایی استفاده شده که همبستگی معنی‌داری با Yp و Ys داشتند و برای محاسبه شاخص SIIG، FAI-BLUP و MGIDI علاوه بر شاخص-هایی که همبستگی معنی‌داری با Yp و Ys داشتند، از

$$D = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nm} \end{bmatrix} \quad [4]$$

در این ماتریس x_{ij} مقدار ژنوتیپ i ام ($i = 1, 2, \dots, n$) در رابطه با صفت (شاخص) j ام ($j = 1, 2, \dots, m$) بود. به عبارت دیگر ردیف‌ها را ژنوتیپ‌ها و ستون‌ها را شاخص‌ها تشکیل دادند.

۲- تبدیل ماتریس داده‌های اولیه (ماتریس D) به یک ماتریس استاندارد (ماتریس R): از رابطه ۵ برای استاندارد کردن داده‌ها (بدون واحد کردن داده‌ها) استفاده شد:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_{ij}^2}} \quad [5]$$

در رابطه ۵، بعد از استاندارد نمودن داده‌های اولیه (ماتریس D)، ماتریس R به صورت رابطه ۶ تعریف گردید:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & r_{nm} \end{bmatrix} \quad [6]$$

۳- پیدا کردن ژنوتیپ ایده‌آل و ژنوتیپ غیرایده‌آل (ضعیف) برای هر شاخص: در این مرحله با توجه به نوع شاخص مشخص شد مقدار بالای یک شاخص ایده‌آل است یا مقادیر پایین آن. به عنوان مثال در مورد شاخص تحمل (TOL)، حداقل مقدار TOL یک ژنوتیپ مقدار ایده‌آل و بیشترین مقدار TOL به عنوان غیرایده‌آل (ضعیف) در نظر گرفته شد. ۴- محاسبه فاصله از ژنوتیپ‌های ایده‌آل (di^+) و ژنوتیپ‌های ضعیف (di^-): در این مرحله برای هر ژنوتیپ، فاصله از ژنوتیپ‌های ایده‌آل (di^+) و ژنوتیپ‌های ضعیف (di^-) به ترتیب با استفاده از روابط ۷ و ۸ محاسبه شد.

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m (r_{ij} - r_j^+)^2} \quad i=1, 2, \dots, n \quad [7]$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (r_{ij} - r_j^-)^2} \quad i=1, 2, \dots, n \quad [8]$$

در روابط ۷ و ۸، r_{ij} مقدار استاندارد شده ژنوتیپ i ام ($i = 1, 2, \dots, n$) در رابطه با شاخص j ام ($j = 1, 2, \dots, m$) است. r_j^+ و r_j^- به ترتیب مقادیر استاندارد شده ژنوتیپ‌های ایده‌آل و ژنوتیپ‌های ضعیف برای هر شاخص j ام ($j = 1, 2, \dots, m$) است.

۵- محاسبه شاخص انتخاب ژنوتیپ ایده‌آل (SIIG): در آخرین مرحله برای محاسبه شاخص انتخاب ژنوتیپ ایده‌آل برای هر لاین یا ژنوتیپ از رابطه ۹ استفاده شد:

۲- تجزیه به عامل‌ها:

در مرحله بعد، تحلیل عاملی (FA) برای محاسبه کاهش ابعاد داده‌ها و ساختار روابط انجام شد. این تحلیل بر اساس رابطه ۲ انجام شد:

$$F = Z(A^T R^{-1})^T \quad [2]$$

که در آن F یک ماتریس $g \times f$ با مقادیر عامل‌ها است، Z یک ماتریس $g \times p$ با میانگین استاندارد شده (تغییر مقیاس یافته) است، A یک ماتریس $p \times f$ از بارگذاری متعارف^۱ است و R یک ماتریس همبستگی $p \times p$ بین صفات است. علاوه بر این g ، f و p به ترتیب تعداد ژنوتیپ‌ها، عامل‌های باقیمانده (عامل‌هایی که مقدار ویژه آن‌ها از یک بیشتر است) و شاخص‌های محاسبه شده را نشان می‌دهند.

۳- تعریف ژنوتیپ ایده‌آل (ایدئوتیپ):

طبق تعریف رابطه (۱)، ایدئوتیپ دارای بالاترین مقدار تغییر مقیاس (۱۰۰) برای صفاتی است که افزایش آن‌ها مطلوب است و برای صفاتی که کاهش آن‌ها مطلوب باشد تغییر مقیاس صفر است؛ بنابراین، ایدئوتیپ را می‌توان با یک بردار $I [1 \times p]$ تعریف کرد به طوری که I برابر ۱۰۰، ۱۰۰، ...، ۱۰۰ باشد. نمرات I نیز بر اساس رابطه (۲) تخمین زده شدند.

۴- محاسبه شاخص MGIDI:

در مرحله آخر، فاصله اقلیدسی بین نمرات ژنوتیپ‌ها و ژنوتیپ‌های ایده‌آل به عنوان شاخص MGIDI با استفاده از رابطه ۳ محاسبه شد:

$$MGIDI = \sum_{i=1}^f \left[(\gamma_{ij} - \gamma_j^+)^2 \right]^{0.5} \quad [3]$$

γ_{ij} امتیاز i امین ژنوتیپ در فاکتور j ام است ($i = 1, 2, \dots, t$; $j = 1, 2, \dots, f$) که t و f به ترتیب تعداد ژنوتیپ‌ها و عامل‌ها است، γ_j^+ نمره j ام ایدئوتیپ است. ژنوتیپ‌هایی با کمترین مقدار MGIDI به ژنوتیپ ایده‌آل نزدیک تر هستند. دیفرانسیل انتخاب برای همه شاخص‌ها با در نظر گرفتن شدت انتخاب ۲۰ درصد انجام شد.

محاسبه شاخص SIIG:

به منظور ادغام شاخص‌های مختلف تحمل به خشکی جدول ۲، از شاخص SIIG استفاده شد که نحوه محاسبه این شاخص به شرح ذیل بود (Zali et al., 2015; Zali et al., 2023a):

۱- تشکیل ماتریس داده‌ها: ماتریس داده‌ها به صورت رابطه ۴ تشکیل شد (ماتریس D).

^۱ - Canonical loadings

جدول ۲. فرمول‌های ریاضی شاخص‌های مختلف تحمل و حساسیت.

Table 2. Mathematical formulas of tolerance and susceptibility indices.

شاخص‌ها Indices	فرمول Formula	الگوی انتخاب Pattern of selection	منابع References
شاخص تحمل (TOL) Tolerance index	$TOL = Y_p - Y_s$	پایین‌ترین مقدار Minimum value	Rosielle and Hamblin, 1981
شاخص میانگین تولید (MP) Mean productivity	$MP = \frac{Y_p + Y_s}{2}$	بالاترین مقدار Maximum value	Rosielle and Hamblin, 1981
شاخص حساسیت به تنش (SSI) Stress index	$SSI = \frac{1 - \frac{Y_{si}}{Y_{pi}}}{SI}, SI = 1 - \frac{Y_s}{Y_p}$	پایین‌ترین مقدار Minimum value	Fischer and Maurer, 1978
میانگین هندسی عملکرد (GMP) Geometric mean productivity	$GMP = \sqrt{Y_p \times Y_s}$	بالاترین مقدار Maximum value	Fernandez, 1992
شاخص تحمل به تنش (STI) Stress tolerance index	$STI = \frac{Y_p \times Y_s}{(\bar{Y}_p)^2}$	بالاترین مقدار Maximum value	Fernandez, 1992
میانگین هارمونیک عملکرد (HM) Harmonic mean	$HM = \frac{2(Y_p \times Y_s)}{Y_p + Y_s}$	بالاترین مقدار Maximum value	Bidinger et al., 1987
شاخص تنش نسبی (RSI) Relative stress index	$RSI = (Y_s / Y_p) / (\bar{Y}_s / \bar{Y}_p)$	بالاترین مقدار Maximum value	Fischer and Wood, 1979
شاخص پایداری عملکرد (YSI) Yield stability index	$YSI = \frac{Y_s}{Y_p}$	بالاترین مقدار Maximum value	Bouslama and Schapaugh, 1984
شاخص عملکرد (YI) Yield index	$YI = \frac{Y_s}{\bar{Y}_s}$	بالاترین مقدار Maximum value	Gavuzzi et al., 1997

که در آن P_{ij} احتمال مشابه بودن ژنوتیپ i ام ($i=1, 2, \dots, n$) با ایدئوتیپ j ام ($j=1, 2, \dots, m$)؛ d_{ij} فاصله ژنوتیپ-ایدئوتیپ از ژنوتیپ i ام تا ایدئوتیپ j ام بر اساس میانگین استاندارد فاصله اقلیدسی است (Rocha et al., 2018).

محاسبه شاخص CSI:

شاخص CSI بر مبنای ترکیب خطی شاخص‌هایی که همبستگی معنی‌داری با Y_p و Y_s دارند (شاخص‌های معنی-دار) محاسبه می‌شود (رابطه ۱۱).

$$CSI_i = \frac{1}{2} \left(\sum_j^n r_{YP.index_j} \times index_{ij} + \sum_j^n r_{YS.index_j} \times index_{ij} \right) \quad [11]$$

در رابطه ۱۱، $r_{YP.index_j}$ نشان‌دهنده همبستگی بین شاخص j و Y_p و $r_{YS.index_j}$ همبستگی بین شاخص j و Y_s است. $index_{ij}$ مقدار شاخص j در ژنوتیپ i است. برای محاسبه شاخص CSI، شاخص‌های معنی‌دار ابتدا با استفاده از رابطه ۵ استاندارد شدند. منظور از شاخص‌های معنی‌دار، شاخص‌هایی می‌باشند که همبستگی معنی‌داری با عملکرد دانه در هر دو شرایط موردبررسی (تنش و بدون تنش) دارند. بر مبنای

$$SIIG_i = \frac{d_i}{d_i + d_i^+} \quad i=1, 2, \dots, n, \quad 0 \leq SIIG_i \leq 1 \quad [9]$$

مقدار $SIIG_i$ بین صفر تا یک تغییر می‌کند و هر چه گزینه موردنظر به ژنوتیپ ایده‌آل نزدیک‌تر باشد مقدار $SIIG_i$ آن به یک نزدیک‌تر خواهد بود. بر اساس این روش، بهترین ژنوتیپ، نزدیک‌ترین ژنوتیپ به ژنوتیپ‌های ایده‌آل و دورترین از ژنوتیپ‌های ضعیف است (Zali et al., 2015; Zali et al., 2023a).

شاخص FAI-BLUP

شاخص FAI-BLUP یک شاخص چند صفتی مبتنی بر تحلیل عاملی است و بر اساس فاصله هر کدام از ژنوتیپ‌ها از ژنوتیپ ایده‌آل (ایدئوتیپ) برآورد گردید. پس از تعیین ایدئوتیپ، فواصل هر ژنوتیپ بر اساس ایدئوتیپ (فاصله ژنوتیپ-ایدئوتیپ) برآورد و به احتمال خاصی^۶ تبدیل شده و رتبه‌بندی ژنوتیپ‌ها را امکان‌پذیر می‌کند. از رابطه ۱۰ برای محاسبه شاخص FAI-BLUP استفاده شد:

$$P_{ij} = \frac{\frac{1}{d_{ij}}}{\sum_{i=1:n; j=1:m} \frac{1}{d_{ij}}} \quad [10]$$

⁶ - spatial probability

نتایج نشان داد بیشترین میانگین عملکرد دانه در شرایط بدون تنش به ترتیب متعلق به ژنوتیپ‌های ۱۶، ۱۰، ۹ و ۱۵ با میانگین عملکرد ۶۱۵۵، ۶۰۶۴، ۵۷۶۷ و ۵۷۴۴ کیلوگرم در هکتار بود. بیشترین میانگین عملکرد دانه در شرایط تنش گرمایی نیز به ترتیب در ژنوتیپ‌های ۱۰، ۱۶، ۵ و ۶ با عملکرد ۵۰۹۵، ۴۶۲۸، ۴۴۵۰ و ۴۳۱۴ کیلوگرم در هکتار مشاهده شد. نتایج نشان داد که میانگین عملکرد دانه در شرایط بدون تنش و تنش گرمایی به ترتیب ۴۷۳۰ و ۳۵۵۸ کیلوگرم در هکتار بود (جدول ۴)؛ بنابراین، تنش گرمایی ۲۴/۸ درصد باعث کاهش عملکرد دانه در ژنوتیپ‌های مورد بررسی شده است. قمی و همکاران (Ghomi et al., 2023) و ماهالینگام و همکاران (Mahalingam et al., 2019) به ترتیب کاهش عملکرد ۲۵/۴ و ۲۲/۱ درصدی را در ژنوتیپ‌های جو گزارش نموده‌اند. سایر محققین نیز کاهش عملکرد دانه در شرایط تنش گرمایی در جو (Amal, 2016) و گندم نان (Habibi et al., 2012; Modhej et al., 2016) را گزارش کرده‌اند. از نظر بعضی از محققین برخورد مرحله پر شدن دانه جو با گرما باعث تسریع شدن پیری، کاهش وزن هزار دانه و کاهش طول دوره پر شدن دانه می‌شود؛ بنابراین، عملکرد دانه ژنوتیپ‌های متحمل از طریق سرعت بالای پر شدن در طول دوره کوتاه پر شدن دانه به دست می‌آید (Savin and Nikolass, 1999).

نتایج شاخص‌های مختلف تحمل به گرما و رتبه آن‌ها در جداول ۴ و ۵ نشان داده شده است. نتایج نشان داد بر مبنای شاخص‌های MP، GMP، HM و STI ژنوتیپ‌های ۱۰، ۱۶، ۹ و ۱۱ با بیشترین مقدار این شاخص‌ها جزء ژنوتیپ‌های متحمل به تنش بودند. ژنوتیپ‌های ۶، ۵، ۳ و ۱۸ به ترتیب با بیشترین مقادیر RSI و YSI جزء ژنوتیپ‌های برتر بودند. بر مبنای شاخص YI ژنوتیپ‌های ۱۰، ۱۶، ۵ و ۶ نیز با بیشترین مقدار YI به عنوان ژنوتیپ‌های متحمل به تنش معرفی شدند (جدول ۴). شاخص YSI چون از نسبت عملکرد ژنوتیپ در شرایط تنش به میانگین عملکرد کلیه ژنوتیپ‌ها در شرایط تنش محاسبه می‌شود، بنابراین موجب رتبه‌بندی ارقام برحسب میزان عملکرد تولیدی آن‌ها در محیط تنش می‌گردد (Sio-Se Mardeh et al., 2006). نتایج همبستگی بین شاخص‌های YI و Ys دقیقاً تأییدکننده این مطلب است (شکل ۲).

نتایج شاخص‌های TOL و SSI نشان داد که ژنوتیپ‌های ۶، ۵ و ۳ با کمترین مقدار این شاخص‌ها جزء ژنوتیپ‌های

شاخص CSI ژنوتیپ‌هایی برتر می‌باشند بیشترین مقدار را داشته باشند (Sabouri et al., 2022).

به منظور انجام تجزیه واریانس از نرم‌افزار SAS استفاده شد. برای محاسبه شاخص SIIG از برنامه تهیه‌شده در محیط برنامه‌نویسی R (Zali et al., 2023a) و برای رسم نمودار شاخص SIIG نیز از برنامه تهیه‌شده در محیط برنامه‌نویسی R و برای برآورد شاخص MGIDI، شاخص FAI-BLUP و محاسبه همبستگی بین شاخص‌ها از بسته تجزیه آزمایش‌های چند محیطی (metan) در محیط برنامه‌نویسی R استفاده شد (Olivoto and Nardino, 2020). برای انجام تجزیه به مؤلفه‌های اصلی و ترسیم بای پلات از بسته factoextra در محیط برنامه‌نویسی R استفاده شد (Kassambara and Mundt, 2020). برای محاسبه شاخص‌های تحمل یا حساسیت به خشکی (جدول ۲) و شاخص CSI (Sabouri et al., 2022) از نرم‌افزار Excel استفاده شد.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس عملکرد دانه ژنوتیپ‌های جو در شرایط تنش و بدون تنش نشان داد که اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد بین ژنوتیپ‌ها در هر دو شرایط تنش گرمایی و بدون تنش وجود دارد. معنی‌دار شدن اثر ژنوتیپ‌ها حاکی از متفاوت بودن توان ژنتیکی ژنوتیپ‌ها در بروز صفت عملکرد دانه است (جدول ۳).

جدول ۳. تجزیه واریانس (میانگین مربعات) عملکرد دانه در ژنوتیپ‌های جو.

Table 3. Analysis of variance (Mean of square) of grain yield in barley genotypes.

منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی df	شرایط بدون تنش	
		Under non-stress	شرایط تنش گرمایی under heat stress conditions
تکرار Rep	2	959939**	358019**
ژنوتیپ Genotype	19	2000274**	1878314**
خطا Error	38	303793**	467293
ضریب تغییرات CV (%)		11.6	19.2

** : معنی‌دار بودن در سطح احتمال ۱ درصد

***: Significant at the 1% probability level.

نشان دهند. از نظر محققین شاخص SSI برای اصلاح تحت تنش‌هایی با شدت کم مناسب است، در صورتی که شاخص‌های MP، GMP و STI برای تنش‌هایی با شدت بالا پیشنهاد می‌شوند (Sio-Se Mardeh et al., 2006).

متحمل بودند. بر مبنای شاخص‌های SSI و TOL ممکن است ژنوتیپ‌هایی انتخاب شوند که دارای رتبه عملکرد دانه پایین در شرایط بدون تنش و رتبه عملکرد دانه بالا در شرایط تنش باشند (جدول ۴)؛ بنابراین ممکن است این شاخص‌ها در تمایز ژنوتیپ‌های با عملکرد بالا کارایی کمتری از خود

جدول ۴. میانگین عملکرد دانه در شرایط بدون تنش و تنش گرمایی و شاخص‌های مختلف تحمل به گرمایی در ژنوتیپ‌های جو.

Table 4. Average grain yield under non-stress and heat stress conditions and different heat tolerance indices at barley genotypes

Gen	Yp	Ys	MP	GMP	HM	STI	YI	RSI	YSI	TOL	SSI
G1	5194	3528	4361	4281	4202	0.819	0.992	0.903	0.679	1666	1.295
G2	3609	2839	3224	3201	3178	0.458	0.798	1.046	0.787	770	0.861
G3	4217	3739	3978	3971	3963	0.705	1.051	1.179	0.887	478	0.457
G4	3688	2050	2869	2750	2636	0.338	0.576	0.739	0.556	1638	1.792
G5	4756	4450	4603	4600	4598	0.946	1.251	1.244	0.936	306	0.259
G6	4493	4314	4403	4402	4401	0.866	1.212	1.276	0.960	179	0.161
G7	4383	2808	3596	3508	3423	0.550	0.789	0.852	0.641	1575	1.450
G8	4003	2906	3454	3410	3367	0.520	0.817	0.965	0.726	1097	1.106
G9	5767	4158	4963	4897	4832	1.072	1.169	0.959	0.721	1608	1.126
G10	6064	5095	5579	5558	5537	1.381	1.432	1.117	0.840	969	0.645
G11	5592	4075	4834	4774	4715	1.019	1.145	0.969	0.729	1516	1.094
G12	4536	2664	3600	3476	3357	0.540	0.749	0.781	0.587	1872	1.666
G13	4550	3897	4224	4211	4198	0.793	1.095	1.139	0.856	653	0.579
G14	3642	3153	3397	3388	3380	0.513	0.886	1.151	0.866	489	0.542
G15	5744	3689	4717	4603	4493	0.947	1.037	0.854	0.642	2055	1.444
G16	6155	4628	5392	5337	5283	1.273	1.301	0.999	0.752	1528	1.002
G17	3683	3111	3397	3385	3373	0.512	0.874	1.123	0.845	572	0.627
G18	4816	4233	4525	4515	4506	0.911	1.190	1.168	0.879	583	0.489
G19	4636	2906	3771	3670	3572	0.602	0.817	0.833	0.627	1730	1.506
G20	5072	2920	3996	3848	3706	0.662	0.821	0.765	0.576	2152	1.713
Mean	4730	3558	4144	4089	4036	0.771	1.000	1.003	0.755	1172	0.991

Yp: عملکرد ژنوتیپ‌ها در شرایط نرمال، Ys: عملکرد ژنوتیپ‌ها در محیط تحت تنش، MP: شاخص میانگین بهره‌وری، GMP: شاخص میانگین بهره‌وری هندسی، HM: شاخص میانگین هارمونیک، STI: شاخص تحمل به تنش، YI: شاخص عملکرد، RSI: شاخص تنش نسبی، YSI: شاخص پایداری عملکرد، TOL: شاخص تحمل، SSI: شاخص حساسیت به تنش

Yp: Yield of genotypes under normal conditions, Ys: Yield of genotypes under stress, MP: Mean productivity index, GMP: Geometric mean productivity index, HM: Harmonic mean index, STI: Stress tolerance index, YI: Yield index, RSI: Relative stress index, YSI: Yield stability index, TOL: Tolerance index, SSI: Stress susceptibility index

دارای بیشترین سهم بودند؛ بنابراین، مؤلفه اول می‌تواند بیانگر تحمل به تنش گرمایی باشد و دومین مؤلفه حساسیت به تنش را نشان می‌دهد. نتایج مشابهی نیز توسط شاهمرادی و زهراوی (Shahmoradi and Zahravi, 2016) در ژنوتیپ-های جو گزارش شده است.

از روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA) به منظور بررسی ارتباط بین شاخص‌های مختلف تحمل به گرما و گروه‌بندی آن‌ها استفاده شد. سهم اولین و دومین مؤلفه در توجیه تغییرات ارتباط بین شاخص‌ها به ترتیب ۶۶/۶ و ۳۳/۲۴ درصد بود (شکل C3). در اولین مؤلفه شاخص‌های Ys، YI، HM، GMP و STI (شکل A3) و در دومین مؤلفه شاخص‌های Yp، SSI، RSI، YSI، TOL (شکل B3) به ترتیب

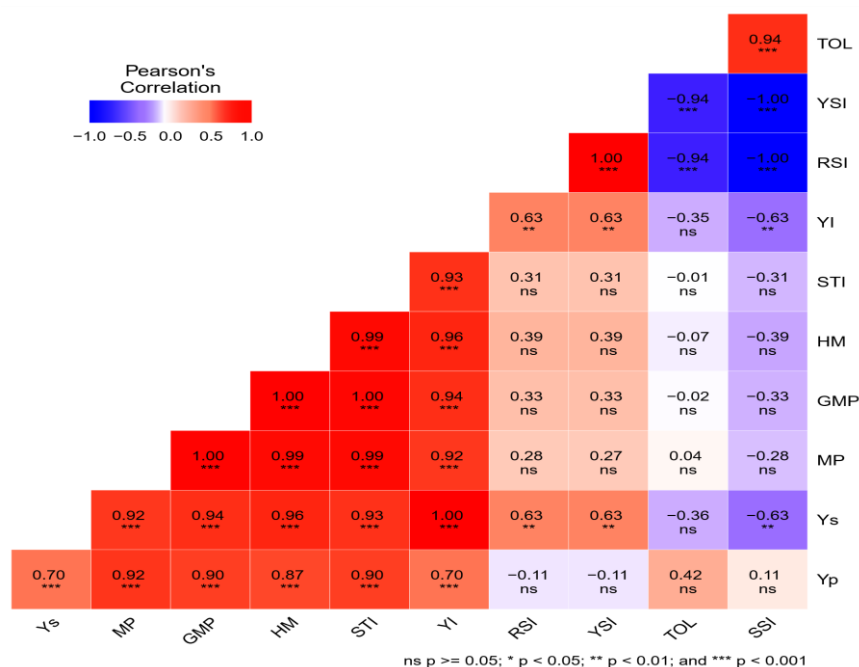
جدول ۵. رتبه عملکرد دانه در شرایط بدون تنش و تنش گرمایی انتهایی فصل و شاخص‌های مختلف تحمل به گرما در ژنوتیپ‌های جو لخت.

Table 5. Rank of grain yield under non-stress and heat stress conditions and different heat tolerance indices at hull-less barley genotypes

Gen	Yp	Ys	MP	GMP	HM	STI	YI	RSI	YSI	TOL	SSI
G1	6	11	9	9	9	9	11	14	14	16	14
G2	20	17	19	19	19	19	17	9	9	8	9
G3	15	9	12	11	11	11	9	3	3	3	3
G4	17	20	20	20	20	20	20	20	20	15	20
G5	9	3	6	6	5	6	3	2	2	2	2
G6	13	4	8	8	8	8	4	1	1	1	1
G7	14	18	15	14	14	14	18	16	16	13	16
G8	16	15	16	16	17	16	16	12	12	10	12
G9	3	6	3	3	3	3	6	13	13	14	13
G10	2	1	1	1	1	1	1	8	8	9	8
G11	5	7	4	4	4	4	7	11	11	11	11
G12	12	19	14	15	18	15	19	18	18	18	18
G13	11	8	10	10	10	10	8	6	6	7	6
G14	19	12	18	17	15	17	12	5	5	4	5
G15	4	10	5	5	7	5	10	15	15	19	15
G16	1	2	2	2	2	2	2	10	10	12	10
G17	18	13	17	18	16	18	13	7	7	5	7
G18	8	5	7	7	6	7	5	4	4	6	4
G19	10	16	13	13	13	13	15	17	17	17	17
G20	7	14	11	12	12	12	14	19	19	20	19

Yp: عملکرد ژنوتیپ‌ها در شرایط نرمال، Ys: عملکرد ژنوتیپ‌ها در محیط تحت تنش، MP: شاخص میانگین بهره‌وری، GMP: شاخص میانگین بهره‌وری هندسی، HM: شاخص میانگین هارمونیک، STI: شاخص تحمل به تنش، YI: شاخص عملکرد، RSI: شاخص تحمل نسبی، YSI: شاخص پایداری عملکرد، TOL: شاخص تحمل، SSI: شاخص حساسیت به تنش

Yp: Yield of genotypes under normal conditions, Ys: Yield of genotypes under stress, MP: Mean productivity index, GMP: Geometric mean productivity index, HM: Harmonic mean index, STI: Stress tolerance index, YI: Yield index, RSI: Relative stress index, YSI: Yield stability index, TOL: Tolerance index, SSI: Stress susceptibility index

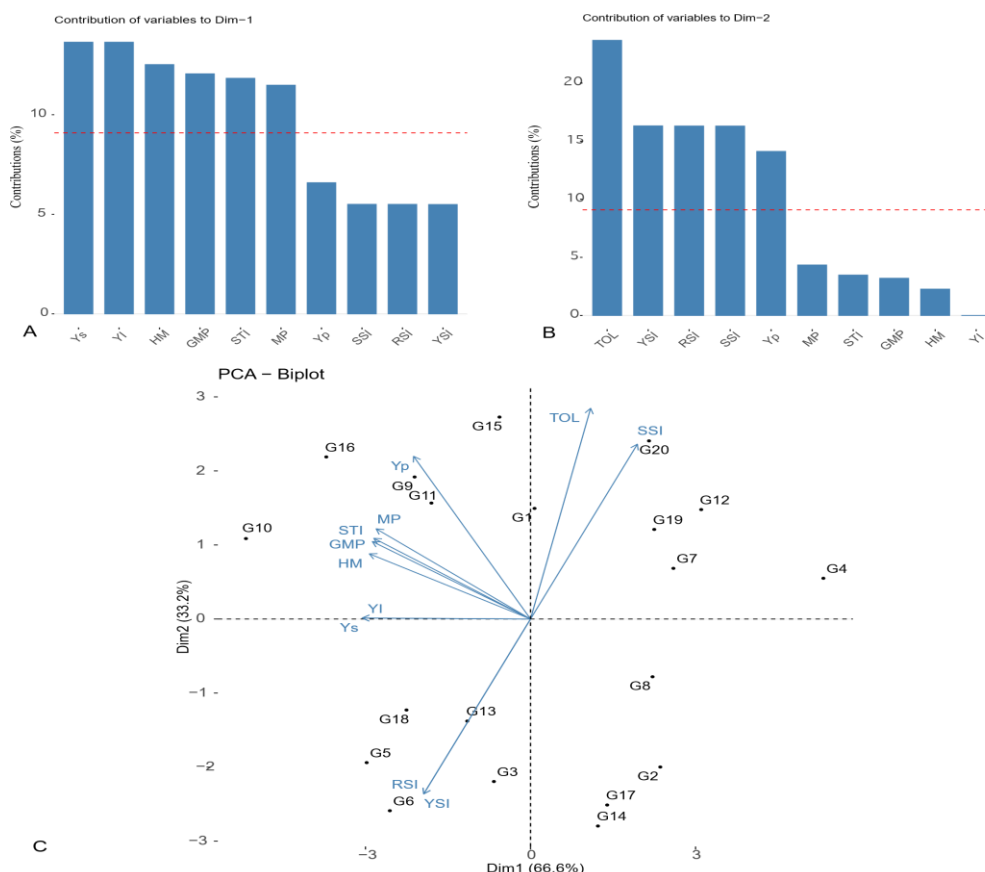


شکل ۲. همبستگی شاخص‌های مختلف تحمل به گرمایی در ژنوتیپ‌های جو لخت. Yp: عملکرد در شرایط بدون تنش؛ Ys: عملکرد در شرایط تنش؛ TOL: شاخص تحمل؛ SSI: شاخص حساسیت به تنش؛ MP: میانگین تولید؛ GMP: میانگین هندسی عملکرد؛ STI: شاخص تحمل تنش؛ HM: میانگین هارمونیک؛ YI: شاخص عملکرد؛ YSI: شاخص پایداری عملکرد؛ RSI: شاخص تحمل نسبی

Fig. 2. Correlation of different heat tolerance indices at hull-less barley genotypes. Yp: Yield under non-stress condition; Ys: Yield under stress condition; TOL: Tolerance index; SSI: Stress susceptibility Index; MP: Mean Productivity; GMP: Geometric mean productivity; STI: Stress tolerance index; HM: Harmonic mean; YI: Yield index; YSI: Yield stability index; RSI: Relative stress index

تنش بالاترین عملکرد دانه را به خود اختصاص داده‌اند. در تحقیقی که به منظور شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل به تنش گرمایی در جو انجام شد شاخص‌های Y_s , YI , HM , GMP , STI و MP در یک گروه قرار گرفتند (Ghomi et al., 2023). گروه سوم شامل شاخص‌های RSI و YSI بود و ژنوتیپ‌های ۵، ۶ و ۱۸ در این گروه قرار دارند. درواقع این ژنوتیپ‌ها دارای رتبه عملکرد بهتری در شرایط تنش گرمایی نسبت به شرایط بدون تنش می‌باشند. در گروه چهار ژنوتیپ‌های ۲، ۳، ۴، ۷، ۸، ۱۲، ۱۳، ۱۴، ۱۷ و ۱۹ قرار داشتند در این گروه هیچ‌کدام از شاخص‌ها قرار نداشتند. درواقع این ژنوتیپ‌ها دارای رتبه عملکرد پایینی در هر دو شرایط تنش و بدون تنش بودند.

بر مبنای بای پلات شکل C3 که ۹۹/۸ درصد تغییرات را بیان نموده است شاخص‌های مختلف در سه گروه و ژنوتیپ‌ها در چهار گروه قرار گرفتند. در گروه اول که شاخص TOL و SSI قرار داشتند، ژنوتیپ‌های ۱، ۱۵ و ۲۰ برتر بودند. درواقع این ژنوتیپ‌ها دارای رتبه عملکرد بالا در شرایط بدون تنش نسبت به شرایط تنش گرمایی می‌باشند. در گروه دو، شاخص‌های GM , HM , STI , YI و Y_p و Y_s قرار داشتند. این نتایج نشان داد که شاخص‌های ناحیه سه، بیش‌ترین همبستگی را با عملکرد دانه در شرایط تنش (Y_s) و بدون تنش (Y_p) داشتند. در ضمن ژنوتیپ‌های ۱۶، ۱۰، ۹ و ۱۱ که در این ناحیه قرار دارند دارای عملکرد دانه بالاتر از متوسط کل هم در شرایط تنش و هم در شرایط بدون تنش بودند. در این گروه ژنوتیپ‌های ۱۶ و ۱۰ در هر دو شرایط تنش و بدون



شکل ۳. (A) نمودار سهم شاخص‌های مختلف در اولین مؤلفه و (B) دومین مؤلفه PCA. (C) بای پلات PCA برای شاخص‌های موردبررسی. Y_p : عملکرد در شرایط بدون تنش؛ Y_s : عملکرد در شرایط تنش؛ TOL : شاخص تحمل؛ SSI : شاخص حساسیت به تنش؛ MP : میانگین تولید؛ GMP : میانگین هندسی عملکرد؛ STI : شاخص تحمل تنش؛ HM : میانگین هارمونیک؛ YI : شاخص عملکرد؛ YSI : شاخص پایداری عملکرد؛ RSI : شاخص تنش نسبی

Fig. 3. (A) The diagram of the contribution of different indices in the first component and (B) the second component of PCA. (C) Biplot of PCA for different investigated indices. Y_p : Yield under non-stress condition; Y_s : Yield under stress condition; TOL : Tolerance index; SSI : Stress susceptibility Index; MP : Mean Productivity; GMP : Geometric mean productivity; STI : Stress tolerance index; HM : Harmonic mean; YI : Yield index; YSI : Yield stability index; RSI : Relative stress index

و Y_s داشتند استفاده شد. تنها تفاوت دو شاخص $SIIG$ و $MGIDI$ با شاخص CSI این بود که برای محاسبه آن‌ها علاوه بر شاخص‌های معنی‌دار، از Y_p و Y_s هم استفاده شد. ولی نتایج هر سه شاخص مشابه بود و ژنوتیپ‌های ۱۰، ۱۶ و ۹ انتخاب شدند. در تحقیقی به‌منظور بررسی تحمل به خشکی تعدادی از ژنوتیپ‌های گندم دوروم از شاخص‌های $SIIG$ ، $MGIDI$ و CSI استفاده شد و از آنجایی که برای محاسبه هر سه شاخص از شاخص‌هایی که همبستگی معنی‌داری با عملکرد دانه در شرایط تنش و بدون تنش داشتند استفاده شد، نتایج شاخص‌های $SIIG$ ، $MGIDI$ و CSI یکسان بود و با نتایج این تحقیق انطباق کامل داشت (Zali and Pour-[2023](#) Aboghadareh, [2023](#)).

از آنجایی که میزان تغییرات شاخص $SIIG$ بین صفر و یک است، هر چه مقدار $SIIG$ برای ژنوتیپی به یک نزدیک‌تر باشد آن ژنوتیپ از تحمل به خشکی بالاتری برخوردار است (Zali [et al.](#), [2015](#))؛ بنابراین یکی از ویژگی‌های شاخص $SIIG$ تعیین فاصله بین ژنوتیپ‌ها است.

گزارش‌های متعددی از کارایی شاخص $SIIG$ در ادغام شاخص‌های مختلف تحمل به تنش‌های غیرزیستی ارائه شده است (Yagoutipour [et al.](#), [2017](#); Ramzi [et al.](#), [2018](#); Abdollahi Hesar [et al.](#), [2021](#); Taleghani and Yagoutipour, [2022](#) Saremirad, [2022](#)). یاقوتی‌پور و همکاران (et al., [2017](#)) از شاخص $SIIG$ به‌منظور ادغام شاخص‌های مختلف تحمل به خشکی در گندم نان استفاده نمودند و بیان داشتند که شاخص $SIIG$ یک روش ترکیبی جدید و کارا در انتخاب مؤثرتر ژنوتیپ‌های مطلوب است. طهماسبی و همکاران (Tahmasebi [et al.](#), [2018](#)) از شاخص $SIIG$ به‌منظور انتخاب ژنوتیپ‌های گندم نان متحمل به خشکی استفاده نمودند. آن‌ها شاخص $SIIG$ را روشی مناسب برای ادغام شاخص‌های مختلف تحمل به خشکی معرفی نمودند که کارایی انتخاب را افزایش می‌دهد.

رمزی و همکاران (Ramzi [et al.](#), [2018](#)) از شاخص $SIIG$ به‌منظور بررسی تحمل لاین‌های پیشرفته گندم دوروم تحت شرایط تنش آلومینیوم استفاده نمودند و بیان شد با جمع شاخص‌های مختلف در قالب یک شاخص تحت عنوان شاخص $SIIG$ کار تصمیم‌گیری راحت‌تر می‌شود.

عبداللهی حصار و همکاران (Abdollahi Hesar [et al.](#), [2021](#)) از شاخص $SIIG$ برای ادغام شاخص‌های مختلف تحمل به یخ‌زدگی استفاده نموده و بیان کردند که شاخص

بهرامی و همکاران (Bahrami [et al.](#), [2020](#)) شاخص STI و باوی و واعظی (Bavei and Vaezi, [2012](#)) شاخص‌های MP ، GMP و STI را به‌عنوان شاخص‌های مناسب برای تفکیک ژنوتیپ‌های متحمل به گرما در گیاه جو معرفی نمودند.

به‌منظور انتخاب نهایی ژنوتیپ‌های متحمل به گرما بر مبنای شاخص‌های تحمل به گرما موردبررسی، از شاخص‌های مختلف ترکیبی $SIIG$ (Zali [et al.](#), [2015](#); Zali [et al.](#), [2023a](#) Olivoto and Nardino, [2020](#))، $MGIDI$ (Rocha [et al.](#), [2018](#))، $FAI-BLUP$ (CSI) (Sabouri [et al.](#), [2022](#)) استفاده شد (شکل ۴). در شاخص‌های ترکیبی به‌منظور افزایش کارایی انتخاب از شاخص‌های معنی‌دار استفاده شد. منظور از شاخص‌های معنی‌دار، آن دسته از شاخص‌هایی می‌باشند که همبستگی معنی‌داری با عملکرد دانه در شرایط تنش و بدون تنش دارند. نتایج نشان داد که شاخص‌های MP ، GMP ، HM ، STI و YI همبستگی بالا و معنی‌داری با عملکرد دانه در هر دو شرایط تنش و بدون تنش دارند (شکل ۲)؛ بنابراین از آن‌ها برای محاسبه شاخص CSI استفاده شد. در ضمن برای محاسبه شاخص $SIIG$ ، $MGIDI$ و $FAI-BLUP$ علاوه بر شاخص‌های MP ، GMP ، HM ، STI و YI از Y_p و Y_s نیز استفاده شد؛ بنابراین، در مجموع ارزش ژنوتیپ‌ها بر اساس بالا بودن مقدار شاخص‌های Y_p ، Y_s ، MP ، GMP ، HM ، STI و YI (جدول ۴) محاسبه شد (شکل ۴).

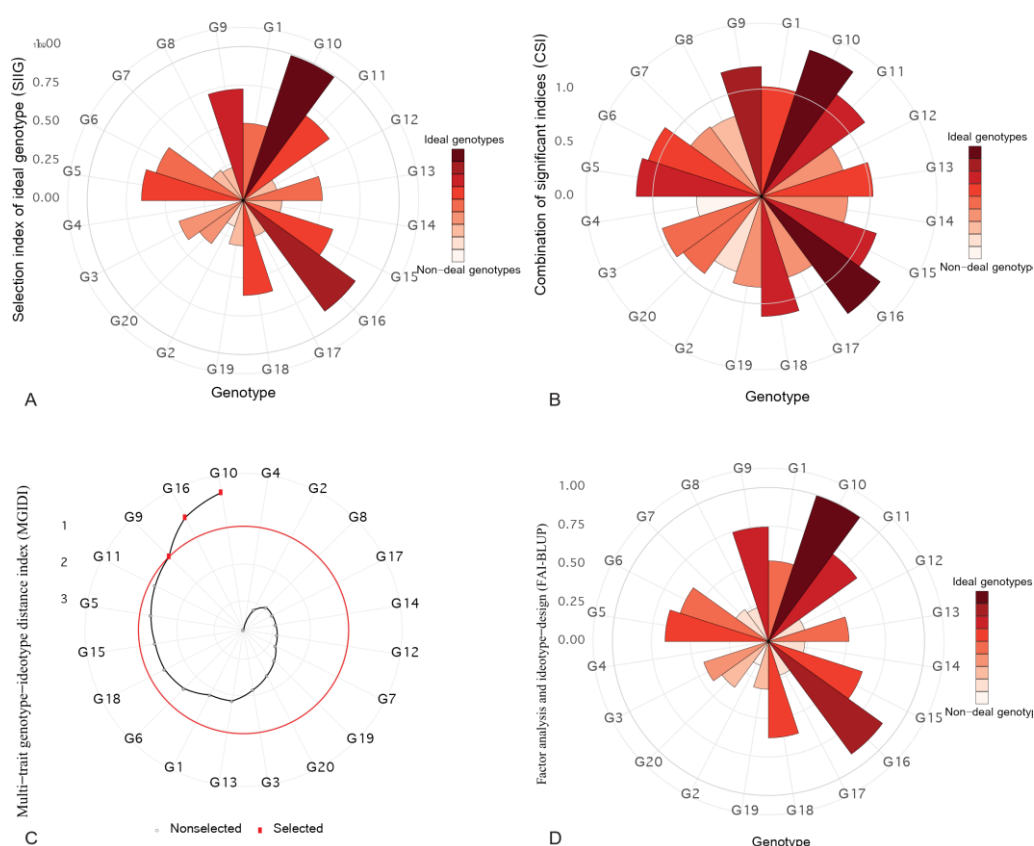
بر مبنای شاخص‌های $SIIG$ (شکل A4) و $FAI-BLUP$ (شکل B4) و CSI (شکل D4) ژنوتیپ‌هایی با بیشترین مقدار جزء ژنوتیپ‌های برتر می‌باشند؛ بنابراین، ژنوتیپ‌های ۱۰، ۱۶ و ۹ به ترتیب با بیشترین مقدار این شاخص‌ها جزء ژنوتیپ‌های متحمل به گرما بودند. در شاخص $MGIDI$ ژنوتیپ‌هایی با کمترین مقدار، ایده‌آل‌ترین ژنوتیپ‌ها هستند؛ بنابراین، ژنوتیپ‌های ۱۰، ۱۶ و ۹ به ترتیب جزء ژنوتیپ‌های متحمل به گرما بودند (شکل C4).

هدف از استفاده از شاخص‌های ترکیبی مانند $FAI-BLUP$ ، $SIIG$ ، $MGIDI$ و CSI انتخاب دقیق‌تر ژنوتیپ‌های برتر است. درواقع با این شاخص‌ها، رتبه‌بندی و تعیین ژنوتیپ‌های برتر بسیار راحت‌تر می‌شود و کارایی انتخاب افزایش می‌یابد (Shirzad [et al.](#), [2021](#); Barati [et al.](#), [2022a](#)). به‌منظور افزایش کارایی انتخاب در این تحقیق از شاخص‌های تحمل به خشکی که همبستگی معنی‌داری با Y_p

MGIDI را به‌عنوان یک شاخص مناسب برای غربال اولیه ژنوتیپ‌های متحمل به تنش خشکی معرفی نمودند. همچنین از شاخص MGIDI برای شناسایی لاین‌های چغندر قند متحمل به خشکی (Talaghani and Saremirad, 2023) و ژنوتیپ‌های کنگد متحمل به تنش غرقابی (Ahsan et al., 2024) استفاده شده است. همچنین استفاده از شاخص MGIDI در شناسایی ژنوتیپ‌های برتر جو برم بنای صفات مورفولوژیک در سایر تحقیقات نیز گزارش شده است (Shirzad et al., 2022b; Pour-Aboughadareha et al., 2023; Zali et al., 2023b).

SIIG یک روش مناسب برای شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل به یخ‌زدگی، از طریق ادغام سایر شاخص‌های دیگر تحمل به یخ‌زدگی است.

از کاربرد شاخص MGIDI در شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل به تنش‌ها گزارش‌های متعددی در دست است. در تحقیقی به‌منظور ارزیابی ژنوتیپ‌های جو متحمل به شوری (Pour-Aboughadareh et al., 2021) از شاخص MGIDI استفاده شده است. در پژوهشی دیگر (Pour-Aboughadareh and Pocza, 2021) به‌منظور ارزیابی ژنوتیپ‌های متحمل به تنش خشکی در گندم نان، شاخص



شکل ۴. الگوی رتبه‌بندی ژنوتیپ‌های جو بر اساس شاخص‌های (A) SIIG، (B) CSI، (C) FAI-BLUP و (D) MGIDI.
Fig. 4. Ranking of barley genotypes based on the SIIG (A), CSI (B), FAI-BLUP (C) and MGIDI (D) indices.

شاخص یک ژنوتیپ پرمحصول و زودرس را شناسایی و معرفی نمودند (Zali et al., 2023b).

در تحقیقی (Bardehji et al., 2023) به‌منظور شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی جو از شاخص CSI استفاده شد. برای محاسبه این شاخص از شاخص‌های MP، GMP، STI و HM که همبستگی معنی‌داری با Yp و Ys داشتند استفاده شد. همچنین کارایی شاخص CSI در ژنوتیپ‌های

کارایی شاخص FAI-BLUP در انتخاب ژنوتیپ‌های سویا توسط ولپاتو و همکاران (Volpato et al., 2021) گزارش شده است. آن‌ها بیان کردند شاخص FAI-BLUP یک ابزار مناسب برای انتخاب هم‌زمان صفات مهم برای اصلاح سویا است. در تحقیق دیگری از شاخص FAI-BLUP برای انتخاب ژنوتیپ‌های برتر جو استفاده شد و بر اساس این

شاخص‌های ترکیبی FAI-BLUP, SIIG, MGIDI و CSI در انتخاب ژنوتیپ‌های برتر کاملاً مشابه بود و برتری خاصی نسبت به یکدیگر نداشتند. تنها تفاوتی که شاخص SIIG با سایر شاخص‌ها داشت در مشخص کردن فاصله بین ژنوتیپ‌ها بود. همچنین بر اساس نتایج شاخص‌های ترکیبی، به ترتیب ژنوتیپ‌های ۱۰، ۱۶ و ۹ جزء ژنوتیپ‌های جو برتر از نظر تحمل به تنش گرمای انتهایی فصل بودند.

متحمل به شوری در خردل نیز گزارش شده است (Kumawat et al., 2024).

نتیجه‌گیری نهایی

درمجموع نتایج نشان داد با انتخاب شاخص‌هایی که همبستگی معنی‌داری با عملکرد دانه در هر دو شرایط تنش و بدون تنش دارند و ادغام آن‌ها با استفاده از شاخص‌های ترکیبی، کارایی گزینش افزایش می‌یابد. از طرفی نتایج

منابع

- Abdollahi Hesar, A., Sofalian, O., Alizadeh, B., Zali, H., Asghari, A., 2021. Investigation of frost stress tolerance in a some promising rapeseed genotypes. *Agricultural Science and Sustainable Production*. 31, 271-288. [In Persian with English Summary]. <https://doi.org/10.22034/saps.2021.13109>
- Ahsan, A.F.M.S., Alam, Z., Ahmed., F., Akter., S., Hossain Khan, Md. A., 2024. Selection of waterlogging tolerant sesame genotypes (*Sesamum indicum* L.) from a dataset using the MGIDI index. *Data in Brief*. 53, 110176. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2024.110176>
- Amal, M.E., 2016. Physiological and biochemical responses to heat stress on barley seedlings and their impact on growth and yield. *Egyptian Journal of Botany*. 56, 319-334. <https://doi.org/10.21608/ejbo.2016.391>
- Bahrami, F., Arzani, A., Rahimmalek, M., 2020. A novel tolerance index to identify heat tolerance in cultivated and wild barley genotypes. *BioRxiv (Biology Archive)*. 1-36. <https://doi.org/10.1101/2020.05.31.125971>
- Barati, A., Zali, H., Marzooqian, A., Koohkan, S.A., Gholipour, A., 2021. Selection of barley pure lines with high yield and desirable agronomic characteristics in warm areas of Iran. *Journal of Crop Production*. 14, 199-218. [In Persian with English Summary]. <https://doi.org/10.22069/ejcp.2021.18845.2403>
- Bardehji, S., Soltan, S., Eshghizadeh, H.R., Zahedi, M., Zare, S., Koçak, M.Z., Nouraein, M., Vita, F., Vergine, M., 2023. Responses of two-row and six-row barley genotypes to elevated carbon dioxide concentration and water stress. *Agronomy*. 13, 2373. <https://doi.org/10.3390/agronomy13092373>
- Bavei, V., Vaezi, B., 2012. Effect of late planting heat stress on yield, yield components and tolerance indices in barley (*Hordeum vulgare* L.). *Iranian Journal of Field Crop Science*. 43, 405-420. [In Persian with English Summary]. <https://doi.org/10.22059/ijfcs.2012.29038>
- Bidinger, F. R., Mahalakshmi, V., Rao, G.D., 1987. Assessment of drought resistance in pearl millet (*Pennisetum americanum* (L.) Leeke). II. Estimation of genotype response to stress. *Australian Journal of Agricultural Research*. 38: 49-59. <https://doi.org/10.1071/AR9870037>
- Bouslama, M., Schapaugh Jr, W. T., 1984. Stress tolerance in soybeans. I. Evaluation of three screening techniques for heat and drought tolerance. *Crop Science*. 24, 933-937. <https://doi.org/10.2135/cropsci1984.0011183X002400050026x>
- FAOSTAT. 2019. Food and Agriculture. Organization Corporate Statistical Database. <https://www.fao.org/faostat/>
- Fernandez, G.C.J., 1992. Effective selection criteria for assessing plant stress tolerance. In: *Proceedings of the International Symposium on Adaptation of Vegetables and other Food Crops in Temperature and Water Stress*, pp., 257-270, 13-16 August, Taiwan.
- Fischer, R.A., Maurer, R., 1978. Drought resistance in spring wheat cultivars. Part 1: grain yield response. *Australian Journal of Agricultural Research*. 29, 897-912. <https://doi.org/10.1071/AR9780897>
- Fischer, R.A., Wood, T., 1979. Drought resistance in spring wheat cultivars III. Yield association with morphological traits. *Australian Journal of Agricultural Research*. 30, 1001-1020. <https://doi.org/10.1071/AR9791001>

- Goldenberg, Z.V., Kvachadze, M.B., 1990. Content of protein and amino acid tryptophan in the grain of some forms of barley. *Soobshcheniya Akademii Nauk Gruzinskoi SSR*. 139, 397-400.
- Gavuzzi, P., Rizza, F., Palumbo, M., Campaline, R.G., Ricciardi, G.L., Borghi, B., 1997. Evaluation of field and laboratory of drought and heat stress in winter cereals. *Canadian Journal of Plant Science*. 77, 523-531. <https://doi.org/10.4141/P96-130>
- Ghomi, Kh., Rabiei, B., Sabouri, H., Gholamali Puralamdari, E., 2023. Evaluation of late season heat in barley genotypes using some susceptibility and tolerance indices. *Environmental Stresses in Crop Sciences*. 15, 1091-1108. [In Persian with English Summary]. <https://doi.org/10.22077/escs.2021.4207.1993>
- Habibi, F., Normohamadi, G., Heidarisharif-Abad, H., Eivazi, A., Majidi-Heravan, A., 2012. Effect of sowing date on cold tolerance and some agronomic traits in bread wheat genotypes at west Azerbaijan province conditions. *World Applied Sciences Journal*. 16, 232-239.
- Jalal Kamali, M.R., Duveiller, E., 2008. Wheat production and research in Iran: A Success Story, P 64-68. In: Reynolds, M.P., Pietragalla, J., Braun, H.J. (eds.), *Proceeding of the International Symposium on Wheat Yield Potential: Challenges to International Wheat Breeding*. CIMMYT. D.F. Mexico.
- Kassambara, A., Mundt, F., 2020. Factoextra: Extract and visualize the results of multivariate data analyses. R package version 1.0.7, <https://CRAN.Rproject.org/package=factoextra>
- Kumawat, G., Jakhar, M. L., Singh, V., Singh, J., Kumar Gothwal, D., Kumar Yadava, D., 2024. High throughput phenotyping of functional traits and key indices for selection of salt tolerant Mustard [*Brassica juncea* (L.) Czern & Coss] genotypes. *Physiologia Plantarum*. 176, e14178. <https://doi.org/10.1111/ppl.14178>
- Mahalingam, R., Bregitzer, P.H., 2019. Impact on physiology and malting quality of barley exposed to heat, drought and their combination during different growth stages under controlled environment. *Physiologia Plantarum*. 165, 277-289. <https://doi.org/10.1111/ppl.12841>
- Modhej, A., Farhoudi, R., Afrous, A., 2015. Effect of post-anthesis heat stress on grain yield of barley, durum and bread wheat genotypes. *Journal of Scientific Research and Development*. 2, 127-131. <https://doi.org/10.22069/ijpp.2012.617>
- Mondal, S., Singh, R.P., Mason, E.R., Huerta-Espino, J., Autrique, E., Joshi, A.K., 2016. Grain yield, adaptation and progress in breeding for early-maturing and heat-tolerant wheat lines in South Asia. *Field Crops Research*. 192, 78-85. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.04.017>
- Olivoto, T., Nardino, M., 2020. toward an effective multivariate selection in biological experiments. *Bioinformatics*. 10, 981-1093. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btaa981>
- Pour-Aboughadareh, A., Poczaib, P., 2021. Dataset on the use of MGIDI index in screening drought-tolerant wild wheat accessions at the early growth stage. *Data in Brief*. 36, 107596. <https://doi.org/10.1101/2020.07.23.217778>
- Pour-Aboughadareh, A., Sanjani, S., Nikkhah-Chamanabad, H., Mehrvar, M. R., Asadi, A. Amini, A., 2021. Identification of salt-tolerant barley genotypes using multiple-traits index and yield performance at the early growth and maturity stages. *Bulletin of the National Research Centre*. 45, 1-17. <https://doi.org/10.1186/s42269-021-00576-0>
- Pour-Aboughadareh, A., Koohkan, S., Zali, H., Marzooghian, A., Gholipour, A., Kheirgo, M., Barati, A., Bocianowski, J., Askari-Kelestani, A., 2023. Identification of high-yielding genotypes of barley in the warm regions of Iran. *Plants*. 12, 1-13. <https://doi.org/10.3390/plants12223837>
- Prasadi, N.V.P., Joye, I.J., 2020. Dietary fiber from whole grains and their benefits on metabolic health. *Nutrients*. 12, 3045. <https://doi.org/10.3390/nu12103045>
- Sabouri, A., Dadras, A. R., Azari, M., Saberi Kouchesfahani, A., Taslimi, M., Jalalifar, R., 2022. Screening of rice drought-tolerant lines by introducing a new composite selection index and competitive with multivariate methods. *Scientific Reports*. 12, 2163. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-06123-9>
- Savin, R., Nicolas, M.E., 1999. Effects of timing of heat stress and drought on growth and quality. *Crop Science*. 136, 257-269
- Shahmoradi, SH., Zahravi, M., 2016. Evaluation of drought tolerance in barley (*Hordeum*

- vulgare* L.) germplasm from warm and dry climates of Iran. Seed and Plant Improvement Journal. 32, 181-200. [In Persian with English Summary].
<https://doi.org/10.22092/spij.2017.111296>
- Shirzad, A., Asghari, A., Zali, H., Sofalian, O., Mohammaddoust Chamanabad, H. R., 2022a. Selection of barley superior lines with desirable agronomic characteristics using the selection index of ideal genotype (SIIG). Journal of Crop Production and Processing. 12, 97-117. [In Persian with English Summary].
<https://doi.org/10.47176/jcpp.12.1.32902>
- Shirzad, A., Asghari, A., Zali, H., Sofalian, O., Mohammaddoust Chamanabad, H., 2022b. Application of the multi-trait genotype-ideotype distance index in the selection of top barley genotypes in the warm and dry region of Darab. Journal of Crop Breeding. 14, 65-76. [In Persian with English Summary].
<https://doi.org/10.52547/jcb.14.44.65>
- Simic, G., Lalic, A., Horvat, D., Zdunic, Z., Komlenic, D. K., Bucic-Kojic, A., Planinic, M., and Tisma, M., 2021. Production and analysis of the flour from the hull-less barley. Food Measure. 15, 2679-2687.
<https://doi.org/10.1007/s11694-021-00857-2>
- Sio-Se Mardeh, A., Ahmadi, A., Poustini, K., Mohammadi, V., 2006. Evaluation of drought resistance indices under various environmental conditioning. Field CropS Research. 98, 222-229. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2006.02.001>
- Ramzi, E., Asghari, A., Khomari, S., Chamanabad, H. M., 2018. Investigation of durum wheat (*Triticum turgidum* L. subsp. Durum Desf) lines for tolerance to aluminum stress condition. Journal of Crop Breeding. 10, 63-72. [In Persian with English Summary].
<https://doi.org/10.29252/jcb.10.25.63>
- Rane, J., and Nagarajan, S., 2004. High temperature index for field evaluation of heat tolerance in wheat varieties. Agricultural System. 79, 243-255.
[https://doi.org/10.1016/S0308521X\(03\)00075-1](https://doi.org/10.1016/S0308521X(03)00075-1)
- Rane, J., Pannu, R.K., Sohu, V.S., Saini, R.S., Mishra, B., Shoran, J., Crossa, J., Vargas, M., Joshi, K., 2007. Performance of yield and stability of advanced wheat cultivar under heat stress environments of the Indo-Gangetic plains. Crop Science. 47, 1561-1572.
<https://doi.org/10.2135/cropsci2006.07.0479>
- Reynolds, M. P., Ortiz-Monasterio, J. I., McNab, A., 2001. Application of Physiology in Wheat Breeding. Mexico, D.F., CIMMYT
- Rocha J.R.dA.S.dC., Machado, J.C., Carneiro, P.C.S., 2018. Multitrait index based on factor analysis and ideotype-design: Proposal and application on elephant grass breeding for bioenergy. Global Change Biology and Bioenergy. 10, 52-60.
<https://doi.org/10.1111/gcbb.12443>
- Rosielle, A. A., Hamblin, J., 1981. Theoretical aspects of selection for yield in stress and non-stress environment. Crop Science. 21, 943-946.
<https://doi.org/10.2135/cropsci1981.0011183X002100060033x>
- Taleghani, D., Saremirad, A., 2023. Evaluation of the sugar beet (*Beta vulgaris* L.) half-sib lines response to drought stress. Journal of Crop Science Research in Arid Regions. 5, 81-104.
<https://doi.org/10.22034/csrar.2023.329271.1190>
- Tahmasebi, S., Dastfal, M., Zali, H., Rajaei, M., 2018. Drought tolerance evaluation of bread heat cultivars and promising lines in warm and dry climate of the south. Cereal Research. 8(2), 209-225. [In Persian with English Summary].
<https://doi.org/10.22124/c.2018.10434.1398>
- Volpato, L., Rocha, J.R.D.A.S.D.C., Alves, R.S., Ludke, W.H., Borém, A., Silva, F.L.D., 2021. Inference of population effect and progeny selection via a multi-trait index in soybean breeding. Acta Scientiarum Agronomy. 43, 1-10.
<https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2007.05.011>
- Wahid, A., Gelani, S., Ashraf, M., Foolad, M. R., 2007. Heat tolerance in plants: An Overview. Environmental and Experimental Botany. 61, 199-223.
<https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2007.05.011>
- Yagoutipour, A., Farshadfar, E., Saeedi, M., 2017. Assessment of durum wheat genotypes for drought tolerance by suitable compound method. Environmental Stress in Crop Sciences. 10, 247-256. [In Persian with English Summary].
<https://doi.org/10.22077/escs.2017.581>
- Zali, H., Sofalian, O., Hasanloo, T., Asghari, A., Hoseini, S.M., 2015. Appraising of drought tolerance relying on stability analysis indices in canola genotypes simultaneously, using

- selection index of ideal genotype (SIIG) technique: Introduction of new method. *Biological Forum – An International Journal*. 7, 703-711.
- Zali, H., Barati, A., Pour-Aboughadareha, A., 2023a. Screening of barley elite genotypes using different selection indices based on multi-traits. *Crop Production Journal*. 15, 159-182. [In Persian with English Summary]. <https://doi.org/10.22069/ejcp.2023.20071>
- Zali, H., Barati, A., Pour-Aboughadareh, A., Gholipour, A., Koohkan, S., Marzoghiyan, A., Bocianowski, J., Bujak, H., Nowosad, K., 2023b. Identification of superior barley genotypes using selection index of ideal genotype (SIIG). *Plants*. 12, 1843. <https://doi.org/10.3390/plants12091843>
- Zali, H., Pour-Aboughadareh, A.R., 2023. Identification of superior genotypes of barley for cultivation in the south regions of Fars province using MGIDI, FAI-BLUP indices. *Plant Productions*. 46, 335-351. <https://doi.org/10.22055/ppd.2024.45295.2134>