

Original article

Selection of promising drought tolerant barley genotypes using MGIDI, SIIG and CSI indices

Mansoor Jafari Zare¹, Ali Asghari², Hassan Zali^{3*}, Omid Sofalian², Alireza Pour-Aboughadareh⁴

1. Phd Student of Plant Breeding, Department of Plant Production and Genetics engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

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

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

4. Assistant Prof., Seed and Plant Improvement Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran

Received 4 October 2024; Revised 24 November 2024; Accepted 30 November 2024

Extended abstract

Introduction

Drought stress is one of the most severe environmental constraints limiting crop production worldwide. Therefore, screening genetic materials to develop new varieties with improved tolerance is essential for coping with future climate challenges. The main objective of this study was to identify drought-tolerant barley genotypes using several selection indices.

Materials and methods

In this study, 17 advanced barley genotypes along with four check genotypes were evaluated under irrigated and drought-stress conditions during the 2022–2024 cropping seasons at the Darab Agricultural Research Station, Darab, Fars, Iran. The experiment was conducted using a randomized complete block design (RCBD) with three replications. Each experimental plot comprised six planting rows, with each row 6 m long and uniformly spaced at 15 cm intervals. A seeding density of 300 seeds m⁻² was applied. Seeds were sown using an experimental planter (Wintersteiger, Ried, Austria). Fertilizers were applied at rates of 150 kg ha⁻¹ urea, 100 kg ha⁻¹ di-ammonium phosphate, and 50 kg ha⁻¹ potassium sulfate. After removing border rows, all plots were harvested using an experimental combine (Wintersteiger, Ried, Austria). Several grain yield–based indices including tolerance index (TOL), mean productivity (MP), geometric mean productivity (GMP), harmonic mean (HM), stress susceptibility index (SSI), stress tolerance index (STI), relative drought index (RDI), stress susceptibility percentage (SSPI), abiotic stress tolerance index (ATI), stress/non-stress production index (SNPI), yield stability index (YSI), percentage of yield reduction (R%), yield index (YI), the multi-trait genotype–ideotype distance index (MGIDI), selection index of ideal genotype (SIIG), and combination significant index (CSI) were employed to identify the most drought-tolerant genotypes.

Results and discussion

The combined analysis of variance for grain yield under irrigated and drought-stress conditions revealed significant differences among the genotypes across both environments. The results showed that genotypes No. 21, 4, and 20, which produced the highest grain yields (6405, 6343, and 6310 kg ha⁻¹, respectively), were superior to the other genotypes under irrigated conditions. Moreover, Genotypes No.

* Corresponding author: Hassan Zali; E-Mail: hzali90@yahoo.com

4, 20, and 16 had the highest grain yields under drought-stress conditions, producing 5122, 4848, and 4717 kg ha⁻¹, respectively. Based on MGIDI, SIIG, and CSI, genotypes No. 4, 20, 21, and 16 were identified as drought-tolerant genotypes. The principal component analysis (PCA) indicated that the first and second components explained 68.7% and 28.4% of the total variation among the indices, respectively. The PCA-based biplot grouped all indices into five groups. SIIG, SNPI, YI, Ys, CSI, HARM, GMP, STI, MP and Yp were placed in the first group. The indices in this group showed the strongest correlation with grain yield under both the irrigated and drought-stress conditions. Genotypes no. 4, 16, and 20 with the highest grain yield were placed in this group. YSI and RDI were assigned to the second group along with genotypes 8, 10, and 14. The third group included MGIDI and the genotypes with the lowest grain yield under both stress and irrigated conditions. SSI, SSPI and TOL indices were placed in the fourth group. The fifth group comprised the ATI. This index identifies genotypes that exhibit the highest grain yield under stress conditions and the lowest performance under irrigated conditions.

Conclusion

Based on PCA results, different selection indices were clustered into five groups. SIIG and CSI along with SNPI, YI, Ys, HARM, GMP, STI, MP and Yp were classified into the same group. The indices in this group were considered ideal due to their ability to identify high-yielding genotypes under both stress and irrigated conditions. The results obtained from SIIG, MGIDI, and CSI were consistent with one another. Based on these results, genotype No. 4 was identified as the most drought-tolerant genotype.

Keywords: Correlation analysis, Drought stress, Principal Component Analysis, Tolerance indices.

گزینش ژنوتیپ‌های امیدبخش جو متحمل به خشکی با استفاده از شاخص‌های MGIDI، SIIG و CSI

منصور جعفری زارع^۱، علی اصغری^۲، حسن زالی^{۳*}، امید سفالیان^۴، علیرضا پورابوقداره^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 پژوهشی، بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی فارس، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، داراب
۴. استادیار پژوهشی، موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج

مشخصات مقاله

واژه‌های کلیدی:

تجزیه به مؤلفه‌های اصلی
تجزیه همبستگی
تنش خشکی
شاخص‌های تحمل

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۱۳

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۹/۰۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۱۰

تعدادی ژنوتیپ امیدبخش جو با استفاده از شاخص‌های مختلف تحمل به خشکی ارزیابی شدند. در این آزمایش ۱۷ ژنوتیپ خالص به همراه چهار ژنوتیپ شاهد و در دو شرایط آبیاری کامل و تنش خشکی انتهای فصل (سال‌های زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۳) به‌صورت طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار در ایستگاه تحقیقات کشاورزی داراب مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج تجزیه واریانس مرکب عملکرد دانه نشان داد که اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد بین ژنوتیپ‌ها در هر دو شرایط تنش خشکی و شرایط بدون تنش وجود دارد. ژنوتیپ‌های شماره ۴، ۲۰ و ۲۱ به ترتیب با عملکرد دانه ۶۴۰۵، ۶۳۴۳ و ۶۳۱۰ کیلوگرم در هکتار نسبت به سایر ژنوتیپ‌ها در شرایط بدون تنش و ژنوتیپ‌های شماره ۴، ۲۰ و ۱۶ به ترتیب با عملکرد دانه ۵۱۲۲، ۴۸۴۸ و ۴۷۱۷ کیلوگرم در هکتار در شرایط تنش خشکی دارای بالاترین عملکرد دانه بودند. بر مبنای شاخص‌های MGIDI، SIIG و CSI ژنوتیپ‌های شماره ۴، ۲۰، ۲۱ و ۱۶ به ترتیب جزء ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی شناخته شدند. بر اساس نتایج تجزیه PCA، شاخص‌های تحمل به تنش خشکی در پنج گروه قرار گرفتند. بر این اساس شاخص‌های STI، GMP، HARM، Ys، YI، SNPI، CSI، SIIG، MP و Yp در گروه یک قرار گرفتند. شاخص‌های این گروه، بیشترین همبستگی را با عملکرد دانه در شرایط تنش و بدون تنش داشتند و ژنوتیپ‌های شماره ۴، ۱۶ و ۲۰ جزو ژنوتیپ‌های برتر در این گروه بودند که دارای عملکرد دانه بالاتر از میانگین کل هم در شرایط تنش و هم در شرایط بدون تنش بودند. بر اساس نتایج تجزیه PCA، شاخص‌های گروه یک با توجه به شناسایی ژنوتیپ‌های پرتانسیل در هر دو شرایط تنش و بدون تنش به‌عنوان شاخص‌های برتر در این تحقیق شناسایی شدند. بر اساس نتایج شاخص‌های SIIG، MGIDI و CSI، ژنوتیپ شماره ۴ به‌عنوان ژنوتیپ برتر انتخاب شد.

مقدمه

خشک‌سالی یک مشکل جدی زیست‌محیطی و یک عامل محدودکننده مهم است که تولید جهانی کشاورزی را محدود می‌کند (Wen et al., 2021). حتی در شرایط محیطی مساعد، رویدادهای دوره‌ای خشک‌سالی که در مراحل بحرانی رشد، به‌ویژه مرحله پس از گرده‌افشانی رخ می‌دهد، می‌تواند تأثیر جدی بر تولید غلات داشته باشد (Damm et al., 2018). در همین حال، خشک‌سالی منجر به آسیب

جو (*Hordeum vulgare* L.) یکی از مهم‌ترین و قدیمی‌ترین گیاهان اهلی‌شده از خانواده غلات است که علاوه بر تأمین نیاز غذایی انسان در تأمین خوراک دام، طیور و صنعت نیز نقش مهمی ایفا می‌کند و از نظر اهمیت اقتصادی در مقام چهارم جهان قرار گرفته است (Vaezi et al., 2017; Fatemi et al., 2022; Pour-Aboughadareh et al., 2023).

STI, MP و GMP به‌عنوان بهترین شاخص‌ها در شرایط تنش و بدون تنش برای انتخاب ژنوتیپ‌های پر محصول معرفی کردند (Nazari and Pakniyat, 2010). بی‌همتا و همکاران (Bihamta et al., 2018) شاخص‌های STI, GMP, MP و TOL را برای شناسایی بهترین ژنوتیپ‌ها از لحاظ پاسخ به تنش خشکی استفاده کردند. بر اساس نتایج مجیدی و همکاران (Majidi et al., 2014)، شاخص‌های STI, GMP و MP به‌عنوان مناسب‌ترین شاخص‌ها برای شناسایی و معرفی ارقام متحمل به خشکی در کلزا معرفی شدند. کامرانی و همکاران (Kamraani et al., 2016) در مطالعه ۵۰ ژنوتیپ گندم دوروم در شرایط تنش خشکی و بدون تنش بیان کردند که شاخص‌های STI, GMP, MP, YI و HM مناسب‌ترین شاخص‌ها برای غربال کردن ژنوتیپ‌ها در شرایط تنش خشکی هستند.

برای انتخاب ژنوتیپ‌های متحمل به تنش، استفاده از یک شاخص به‌تنهایی ممکن است نتایج مطلوبی نداشته باشد، ولی با ارزیابی ژنوتیپ‌ها با استفاده از شاخص‌های مختلف، احتمال شناسایی ژنوتیپ‌های مطلوب افزایش می‌یابد؛ بنابراین، از شاخص انتخاب ژنوتیپ ایده‌آل (SIIG)^{۱۱} (Zali et al., 2015)، شاخص فاصله ژنوتیپ ایدئوتیپ چند صفی (MGIDI)^{۱۲} (Olivoto and Nardino, 2020) و ترکیب شاخص‌های معنی‌دار (CSI)^{۱۳} (Sabouri et al., 2022) به‌منظور ادغام شاخص‌های تحمل به خشکی برای ارزیابی بهتر ژنوتیپ‌ها استفاده شده است. SIIG یک شاخص چندمعیاره است که برای انتخاب ژنوتیپ‌های برتر از نظر شاخص‌های مختلف مناسب است (Zali et al., 2015; Zali et al., 2023). اولیوتو و ناردینو (Olivoto and Nardino, 2020) شاخص MGIDI را معرفی کردند. این شاخص مبتنی بر انتخاب ژنوتیپ‌های برتر که در آن‌ها چندین صفت یا شاخص اندازه‌گیری شده است، می‌باشد. صبوری و همکاران (Sabouri et al., 2022) در آزمایش اثر تنش خشکی بر ژنوتیپ‌های برنج، روش ترکیب شاخص‌های معنی‌دار (CSI) را معرفی نمودند. این شاخص یک ترکیب خطی از

عملکردهای مختلف فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی می‌شود، مانع از انتقال محصولات فتوسنتزی از منبع به مخزن می‌شود و از رشد و بهره‌وری محصول جلوگیری می‌کند، درحالی‌که خود گیاهان با کاهش باز شدن روزنه‌های برگ، از دست دادن بخار آب را کاهش می‌دهند (Maes and Steppe, 2019). بااین‌حال، مواد مقاوم به خشکی گسترش سلولی را از طریق تنظیم اسمزی حفظ کرده و قندهای محلول، پروتئین و اسیدهای آمینه بیشتری را برای مقابله با تنش خشکی انباشته می‌کنند (Banerjee et al., 2020). منابع ژرم‌پلاسما مقاوم به خشکی در محیط‌های بدون تنش عملکرد خوبی دارند، اما در شرایط خشک‌سالی نیز با کاهش عملکرد مشخص می‌شوند. بنابراین، انتخاب یک سری منابع ژرم‌پلاسما مناسب برای محیط‌های مستعد خشکی، عملی‌ترین راه‌حل برای مقابله با محیط‌های کم آب و تثبیت عملکرد غلات است (Wen et al., 2023).

برای شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی، شاخص‌های تحمل به خشکی مبتنی بر عملکرد دانه بر اساس رابطه بین شرایط نرمال و تنش خشکی پیشنهاد شده است (Wen et al., 2023). شاخص تحمل (TOL)^۱ و شاخص میانگین بهره‌وری (MP)^۲ (Rosielle and Hamblin, 1981)، شاخص تحمل تنش (STI)^۳ (Fernandez, 1992)، شاخص حساسیت به تنش (SSI)^۴ و شاخص خشکی نسبی (RDI)^۵ (Fischer and Maurer, 1978)، شاخص عملکرد (YI)^۶ (Gavuzzi et al., 1997) و شاخص پایداری عملکرد (YSI)^۷ (Bouslama and Schapaugh, 1984) از جمله شاخص‌های بررسی تحمل و حساسیت به تنش‌های محیطی می‌باشند.

موسوی و همکاران (Mousavi et al., 2008) سه شاخص تحت عنوان شاخص تحمل غیرزیستی (ATI)^۸، شاخص درصد حساسیت به تنش (SSPI)^۹ و شاخص تولید در شرایط بدون تنش و تنش (SNPI)^{۱۰} را به‌منظور بررسی حساسیت یا تحمل به خشکی در ژنوتیپ‌های گندم دوروم معرفی کردند. در مطالعه‌ای روی ژنوتیپ‌های جو، شاخص‌های

8. Abiotic-stress tolerance index
9. Stress susceptibility percentage index
10. Stress non-stress production index
11. Selection index of ideal genotype
12. Multi-trait genotype-ideotype distance index
13. Combination of significant indices

1. Tolerance index
2. Mean productivity index
3. Stress tolerance index
4. Stress susceptibility index
5. Relative drought index
6. Yield index
7. Yield stability index

شاخص‌های تحمل یا حساسیت به تنش است که همبستگی معنی‌داری با عملکرد دانه در هر دو شرایط تنش و عدم تنش دارند. برای استفاده از شاخص CSI بهتر است از داده‌های استاندارد شده استفاده شود.

هدف از این تحقیق ارزیابی تعدادی از لاین‌های امیدبخش جو از نظر تحمل به خشکی با استفاده از شاخص‌های مختلف تحمل به تنش و شاخص‌های انتخاب ترکیبی به منظور توسعه کشت در مناطق گرم جنوب استان فارس و مناطق مشابه بود.

مواد و روش‌ها

به منظور ارزیابی تعدادی از ژنوتیپ‌های امیدبخش جو (جدول ۱) با استفاده از شاخص‌های مختلف ارزیابی تحمل و حساسیت به تنش خشکی، آزمایشی با ۱۷ ژنوتیپ برتر (منتخب از آزمایش‌های مقایسه عملکرد پیشرفته سراسری اجرا شده در موسسه تحقیقاتی اصلاح و تهیه نهال و بذر) به همراه چهار ژنوتیپ شاهد و در دو شرایط آبیاری کامل و تنش خشکی انتهای فصل (قطع آبیاری در مرحله شروع ظهور

خوشه‌ها) طی دو سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۳ به صورت طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار در ایستگاه تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی داراب اجرا شد. مشخصات هواشناسی دو سال زراعی اجرای آزمایش در جدول ۲ نشان داده شده است.

در همه آزمایش‌ها، ژنوتیپ‌های مورد بررسی در نیمه دوم آذرماه در شش خط به طول ۵ متر (۶ مترمربع) و تراکم ۳۰۰ دانه در مترمربع با استفاده از دستگاه بذرکار آزمایشی غلات (Wintersteiger, Austria) کشت شدند. برای آبیاری از سیستم قطره‌ای نواری (تیپ) استفاده شد. کود فسفر از منبع دی آمونیوم فسفات و کود پتاس از منبع سولفات پتاسیم به ترتیب با مقادیر ۱۰۰ و ۵۰ کیلوگرم در هکتار به صورت پایه و پیش از کاشت به خاک اضافه شد. کود ازت از منبع اوره به مقدار ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار و در دو نوبت اوایل پنجه‌زنی و انتهای مرحله ساقه رفتن به صورت سرک به خاک اضافه شد. خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک محل آزمایش در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۱. شجره ژنوتیپ‌های جو مورد بررسی در سال‌های زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۳

Table 1. Pedigree of examined barley genotypes in the 2022-2024 cropping years

Genotypes code	شجره ژنوتیپ‌ها Pedigree of genotypes
G1	Oxin (شاهد)
G2	Golchin (شاهد)
G3	Kavir/Badia/3/Torsh/9cr.279-07/Bgs/4/Karoon/Kavir/5/ Rojo/3/LB.IRAN/Una8271//Gloria"S"/Com"S"
G4	Yousef/3/Legia//Rhn/Lignee 527
G5	Anoidium/Arbayan-01/3/Lignee527/NK1272//JLB70-63/4/MBD-82-9(D10)
G6	GOB/ALELI/CANELA/3/ARUPO*2/JET/4/ARUPO/K8755//MORA/5/Rojo/3/LB.IRAN/Una8271//Gloria"S"/Com"S"
G7	Kavir/Badia/3/Torsh/9cr.279-07//Bgs/4/Karoon/Kavir/5/Nik/6/Rojo/3/LB.IRAN/Una8271//Gloria"S"/Com"S"
G8	ICNB-105960/Torkman//Nosrat/3/Bda/Rhn-03//ICB-107766
G9	Legia/Rhn/Lignee 527/3/Rhn03/4/Rojo/3/LB.IRAN/Una8271//Gloria"S"/Com"S"
G10	M104/PFC 88210//DOÑA JOSEFA
G11	WABAR2242//LIMON/BICHY2000
G12	Kavir/Badia/3/Torsh/9cr.279-07/Bgs/4/Karoon/Kavir/5/Nosrat
G13	Kavir/Badia/3/Torsh/9cr.279-07/Bgs/4/Karoon/Kavir/5/Nosrat
G14	Beecher/Kavir
G15	Rojo/3/LB.IRAN/Una8271//Gloria"S"/Com"S"/4/Comp 89-9Cr-79-
G16	Lignee 527/NK1272//JLB 70-63/3/Rhn-03//Lignee527/As45
G17	Bgs/Dajia//L.1242/3/L.B.IRAN/Una8271//Gloria"S'/3/Alm/Una80//..../4/Kavir
G18	Bgs/Dajia//L.1242/3/L.B.IRAN/Una8271//Gloria"S'/3/Alm/Una80//..../4/Kavir
G19	Rojo/3/LB.IRAN/Una8271//Gloria"S"/Com"S"/4/Bereke-54
G20	WB-99-10 (شاهد)
G21	Norooz (شاهد)

جدول ۲. اطلاعات هواشناسی محل اجرای آزمایش (۱۴۰۱-۱۴۰۳)

Table 2. Meteorological information of the experiment site (۲۰۲۲-۲۰۲۴)

سال Year	ماه Month	دما Temperature (°C)				رطوبت هوا Air humidity (%)		بارش Precipitation (mm)
		کمینه Min	بیشینه Max	میانگین Mean	نقطه شبنم Dew point	کمینه Min	بیشینه Max	
1401	7	15.63	29.37	23.33	2.97	8.77	29.27	0
1401	8	11.10	22.17	16.97	5.80	24.03	56.97	33
1401	9	5.40	16.23	11.50	2.07	27.63	60.77	8
1401	10	1.50	10.73	6.77	2.33	42.03	78.33	120
1401	11	3.50	12.70	8.63	3.30	40.77	76.07	68
1401	12	8.31	20.00	14.55	2.69	22.66	62.17	14
1402	1	9.77	22.35	16.84	2.81	16.94	56.23	0
1402	2	15.61	29.06	23.19	2.00	10.68	34.97	0
1402	3	21.61	35.26	29.48	7.97	8.90	31.58	0
1402	4	24.68	38.23	32.35	13.55	7.87	29.06	0
1402	5	23.00	36.16	30.45	14.71	8.90	33.87	1
1402	6	22.52	35.32	29.61	15.45	10.16	28.23	0
1402	7	16.93	30.17	24.30	7.17	11.30	32.67	0
1402	8	10.87	21.40	16.87	6.17	25.53	60.13	23
1402	9	5.03	16.53	11.37	0.60	25.00	59.07	7
1402	10	4.43	15.27	10.50	-1.20	25.10	59.63	0
1402	11	4.30	14.77	10.03	0.63	28.53	65.80	40
1402	12	5.10	16.59	11.45	0.55	25.86	67.83	72
1403	1	9.68	20.06	15.35	8.52	31.84	73.48	133
1403	2	13.61	24.84	20.00	11.10	26.16	64.52	47
1403	3	21.29	35.19	29.39	5.84	7.42	26.45	0
1403	4	25.42	38.16	32.52	17.19	10.71	31.87	1
1403	5	25.68	37.65	31.81	23.26	14.74	46.35	19

جدول ۳. خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک محل آزمایش

Table 3. Physicochemical properties of the soil at the test site

عمق Depth	اسیدیته گل اشباع PH of paste	هدایت الکتریکی EC	کربن آلی Organic carbon	فسفر قابل جذب Available P	پتاسیم قابل جذب Available K
cm		ds m ⁻¹	%	ppm	
0-30	7.9	0.74	1.08	23.0	248
شن Sand	لای Silt	رس Clay	مس قابل جذب Available Cu	آهن قابل جذب Available Fe	روی قابل جذب Available Zn
%			ppm		
29	39.4	31.6	1.22	2.90	1.30

هم‌چنین، به‌منظور ادغام شاخص‌های مختلف تحمل به تنش خشکی و انتخاب بهتر ژنوتیپ‌ها از نظر تحمل به تنش خشکی از شاخص‌های (Zali et al., 2015) SIIG، (Olivoto and Nardino, 2020) MGIDI 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 FAI-، SIIG، BLUP و MGIDI علاوه بر شاخص‌هایی که همبستگی معنی‌داری با Yp و Ys داشتند، از عملکرد دانه در هر دو شرایط تنش خشکی (Ys) و بدون تنش (Yp) استفاده شد.

مبارزه با علف‌های هرز پهن‌برگ و باریک‌برگ به ترتیب با استفاده از علف‌کش‌های انتخابی توفوردی و اکسیال انجام شد. برای برآورد عملکرد دانه پس از حذف حاشیه، برداشت همه کرت (۶ مترمربع) با استفاده از کمباین آزمایشی غلات (Wintersteiger, Austria) انجام شد و پس از توزین، عملکرد برحسب کیلوگرم در هکتار ثبت گردید. برای ارزیابی واکنش ژنوتیپ‌ها نسبت به تنش خشکی از میانگین دوساله ژنوتیپ‌ها و از شاخص‌های مختلف تنش خشکی (جدول ۴) استفاده شد.

Table 4. Different indices of drought tolerance and susceptibility

شاخص‌های مختلف تحمل به خشکی Different indices of drought tolerance	فرمول Formula	منابع References
شاخص تحمل (TOL) Tolerance index	$TOL = Y_p - Y_s$	Rosielle and Hamblin, 1981
شاخص میانگین تولید (MP) Mean productivity	$MP = \frac{Y_p + Y_s}{2}$	Rosielle and Hamblin, 1981
شاخص حساسیت به تنش (SSI) Stress susceptibility index	$SSI = \frac{1 - \frac{Y_{si}}{Y_{pi}}}{SI} = 1 - \frac{\bar{Y}_s}{\bar{Y}_p}$	Fischer and Maurer, 1978
میانگین هندسی عملکرد (GMP) Geometric mean productivity	$GMP = \sqrt{Y_p \times Y_s}$	Fernandez, 1992
شاخص تحمل به تنش (STI) Stress tolerance index	$STI = \frac{Y_p \times Y_s}{(\bar{Y}_p)^2}$	Fernandez, 1992
میانگین هارمونیک عملکرد (HM) Harmonic mean	$HM = \frac{2 \times Y_p \times Y_s}{Y_p + Y_s}$	Fernandez, 1992
شاخص خشکی نسبی (RDI) Relative drought index	$RDI = \frac{Y_s / Y_p}{\bar{Y}_s / \bar{Y}_p}$	Fischer and Wood, 1978
شاخص تحمل غیرزیستی (ATI) Abiotic-stress tolerance index	$ATI = \left[\left(\frac{Y_p - Y_s}{\bar{Y}_p / \bar{Y}_s} \right) \right] \times \left[\sqrt{Y_p \times Y_s} \right]$	Moosavi et al., 2008
شاخص درصد حساسیت به تنش (SSPI) Stress susceptibility percentage index	$SSPI = \frac{Y_p - Y_s}{2(\bar{Y}_p)} \times 100$	Moosavi et al., 2008
شاخص تولید در شرایط بدون تنش و تنش (SNPI) Stress non-stress production index	$SNPI = \sqrt[3]{(Y_p + Y_s) / (Y_p - Y_s)} \times \sqrt[3]{Y_p \times Y_s \times Y_s}$	Moosavi et al., 2008
شاخص پایداری عملکرد (YSI) Yield stability index	$YSI = \frac{Y_s}{Y_p}$	Bousslama and Schapaugh, 1984
درصد کاهش عملکرد (%R) Percentage of yield decrease	$\%R = \frac{Y_p - Y_s}{Y_p} \times 100$	Choukan et al., 2006
شاخص عملکرد (YI) Yield index	$YI = \frac{Y_s}{\bar{Y}_s}$	Gavuzzi et al., 1997

محاسبه شاخص MGIDI

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

۱- تغییر مقیاس شاخص‌ها/صفات:

X_{ij} یک جدول دوطرفه با i ردیف یا ژنوتیپ و j ستون یا صفت است. مقدار تغییر مقیاس یافته برای ردیف i و ستون j به صورت رابطه ۱ محاسبه گردید:

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

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} به صورت 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. درحالی که 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 صفر تا ۱۰۰ است که مفهوم انتخاب موردنظر (افزایش یا کاهش) را در نظر می‌گیرد و ساختار همبستگی مجموعه اصلی متغیرها را حفظ می‌کند.

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 است و R یک ماتریس همبستگی $p \times p$ بین صفات است. علاوه بر این، f و g 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. به‌طوری‌که I برابر ۱۰۰، ۰، ...، 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 به‌عنوان 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 ($i = 1, 2, \dots, f$ و $j = 1, 2, \dots, f$) 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 نزدیک‌تر هستند. دیفرانسیل انتخاب برای همه شاخص‌ها با در نظر گرفتن شدت انتخاب ۲۰ درصد انجام شد.

محاسبه شاخص SIIG

به‌منظور ادغام شاخص‌های مختلف تحمل به خشکی جدول ۴، از شاخص SIIG استفاده شد که نحوه محاسبه این شاخص به شرح ذیل است (Zali et al., 2023; Zali et al., 2015):

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

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

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 صفات/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 کردن داده‌های اولیه (ماتریس D)، ماتریس R به‌صورت 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 که مقدار بالای یک شاخص ایده‌آل است یا مقادیر پایین آن. به‌عنوان مثال در مورد شاخص تحمل (TOL)، حداقل مقدار TOL یک ژنوتیپ مقدار ایده‌آل و بیشترین مقدار TOL به‌عنوان غیرایده‌آل (ضعیف) در نظر گرفته شد.

۴- محاسبه فاصله از ژنوتیپ‌های ایده‌آل (d_i^+) و ژنوتیپ‌های ضعیف (d_i^-): در این مرحله برای هر ژنوتیپ، فاصله از ژنوتیپ‌های ایده‌آل (d_i^+) و ژنوتیپ‌های ضعیف (d_i^-) 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.

حساسیت به خشکی (جدول ۴) و شاخص CSI (Sabouri et al., 2022) از نرم افزار Excel استفاده شد.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس مرکب عملکرد دانه در شرایط تنش و بدون تنش نشان داد که اختلاف معنی داری در سطح احتمال یک درصد بین ژنوتیپ‌ها در هر دو شرایط تنش خشکی و شرایط بدون تنش وجود دارد (جدول ۵). معنی دار شدن اثر ژنوتیپ‌ها حاکی از متفاوت بودن توان ژنتیکی ژنوتیپ‌ها در بروز صفت عملکرد دانه است.

جدول ۵. تجزیه واریانس مرکب ۲۱ ژنوتیپ امیدبخش جو برای

عملکرد دانه در شرایط آبیاری کامل و تنش خشکی

Table 5. Composite variance analysis of 21 promising barley genotypes for grain yield under normal irrigation and drought stress

S.O.V	منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات (MS)	
			Mean of square	
			آبیاری کامل	تنش خشکی
		df	Normal irrigation	Drought stress
Year	سال	1	160875840**	173071584**
Error 1	خطای ۱	4	173576	549442
Genotype	ژنوتیپ	20	4345125**	2648821**
Genotype × Year	ژنوتیپ × سال	20	1919100**	1061892*
Error 2	خطای ۲	80	506133	615971
CV (%)	ضریب تغییرات		13.68	20.04

* و ** به ترتیب گزارش دهنده معنی دار بودن در سطح احتمال ۵٪ و ۱٪

و ns. فاقد اختلاف معنی دار

* and ** respectively, reporting significance at 5% and 1% probability level and ns. No significant difference

نتایج تجزیه واریانس مرکب برای صفت عملکرد دانه ژنوتیپ‌ها تحت دو شرایط تنش خشکی انتهای فصل و عدم تنش در دو سال نشان داد که اثرات سال، تنش و ژنوتیپ برای صفت عملکرد دانه اختلاف معنی دار در سطح ۱ درصد است. علاوه بر این اثر متقابل سال × ژنوتیپ نیز معنی دار بود.

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

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

مقدار SIIGi بین صفر تا یک تغییر می کند و هر چه گزینه موردنظر به ژنوتیپ ایده آل نزدیک تر باشد مقدار SIIGi آن به یک نزدیک تر خواهد بود. بر اساس این روش، بهترین ژنوتیپ، نزدیک ترین ژنوتیپ به ژنوتیپ های ایده آل و دورترین از ژنوتیپ های ضعیف است (Zali et al., 2015; Zali et al., 2023).

محاسبه شاخص CSI

شاخص CSI بر مبنای ترکیب خطی شاخص هایی که همبستگی معنی داری با Yp و Ys دارند (شاخص های معنی دار) محاسبه می شود (رابطه ۱۰).

$$CSI_i = \frac{1}{2} \left(\sum_j^n r_{YP.index_j} \times index_{ij} + \sum_j^n r_{YS.index_j} \times index_{ij} \right) \quad [10]$$

در رابطه ۱۰، $r_{YP.index_j}$ نشان دهنده همبستگی بین شاخص j و Yp و $r_{YS.index_j}$ همبستگی بین شاخص j و Ys است. $index_{ij}$ مقدار شاخص j در ژنوتیپ i است. برای محاسبه شاخص CSI، شاخص های معنی دار ابتدا با استفاده از رابطه ۵ استاندارد شدند. منظور از شاخص های معنی دار، شاخص هایی می باشند که همبستگی معنی داری با عملکرد دانه در هر دو شرایط مورد بررسی (تنش و بدون تنش) دارند. بر مبنای شاخص CSI ژنوتیپ هایی برتر می باشند که بیشترین مقدار را داشته باشند (Sabouri et al., 2022).

به منظور انجام تجزیه واریانس از نرم افزار SAS استفاده شد. برای محاسبه شاخص SIIG از برنامه تهیه شده در محیط برنامه نویسی R (Zali et al., 2023) و برای رسم نمودار شاخص SIIG نیز از برنامه تهیه شده در محیط برنامه نویسی R و برای برآورد شاخص MGIDI، شاخص FAI-BLUP و محاسبه همبستگی بین شاخص ها از بسته تجزیه آزمایش های چندمحیطی (metan) در محیط برنامه نویسی R استفاده شد (Olivoto and Nardino, 2020). برای انجام تجزیه به مؤلفه های اصلی و ترسیم بای پلات از بسته factoextra در محیط برنامه نویسی R استفاده شد (Kassambara and Mundt, 2020). برای محاسبه شاخص های تحمل یا

ضریب تغییرات برای عملکرد دانه ۱۴/۴۵ درصد برآورد شد (جدول ۶).

نتایج شاخص‌های مختلف تحمل و حساسیت به خشکی بر اساس داده‌های دوساله برای هر ژنوتیپ انجام و نتایج آن در جدول ۷ نشان داده شده است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، در شرایط بدون تنش (Yp) ژنوتیپ‌های شماره ۲۱، ۴ و ۲۰ به ترتیب با عملکرد دانه ۶۴۰۵، ۶۳۴۳ و ۶۳۱۰ کیلوگرم در هکتار نسبت به سایر ژنوتیپ‌ها دارای برتری بودند. در شرایط تنش خشکی (Ys) ژنوتیپ‌های شماره ۴، ۲۰ و ۱۶ به ترتیب با عملکرد دانه ۵۱۲۲، ۴۸۴۸ و ۴۷۱۷ کیلوگرم در هکتار دارای بالاترین عملکرد دانه بودند.

جدول ۶. تجزیه واریانس مرکب ۲۱ ژنوتیپ امیدبخش جو برای عملکرد دانه در سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۲

Table 6. Composite variance analysis of 21 promising barley genotypes for grain yield in 2022-2024 cropping year

درجه	میانگین مربعات	منابع تغییرات
df	Mean of squares	Sources of variations
تنش	103406484.90**	Stress
سال	341497884.80**	Year
تنش × سال	14331.00 ^{ns}	Stress × Year
خطای ۱	269658.30	Error
ژنوتیپ	7417598.20**	Genotype
ژنوتیپ × تنش	1367038.40*	Genotype × Stress
ژنوتیپ × سال	2624185.60**	Genotype × Year
ژنوتیپ × تنش × سال	475694.60 ^{ns}	Genotype × Stress × Year
خطای ۲	433001.50	Error 2
ضریب تغییرات (درصد)	14.45	CV (%)

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

بر مبنای شاخص حساسیت به تنش (SSI) و شاخص تحمل (TOL) که مقادیر عددی پایین آن‌ها نشان‌دهنده

تحمل بالاتر نسبت به تنش است (Choukan et al., 2006)، ژنوتیپ‌های شماره ۸، ۱۳ و ۱۰ به ترتیب به‌عنوان متحمل-ترین و ژنوتیپ‌های شماره ۳، ۲۱ و ۵ به ترتیب به‌عنوان حساس‌ترین ژنوتیپ‌ها به تنش خشکی انتهای فصل بودند (جدول ۷). باید توجه داشت که پایین بودن مقدار شاخص TOL الزاماً به دلیل بالا بودن عملکرد ژنوتیپ در محیط تنش نیست؛ زیرا ممکن است عملکرد ژنوتیپی در شرایط عادی پایین باشد و در شرایط تنش نیز با افت عملکرد کم‌تری همراه باشد و در نتیجه موجب کوچک شدن شاخص TOL شود و ژنوتیپ به‌عنوان متحمل معرفی شود (Moghaddam and Hadizadeh, 2002). از نظر شاخص‌های تحمل به تنش (STI)، میانگین تولید (MP)، میانگین هندسی تولید (GMP)، میانگین هارمونیک (HM) و شاخص عملکرد (YI) که مقادیر بالاتر آن‌ها نشان‌دهنده تحمل بیش‌تر به تنش است، ژنوتیپ‌های شماره ۴، ۲۰، ۲۱ و ۱۶ به ترتیب به‌عنوان متحمل‌ترین ژنوتیپ‌ها شناخته شدند. همچنین، بر اساس این شاخص‌ها ژنوتیپ‌های شماره ۱۲، ۱۳، ۱۹ و ۱۱ به ترتیب به‌عنوان ژنوتیپ‌های حساس به تنش خشکی انتهای فصل شناخته شدند. بر اساس شاخص خشکی نسبی (RDI) و شاخص پایداری عملکرد (YSI) نیز که مقادیر بالاتر آن‌ها نشان‌دهنده متحمل‌تر بودن ژنوتیپ است، ژنوتیپ‌های شماره ۸، ۱۰، ۴ و ۱۴ به ترتیب متحمل‌ترین و ژنوتیپ‌های شماره ۳۳، ۵ و ۷ به ترتیب حساس‌ترین ژنوتیپ‌ها به تنش خشکی انتهای فصل تعیین شدند (جدول ۷). از نظر شاخص درصد حساسیت به تنش (SSPI) که ماهیتاً شبیه شاخص TOL است، با این تفاوت که درصد تغییرات عملکرد ارقام را واضح‌تر نشان می‌دهد، ژنوتیپ‌های ۸، ۱۰ و ۱۴ به‌عنوان ژنوتیپ‌های متحمل و ژنوتیپ‌های ۳، ۵ و ۲۱ به‌عنوان حساس‌ترین ژنوتیپ‌ها معرفی شدند. بر اساس شاخص SNPI ژنوتیپ‌های شماره ۴ و ۱۶ به‌عنوان ژنوتیپ-های متحمل و ژنوتیپ‌های شماره ۱۲، ۱۱، ۱۹ و ۱۳ به‌عنوان حساس‌ترین ژنوتیپ‌ها معرفی شدند. بر اساس شاخص ATI متحمل‌ترین ژنوتیپ‌ها به تنش خشکی ژنوتیپ‌های شماره ۲۱، ۳ و ۴ و حساس‌ترین آن‌ها ژنوتیپ‌های شماره ۱۳ و ۱۹ بودند. محاسبه شاخص درصد کاهش عملکرد (R%) نشان داد که ژنوتیپ شماره ۸ دارای کم‌ترین و ژنوتیپ شماره ۳ دارای بیش‌ترین مقدار کاهش عملکرد دانه را در شرایط تنش خشکی را به خود اختصاص دادند (جدول ۷).

جدول ۷. میانگین عملکرد دانه ۲۱ ژنوتیپ امیدبخش چو در شرایط آبیاری کامل و تنش خشکی به همراه شاخص های حساسیت و تحمل به تنش

Table 7. The grain yield means of 21 promising genotypes of barley under normal irrigation and drought stress conditions along with stress sensitivity and tolerance indicators.

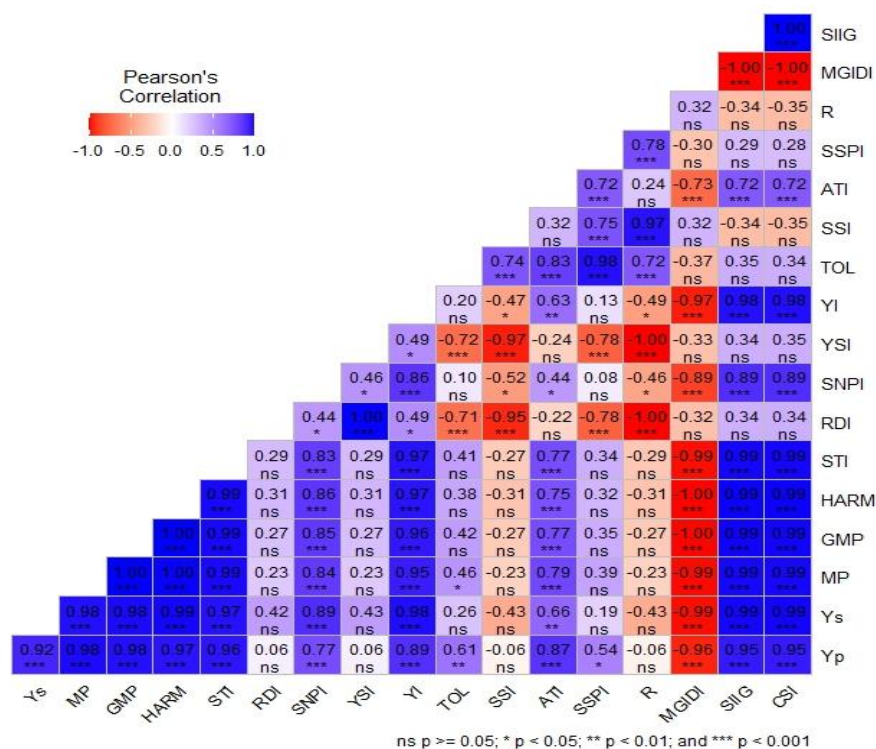
ژنوتیپ Genotype	شاخص های حساسیت و تحمل به تنش Stress sensitivity and tolerance indices														شاخص های انتخاب Selection indices			
	Yp	Ys	TOL	MP	GMP	HM	SSI	STI	RDI	SSPI	ATI	SNPI	YSI	R	YI	MGIDI	SIIG	CSI
1	5335	4217	1118	4776	4735	4694	0.86	0.81	1.07	9.98	5113094	9269	0.79	21.17	1.01	1.41	0.611	1.27
2	5908	4216	1692	5062	4971	4884	1.12	0.95	0.94	17.92	5989087	8236	0.7	29.83	1.09	1.15	0.678	1.33
3	6065	4070	1995	5068	4913	4771	1.39	0.88	0.85	20.1	6933033	8256	0.63	36.52	0.99	1.28	0.633	1.29
4	6405	5122	1283	5764	5719	5674	0.79	1.24	1.14	11.05	6659317	11678	0.83	17.3	1.37	0.00	1.000	1.64
5	5672	3802	1870	4737	4615	4500	1.31	0.78	0.86	19.77	6147297	7319	0.65	35.36	0.94	1.68	0.533	1.19
6	5733	4432	1301	5083	5032	4981	0.9	0.96	1.07	12.14	5448041	9336	0.79	21.43	1.18	0.98	0.731	1.38
7	5189	3752	1437	4471	4375	4284	1.15	0.69	0.9	15.52	4189843	8310	0.68	32.41	0.89	1.90	0.483	1.14
8	4921	4182	739	4552	4535	4519	0.6	0.76	1.16	7.05	2784366	9482	0.85	14.84	1.08	1.54	0.581	1.24
9	5322	4169	1153	4746	4701	4656	0.84	0.82	1.06	11.69	4106030	8994	0.78	21.57	1.09	1.40	0.618	1.28
10	4913	3997	916	4455	4426	4397	0.71	0.71	1.14	8.32	3737750	9315	0.84	16.46	1.02	1.71	0.539	1.20
11	4093	3011	1082	3552	3507	3462	1.07	0.45	0.98	10.92	2897266	5825	0.72	27.71	0.77	2.97	0.210	0.88
12	3410	2320	1090	2865	2803	2744	1.26	0.29	0.94	10.42	2502833	4479	0.69	30.85	0.61	3.82	0.000	0.68
13	3715	2875	840	3295	3257	3220	0.84	0.41	1.06	8.75	2115950	6349	0.78	21.88	0.75	3.18	0.170	0.84
14	5379	4433	946	4906	4878	4851	0.72	0.95	1.13	9.2	3533476	10015	0.83	17.39	1.21	1.05	0.725	1.38
15	5517	4123	1394	4820	4750	4682	0.96	0.82	1.02	14.05	5229531	9644	0.75	24.59	1.03	1.36	0.626	1.28
16	5844	4717	1127	5281	5226	5174	0.77	0.98	1.05	12.24	3919952	11596	0.78	21.73	1.17	0.67	0.799	1.46
17	4413	3079	1334	3746	3663	3583	1.16	0.49	0.94	13.41	3723550	7556	0.7	30.06	0.79	2.70	0.287	0.96
18	4589	3426	1163	4007	3923	3844	1	0.56	0.94	13.33	2587073	10384	0.71	29.32	0.84	2.24	0.418	1.08
19	4028	2980	1048	3504	3447	3391	1.03	0.44	0.96	11.33	2439798	6242	0.72	28.21	0.75	3.01	0.204	0.88
20	6310	4848	1462	5579	5489	5405	0.86	1.14	1.03	16.13	5260991	10992	0.76	23.71	1.25	0.35	0.900	1.54
21	6343	4428	1915	5386	5273	5164	1.17	1.09	0.94	19.84	7193075	10421	0.7	30.17	1.18	0.63	0.824	1.47

Yp: عملکرد ژنوتیپ ها در شرایط نرمال، Ys: عملکرد ژنوتیپ ها در محیط تحت تنش، TOL: شاخص تحمل، MP: شاخص میانگین بهره‌وری، GMP: شاخص میانگین بهره‌وری هندسی، HM: شاخص میانگین هارمونیک، SSI: شاخص حساسیت به تنش، STI: شاخص تحمل به تنش، RDI: شاخص خشکی نسبی، SSPI: شاخص درصد حساسیت به تنش، ATI: شاخص تولید در شرایط بدون تنش و تنش، YSI: شاخص پایداری عملکرد، %R: شاخص درصد کاهش عملکرد، YI: شاخص عملکرد، MGIDI: شاخص فاصله ژنوتیپ ایدئال، CSI: شاخص ترکیب شاخص های معنی دار.

Yp: Yield of genotypes under normal conditions, Ys: Yield of genotypes under stress, TOL: Tolerance index, MP: Mean productivity index, GMP: Geometric mean productivity index, HM: Harmonic mean index, SSI: Stress susceptibility index, STI: Stress tolerance index, RDI: Relative drought index, SSPI: Stress susceptibility percentage index, ATI: Abiotic-stress tolerance index, SNPI: Stress non-stress production index, YSI: Yield stability index, %R: Percentage of yield decrease, YI: Yield index, MGIDI: The multi-trait genotype-ideotype distance index, SIIG: Selection index of ideal genotype, CSI: Combination significant index.

محققین مناسب‌ترین شاخص برای گزینش ژنوتیپ‌های متحمل به تنش، شاخصی است که همبستگی بالایی با عملکرد دانه در هر دو شرایط تنش و عدم تنش داشته باشد. به‌منظور تعیین بهترین شاخص، همبستگی بین عملکرد دانه لاین‌ها در شرایط تنش (Ys) و بدون تنش (Yp) با شاخص‌های تحمل به تنش خشکی محاسبه شد (شکل ۱).

با توجه به این‌که تحمل به خشکی یک صفت پیچیده بوده و عوامل مختلفی در آن دخالت دارند، لذا قضاوت پیرامون ژنوتیپ‌ها از نظر این صفت پیچیده و گاهی با نتایج متناقض همراه است؛ بنابراین، با ارزیابی میزان همبستگی بین این شاخص‌ها و عملکرد دانه در دو شرایط تنش و عدم تنش، شناسایی مناسب‌ترین شاخص امکان‌پذیر است. از نظر



شکل ۱. نمودار حرارتی ضریب همبستگی پیرسون بین شاخص‌های مختلف تحمل و حساسیت به خشکی و همچنین شاخص‌های انتخاب

Fig. 1. Heat map of Pearson's correlation coefficient among different indices of tolerance and sensitivity to drought as well as selection indices

است؛ بنابراین، انتخاب بر اساس این شاخص‌ها توصیه نمی‌شود. عملکرد دانه در شرایط تنش (Ys) همبستگی مثبت و بالایی با عملکرد دانه در شرایط بدون تنش داشت که نشان داد ممکن است عملکرد بالا در شرایط مطلوب منجر به عملکرد نسبتاً بالا در شرایط تنش شود. این نتایج با گزارش‌های فرشادفر و همکاران (Farshadfar et al., 2018) در گندم نان و پاتل و همکاران (Patel et al., 2019) در گندم دوروم مطابقت دارد.

کرمی و همکاران (Karami et al., 2005) برای غربال لاین‌های جو متحمل به خشکی چهار شاخص MP، GMP، HM و STI را به‌عنوان مناسب‌ترین شاخص‌ها معرفی کردند. آرمجو و نیکخواه چمن‌آباد (Arazmjoo and Nikkhah)

با توجه به همبستگی بالا و معنی‌دار عملکرد دانه در شرایط تنش و بدون تنش با شاخص‌های MP، GMP، HM، STI و YI این شاخص‌ها به‌عنوان بهترین شاخص‌ها انتخاب شدند که قادرند ژنوتیپ‌های متحمل به تنش خشکی را با عملکرد دانه بالا از سایر ژنوتیپ‌ها غربال کنند. در مورد شاخص‌های SSI و R% که همبستگی منفی با عملکرد دانه در شرایط تنش داشتند، نشان‌دهنده میزان حساسیت به خشکی می‌باشند و ژنوتیپ‌هایی که دارای مقادیر کوچک‌تری از این شاخص‌ها هستند، به‌عنوان ژنوتیپ‌های نسبتاً متحمل انتخاب می‌شوند؛ بنابراین، ژنوتیپ‌هایی که بر اساس این شاخص‌ها انتخاب می‌شوند دارای عملکرد بالایی در شرایط تنش می‌باشند، ولی عملکرد آن‌ها در شرایط بدون تنش پایین

Chamanabad, 2022) نیز با ارزیابی ۱۹ ژنوتیپ جو همراه با رقم شاهد گوهران گزارش کردند که برای انتخاب ژنوتیپ-های جو در مناطقی که با تنش خشکی انتهای فصل مواجه هستند، می‌توان از شاخص‌های GMP، HM، YI و STI استفاده نمود. علوی و همکاران (Alavi et al., 2014) در ارزیابی تحمل به تنش خشکی در ژنوتیپ‌های مختلف آفتابگردان نشان دادند که بین شاخص‌های STI، MP، GMP و HM با عملکرد دانه در شرایط تنش و عدم تنش همبستگی مثبت و معنی‌داری وجود دارد. لذا، شاخص‌های مذکور به‌عنوان مناسب‌ترین شاخص‌های تحمل به خشکی در نظر گرفته شدند. صارمی و همکاران (Saremi et al., 2022) نیز شاخص‌های STI، MP، GMP و HM را برای انتخاب ژنوتیپ‌های با عملکرد بالا و متحمل به تنش خشکی در جو معرفی کردند.

به‌منظور انتخاب نهایی ژنوتیپ‌های متحمل به تنش خشکی بر مبنای شاخص‌های تحمل به خشکی مورد بررسی، از شاخص‌های مختلف ترکیبی SIIG (Zali et al., 2015; Olivoto and Nardino, 2020) و CSI (Sabouri et al., 2022) استفاده شد (جدول ۵). 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. به‌منظور محاسبه شاخص MGIDI از شاخص‌های STI، MP، GMP، HM، SNPI و YI که همبستگی معنی‌داری با عملکرد دانه در هر دو شرایط تنش و بدون تنش داشتند و همچنین Yp و Ys استفاده شد. در این تحقیق ارزش ژنوتیپ‌ها بر اساس بالا بودن مقدار شاخص‌های Yp، Ys، STI، MP، GMP، HM، SNPI و YI محاسبه شد. در شاخص MGIDI ژنوتیپ‌هایی با کمترین مقدار، مطلوب‌ترین ژنوتیپ‌ها محسوب می‌شوند؛ بنابراین، ژنوتیپ‌های ۴، ۲۰، ۲۱ و ۱۶ به ترتیب جزء ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی بر اساس شاخص ترکیبی MGIDI شناخته شدند (جدول ۵). نتایج همبستگی نشان داد که شاخص MGIDI همبستگی منفی و معنی‌دار با Yp (-0.96^{**}) و Ys (-0.99^{**}) دارد (شکل ۱). نتایج مشابهی توسط دست‌فال و همکاران (Dastfall et al., 2024) در گندم دوروم گزارش شده است. کارایی شاخص MGIDI در انتخاب ژنوتیپ‌های برتر در سایر تحقیقات نیز

گزارش شده است (Shirzad et al., 2022; Zali and Pour-Aboughadareh, 2023).

در این تحقیق از شاخص SIIG به‌منظور انتخاب ژنوتیپ-های متحمل به خشکی، با استفاده از شاخص‌های Yp، Ys، STI، MP، GMP، HM، SNPI و YI به‌طور هم‌زمان، استفاده شد. شاخص SIIG، بر مبنای هشت شاخص مورد بررسی و فرضیات شبیه به شاخص MGIDI محاسبه شد (جدول ۵). با توجه به این‌که میزان تغییرات شاخص SIIG بین صفر و یک است، هر چه مقدار آن برای یک ژنوتیپ به یک نزدیک‌تر باشد، آن ژنوتیپ از تحمل به تنش خشکی بالاتری برخوردار است (Zali et al., 2015). بر اساس شاخص SIIG، ژنوتیپ‌های شماره ۴، ۲۰، ۲۱ و ۱۶ به ترتیب با بیشترین مقدار SIIG (به ترتیب ۰/۱۰۰، ۰/۹۰، ۰/۸۲ و ۰/۷۹)، جزء ژنوتیپ‌های متحمل به تنش خشکی شناخته شدند (شکل ۱ و جدول ۷). مقدار عددی یک در شاخص SIIG برای ژنوتیپ ۴ نشان داد که در همه شاخص‌های مورد بررسی این ژنوتیپ برتر از سایر ژنوتیپ‌های مورد بررسی بوده است. همچنین مقدار عددی صفر در شاخص MGIDI نیز این مطلب را تأیید می‌کند (جدول ۷). نتایج همبستگی بین شاخص SIIG و Yp و Ys نشان داد که شاخص SIIG همبستگی بالا و معنی‌داری با Yp (0.95^{**}) و Ys (0.99^{**}) دارد (شکل ۱). در تحقیقات متعددی، کارایی شاخص SIIG بر اساس ادغام شاخص‌های مختلف تحمل به تنش غیرزیستی گزارش شده است (Yaghotipoor et al., 2017; Ramzi et al., 2018; Abdollahi Hesar et al., 2021; Taleghani and Saremirad, 2023). در سایر تحقیقات نیز کارایی شاخص SIIG گزارش شده است (Barati et al., 2021; Dastfall et al., 2024).

برای محاسبه شاخص CSI (Sabouri et al., 2022) از شاخص‌های STI، MP، GMP، HM، SNPI و YI که همبستگی معنی‌داری با Yp و Ys داشتند، استفاده شد. نتایج نشان داد که ژنوتیپ‌های شماره ۴، ۲۰، ۲۱ و ۱۶ به ترتیب با بیشترین مقدار CSI، بیشترین تحمل به تنش خشکی را داشتند (جدول ۵). نتایج نشان داد شاخص CSI مانند شاخص SIIG همبستگی معنی‌داری با Yp (0.95^{**}) و Ys (0.99^{**}) دارد (شکل ۱). نتایج مشابهی نیز توسط دست‌فال و همکاران (Dastfall et al., 2024) گزارش شده است. از طرفی کارایی شاخص CSI در شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل

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

تجزیه به مؤلفه اصلی با استفاده از شاخص‌های تحمل به خشکی و شاخص‌های ترکیبی در شکل ۲ نشان داده شده است. بر اساس نتایج تجزیه PCA، اولین و دومین مؤلفه به ترتیب ۶۸/۷ و ۲۸/۴ درصد از تغییرات ارتباط بین شاخص‌های تحمل به تنش خشکی را توجیه کردند (شکل A۲). در مؤلفه اول علاوه بر MGIDI، شاخص‌های CSI، SIIG، HARM، GMP، MP، STI، YS، YI و YP به ترتیب بیشترین سهم را داشتند (شکل B۲). شاخص‌های SSPI، YSI، RDI، TOL، ATI، YP، SNPI، YI و YS به ترتیب دارای بیشترین سهم در دومین مؤلفه بودند (شکل C۲)؛ بنابراین، مؤلفه اول می‌تواند بیانگر تحمل به تنش خشکی باشد و دومین مؤلفه حساسیت به تنش را نشان می‌دهد. نتایج مشابهی نیز توسط شاهمرادی و زهراوی (Shahmoradi et al., 2016) در ژنوتیپ‌های جو و دست-فال و همکاران (Dastfall et al., 2024) در ژنوتیپ‌های دوروم گزارش شده است.

بر اساس نتایج بای‌پلات (شکل A۲) که بر مبنای دو مؤلفه اول و دوم رسم شده و ۹۷/۱ درصد تغییرات ارتباط بین شاخص‌های تحمل به تنش خشکی را توجیه نموده است، شاخص‌های تحمل به تنش خشکی در پنج گروه قرار گرفتند. شاخص‌های CSI، SIIG، Ys، YI، SNPI، HARM، GMP، STI، MP و Yp در یک گروه قرار گرفتند. شاخص‌های این گروه، بیشترین همبستگی را با عملکرد دانه در شرایط تنش و بدون تنش داشتند و ژنوتیپ‌های شماره ۴، ۱۶ و ۲۰ جزء ژنوتیپ‌های برتر در این گروه بودند که دارای عملکرد دانه بالاتر از میانگین کل هم در شرایط تنش و هم در شرایط بدون تنش بودند. بر این اساس شاخص‌های این گروه برای شناسایی ژنوتیپ‌های پرمحصول و متحمل به تنش خشکی، بهتر از سایر شاخص‌ها بودند (شکل A۲). در تحقیق دیگر شاخص‌های GMP، MP، STI و HM که در یک گروه قرار داشتند و از نظر شناسایی ژنوتیپ‌های پرمحصول و متحمل به تنش خشکی در گندم دوروم، نسبت به سایر شاخص‌ها برتری داشتند (Dastfall et al., 2024). در ارزیابی ژنوتیپ‌های گندم دوروم برای تحمل به تنش خشکی و ارتباط بین شاخص‌ها، از روش PCA استفاده شد و گزارش شد که شاخص‌های MP، GMP، STI، YI و HM بیشترین

همبستگی را با عملکرد در شرایط تنش و بدون تنش داشتند (Sangi et al., 2022).

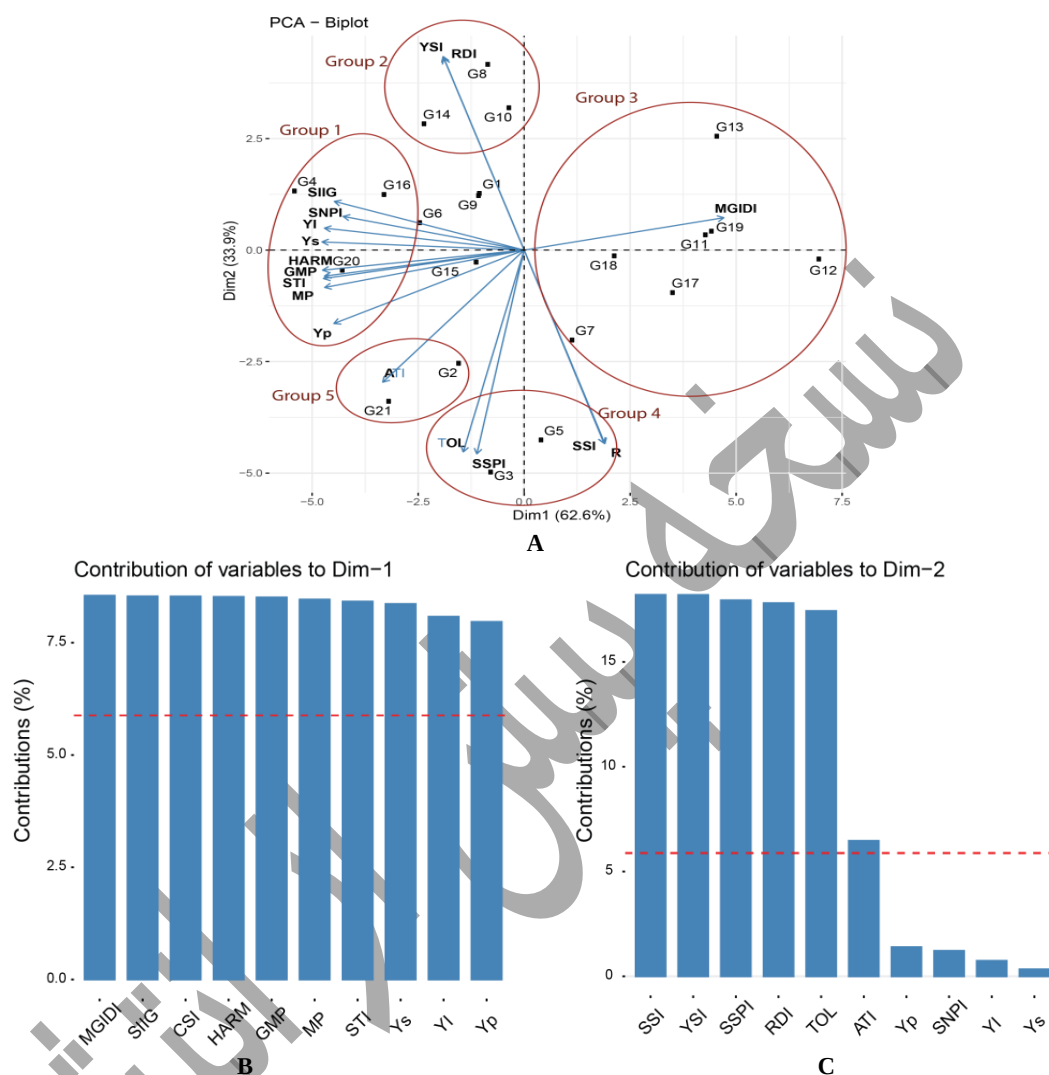
در گروه دو شاخص‌های YSI و RDI قرار داشتند و ژنوتیپ‌های شماره ۸، ۱۰ و ۱۴ به‌عنوان ژنوتیپ‌های برتر با این شاخص‌ها معرفی شدند. ژنوتیپ‌های این گروه دارای عملکرد پایین در شرایط بدون تنش بودند. گروه سه شامل شاخص MGIDI بود. این شاخص با شاخص‌های گروه یک همبستگی منفی و معنی‌داری داشت و از آنجایی که در این شاخص مقادیر پایین ایده‌آل است، ژنوتیپ‌های این گروه جزء ژنوتیپ‌های با عملکرد پایین در هر دو شرایط تنش و بدون تنش بودند و به‌عنوان ضعیف‌ترین ژنوتیپ‌ها در این تحقیق معرفی شدند. شاخص‌های SSPI، SSPI و TOL در گروه چهار قرار داشتند و از آنجایی که مقادیر پایین این شاخص‌ها ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی را شناسایی می‌کند، بنابراین ژنوتیپ‌های گروه دو (ژنوتیپ‌های شماره ۸، ۱۰ و ۱۴) جزء ژنوتیپ‌های برتر در این گروه بودند. در گروه پنج تنها شاخص ATI قرار داشت. این شاخص ژنوتیپ‌های با عملکرد بالا در شرایط تنش و عملکرد پایین در شرایط بدون تنش را شناسایی می‌کند؛ بنابراین، ژنوتیپ‌های شماره ۲ و ۲۱ جزء ژنوتیپ‌های برتر در گروه بودند و ژنوتیپ‌های انتخابی مستعد مناطق بدون تنش خشکی می‌باشند. ژنوتیپ‌های شماره ۱، ۹، ۶ و ۱۵ نیز دارای عملکرد متوسط در هر دو شرایط تنش و بدون تنش بودند و از نظر هیچ‌کدام از شاخص‌ها جزء ژنوتیپ‌های برتر نبودند (شکل A۲).

نتیجه‌گیری نهایی

بر اساس نتایج تجزیه PCA، شاخص‌های مختلف تحمل به خشکی و شاخص‌های ترکیبی در پنج گروه قرار گرفتند. شاخص CSI و SIIG به همراه شاخص‌های Ys، YI، SNPI، HARM، GMP، STI، MP و Yp در یک گروه قرار گرفتند. شاخص‌های این گروه با توجه به شناسایی ژنوتیپ‌های پرتوانسپیل در هر دو شرایط تنش و بدون تنش به‌عنوان شاخص‌های برتر در این تحقیق شناسایی شدند. هدف از استفاده از شاخص‌های ترکیبی SIIG، MGIDI و CSI انتخاب بهتر ژنوتیپ‌های برتر و افزایش کارایی انتخاب است. در این تحقیق نیز به‌منظور افزایش کارایی انتخاب از شاخص‌های تحمل به خشکی که همبستگی معنی‌داری با Ys و Yp داشتند، استفاده شد. نتایج هر سه شاخص مشابه هم بود، بر اساس نتایج هر سه شاخص ژنوتیپ‌های شماره ۴، ۲۰

برتر بود؛ بنابراین، ژنوتیپ ۴ بر اساس نتایج هر سه شاخص به عنوان برترین ژنوتیپ شناخته شد.

(ژنوتیپ شاهد)، ۲۱ و ۱۶ به عنوان ژنوتیپ‌های برتر انتخاب شدند، ولی تنها ژنوتیپ‌ها شماره ۴ از همه ژنوتیپ‌های شاهد



شکل ۲. بای پلات تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA) برای شاخص‌های تحمل و حساسیت به خشکی و شاخص‌های انتخاب در ژنوتیپ‌های امیدبخش جو (A). سهم شاخص‌های مختلف در اولین مؤلفه PCA (B) و دومین مؤلفه PCA (C)

Fig. 2. Biplot of principal components analysis (PCA) for drought tolerance and sensitivity indices and selection indices in promising barley genotypes (A). The contribution of different indices in the first PCA component (B) and the second PCA component (C)

منابع

Abdollahi Hesar, A., Sofalian, O., Alizadeh, B., Asghari, A., Zali, H., 2021. Investigation of frost stress tolerance in some promising rapeseed genotypes. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 31(2), 271–288. [In Persian]. <https://doi.10.22034/saps.2021.13109>

Alavi, S. R., Darvishzadeh, R., Valizadeh, M., Moghadam, M., Farrokhi, E., Basirnia, A.,

Pirzad, A., 2014. Evaluation of drought tolerance indices in various sunflowers cultivars (*Helianthus annuus* L.). *Research in Field Crops*. 2(1), 16–27.

Arazmjoo, E., Nikkhah Chamanabad, H., 2022. Selecting tolerant barley genotypes to terminal drought stress based on grain yield stability and stress tolerance indices. *Cereal Research*, 11(4), 325–341. [In Persian].

- <https://doi.org/10.22124/CR.2022.21573.1710>
- Banerjee, K., Krishnan, P., Das, B., 2020. Thermal imaging and multivariate techniques for characterizing and screening wheat genotypes under water stress condition. *Ecological Indicators*, 119, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106829>
- Barati, A., Zali, H., Marzoqian, A., Koohkan, S., 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(1), 199–218. [In Persian]. <https://doi.org/10.22069/ejcp.2021.18845.2403>
- Bihamta, M., Shirkavand, M., Hasanpour, J., Afzalifar, A., 2018. Evaluation of durum wheat genotypes under normal irrigation and drought stress conditions. *Journal of Crop Breeding*, 9(24), 119–136. [In Persian]. <https://doi.org/10.29252/jcb.9.24.119>
- Bouslama, M., Schapaugh Jr, W. T., 1984. Stress tolerance in soybeans. I. Evaluation of three screening techniques for heat and drought tolerance 1. *Crop Science*, 24(5), 933–937. <https://doi.org/10.1201/9781351075718>
- Choukan, R., Taherkhani, T., Ghanadha, M. R., Khodarahmi, M., 2006. Evaluation of drought tolerance in grain maize inbred lines using drought tolerance indices. *Iranian Journal of Crop Science*, 8(1), 79–89. [In Persian]. <https://doi.org/10.15625540.1385.8.1.7.6>
- Damm, A., Paul-Limoges, E., Haghighi, E., Simmer, C., Morsdorf, F., Schneider, F.D., van der Tol, C., Migliavacca, M., Rascher, U., 2018. Remote sensing of plant-water relations: An overview and future perspectives. *Journal of Plant Physiology*, 227, 3–19. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2018.04.012>
- Dashtfall, M., Najafi Mirak, T., Zali, H., 2024. Selection of durum wheat (*Triticum turgidum* L. var. *durum*) genotypes tolerant to terminal season drought stress using multi-trait indices (MGIDI). *Iranian Journal of Crop Sciences*, 25(4), 342–361. [In Persian]. URL: <http://agrobreedjournal.ir/article-1-1334-en.html>
- Farshadfar, E., Poursiahbidi, M. M., Safavi, S. M., 2018. Assessment of drought tolerance in land races of bread wheat based on resistance/tolerance indices. *International Journal of Advanced Biological and Biomedical Research*, 6(4): 233–245.
- Fatemi, F., Kianersi, F., Pour-Aboughadareh, A., Pocza, P., Jadidi, O., 2022. Overview of identified genomic regions associated with various agronomic and physiological traits in barley under abiotic stresses. *Applied Sciences*, 12(10), 5189. <https://doi.org/10.3390/app12105189>
- Fernandez, G. C. J., 1992. Effective selection criteria for assessing plant stress tolerance. In: Kuo, C.G. (ed.), *Adaptation of Food Crops to Temperature and Water Stress*. Shanhu: Asian Vegetable Research and Development Center, Taiwan, Publ. No. 93-410, 257–270.
- Fischer, R. A., Maurer, R. 1978., Drought resistance in spring wheat cultivars. I. Grain yield responses. *Australian Journal of Agricultural Research*, 29(5), 897–912. <http://dx.doi.org/10.1071/AR9780897>
- Gavuzzi, P., Rizza, F., Palumbo, M., Campalino, R.G., Ricciardi, G.L., Borghi, B., 1997. Evaluation of field and laboratory predictors of drought and heat tolerance in winter and its components in wheat cultivars and landraces under near optimal and drought conditions. *Euphytica*, 113, 43–52. <https://doi.org/10.4141/P96-130>
- Kamraani, M., Ebadi, A., Mehreban, A., 2016. Evaluation of grain yield-based drought tolerance indices for screening durum wheat genotypes. *Jordan Journal of Agricultural Sciences*, 405 (3641), 1–17.
- Karami, E., Ghanadha, M. R., Naghavi, M. R., Mardi, M., 2005. An evaluation of drought resistance in barley. *Iranian Journal of Agricultural Science* 36, 547–560. [In Persian].
- Kassambara, A., Mundt, F., 2020. Factoextra: extract and visualize the results of multivariate data analyses, R package version 1.0. 7. 2020. Preprint At. <https://doi.org/10.1128/AEM.02796-18>
- Kumawat, G., Jakhar, M. L., Singh, V., Singh, J., Gothwal, D. K., Yadava, D. K., 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(1), e14178. <https://doi.org/10.1111/ppl.14178>
- Maes, W.H., Steppe, K., 2019. Perspectives for remote sensing with Unmanned Aerial Vehicles in precision agriculture. *Trends In Plant Science*, 24(2), 152–164. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2018.11.007>
- Majidi, M. M., Jafarzadeh Ghahdrijani, M.,

- Rashidi, F., Mirlohi, A., 2014. Identification of canola cultivars with drought tolerance indices. Iranian Journal of Field Crop Science, 45(4), 565–573. [In Persian]. <https://doi.org/10.22059/ijfcs.2014.53566>
- Moghaddam, A., Hadizadeh, M. H., 2002. Response of corn (*Zea mays* L.) hybrids and their parental lines to drought using different stress tolerance indices. Seed and Plant, 18(3), 255–272. <https://doi.org/10.22092/spij.2017.110741>
- Mousavi, S. S., Yazdi, S. B., Naghavi, M. R., Zali, A. A., Dashti, H., Pourshahbazi, A., 2008. Introduction of new indices to identify relative drought tolerance and resistance in wheat genotypes. Desert. 12(2), 165–178. <https://doi.org/10.22059/jdesert.2008.27115>
- Nazari., Pakniyat, H., 2010. Assessment of drought tolerance in barley genotypes. Journal of Applied Science, 2, 151–156. <https://doi.org/10.3923/jas.2010.151.156>
- Olivoto, T., Nardino, M., 2020. MGIDI: Toward an effective multivariate selection in biological experiments. Bioinformatics, 37(10), 1383–1389. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btaa981>
- Patel, J. M., Patel, A. S., Patel, C. R., Mamrutha, H. M., Pradeep, S., Pachchigar, K. P., 2019. Evaluation of selection indices in screening durum wheat genotypes combining drought tolerance and high yield potential. International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences, 8(4), 1165–1178. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2019.804.134>
- Pour-Aboughadareh, A., Barati, A., Gholipoor, A., Zali, H., Marzooghian, A., Koohkan, S. A., Shahbazi-Homonloo, K., Houseinpour, A., 2023. Deciphering genotype-by-environment interaction in barley genotypes using different adaptability and stability methods. Journal of Crop Science and Biotechnology, 26(5), 547–562. <https://doi.org/10.1007/s12892-023-00199-z>
- Ramzi, E., Asghari, A., Khomari, S., Mohammaddoust Chamanabad, H., 2018. Investigation of durum wheat (*Triticum turgidum* L. subsp. *durum* Desf) lines for tolerance to aluminum stress condition. Journal of Crop Breeding, 10(25), 63–72. <http://dx.doi.org/10.29252/jcb.10.25.63>
- Rosielle, A. A., Hamblin, J., 1981. Theoretical aspects of selection for yield in stress and non-stress environment 1. Crop Science, 21(6), 943–946. <https://doi.org/10.2135/cropsci1981.0011183X002100060033x>
- 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(1), 2163. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-06123-9>
- Sangi, S. E., Najaphy, A., Cheghamirza, K., Mohammadi, R., 2022. Assessment of drought tolerance indices in durum wheat (*Triticum durum* L.) genotypes. Environmental Stress In Crop Sciences. 14, 901–911. [In Persian]. <https://doi.org/10.22077/escs.2020.3310.1842>
- Saremi, Z., Shahbazi, M., Zeinalabedini, M., Majidi Haravan, E., Azizinezhad, R., 2022. Evaluation of Drought Tolerance in Barley Genotypes (*Hordeum vulgare* L.) using Drought Tolerance Indices. Journal of Crop Breeding, 14(41), 10–18. <http://dx.doi.org/10.52547/jcb.14.41.10>
- Shahmoradi, S., Zahravi, M., 2016. Evaluation of drought tolerance in barley (*Hordeum vulgare* L.) germplasm from warm and dry climates of Iran. Seed and Plant. 32(2), 181–200, [In Persian]. http://spij.spji.ir/browse.php?a_id=822&sid=1&slc_lang=en
- Shirzad, A., Asghari, A., Zali, H., Sofalian, O., Mohammaddoust Chamanabad, H., 2022. 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(44), 65–76. [In Persian]. <https://doi.org/10.52547/jcb.14.44.65>
- Taleghani, D., Saremirad, A., 2023. Drought impacts on the reaction of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) pollinat or lines in terms of sugar. Crop Science Research in Arid Regions, 4(2), 371–388. <https://doi.org/10.22034/csrar.2022.321003.1173>
- Vaezi, B., Pour-Aboughadareh, A., Mohammadi, R., Armion, M., Mehraban, A., Hossein-Pour, T., Dorii, M., 2017. GGE biplot and AMMI analysis of barley yield performance in Iran. Cereal Research Communications, 45, 500–511. <https://doi.org/10.1556/0806.45.2017.019>
- Wen, W., Timmermans, J., Chen, Q., van Bodegom, P.M., 2021. A review of remote

- sensing challenges for food security with respect to salinity and drought threats. *Remote Sensing*, 13, 1–14.
<https://doi.org/10.3390/rs13010006>
- Wen, P., Meng, Y., Gao, C., Guan, X., Wang, T.C., Feng, W., 2023. Field identification of drought tolerant wheat genotypes using canopy vegetation indices instead of plant physiological and biochemical traits. *Ecological Indicators*, 154, 110781.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110781>
- Yaghotipour, A., Farshadfar, E. A., Saeidi, M. 2017., Evaluation of drought tolerance in bread wheat genotypes using new mixed method. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 10(2), 247–256. [In Persian].
<http://dx.doi.org/10.22077/escs.2017.581>
- Zali, H., Barati, A., Pour-Aboughadareh, A., Gholipour, A., Koohkan, S., Marzoghiyan, A., Bocianowski, J., Bujak, H., Nowosad, K. 2023., Identification of superior barley genotypes using selection index of ideal genotype (SIIG). *Plants*, 12(9), 1843. [In Persian].
<https://doi.org/10.3390/plants12091843>
- Zali, H., Pour-Aboughadareh, A., 2023. Identification of superior genotypes of barley for cultivation the south regions of Fars province using MGIDI و FAI-BLUP indices. *Plant Productions*, 46(3), 335–351. [In Persian].
<https://doi.10.22055/ppd.2024.45295.2134>
- Zali, H., Sofalian, O., Hasanloo, T., Asgharii, 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*, 7(2), 703.
<http://www.researchtrend.net>