

Original article

Selection of advanced bread wheat genotypes for tolerance to end-season drought stress using MGIDI and IGSI multi-trait selection indices

Ahmad Shahizadeh¹, Rasool Asghari Zakaria^{2*}, Marefat Ghasemi Kalkhoran³, Parisa Sheikhzadeh Mosaddeq⁴

1. Ph.D. Student, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran
2. Professor, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran
3. Assist. Professor, Horticulture and Crops Research Department, Agricultural and Natural Resources Research and Education Center of Ardabil Province, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Ardabil, Iran
4. Associate Professor, Department of Plant Production, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

Received 8 November 2023; Revised 26 November 2023; Accepted 11 December 2023

Extended abstract

Introduction

Drought stress is the most critical cause of wheat yield reduction in semi-arid regions. Drought affects wheat yield somewhat during the growing season, but yield reduction predominantly occurs during the reproductive and grain-filling stages. This research aimed at the identification of end-season drought stress-tolerant wheat genotypes based on tolerance and sensitivity indices using the ideotype genotype selection index (IGSI) and the multi-trait genotype–ideotype distance index (MGIDI) multi-trait selection indices.

Materials and methods

In this study, 18 bread wheat genotypes and two control cultivars were evaluated based on a randomized complete block design with three replications under two conditions: full irrigation and end-season drought stress. The experiment was conducted at the Ardabil Agricultural Research Station during the 2021-2022 season. The genotypes were sown in plots of 2.5 m × 3 m with a row spacing of 20 cm. The full-irrigation treatment received 100% of the crop's water requirement, while in the drought stress treatment, the irrigation stopped after heading. Standard agronomic practices were followed throughout the growing season and data on traits such as yield were recorded. Tolerance and stress indices, including tolerance index (TOL), mean productivity (MP), stress tolerance index (STI), modified stress tolerance index (MSTI), geometric mean productivity (GMP), harmonic mean (HM), stress susceptibility index (SSI), yield index (YI), yield stability index (YSI), and yield reduction percentage (YRP) were calculated. Statistical analysis was performed using ANOVA, and the means were compared using the least significant difference (LSD) test at the 5% probability level. Additionally, IGSI and MGIDI selection indices were also determined to evaluate the drought tolerance of the genotypes.

Results and discussion

The experiment results indicated that based on lower YRP, TOL, and SSI indices, genotypes 11, 5, 9, and 10 were selected as tolerant genotypes. Nevertheless, genotypes 12, 2, 1, and 6 were superior based on

* Corresponding author: Rasool Asghari Zakaria; E-Mail: r-asghari@uma.ac.ir



higher STI and Harm indices. Also, genotypes 12, 1, 11, and 3 were best in the k2STI and YI indices. Additionally, genotypes 14, 4, 2, and 6 were tolerant based on the k1STI index, genotypes 11, 9, 5, and 10 in the YSI index, genotypes 2, 12, 14, and 4 in the MP index, and genotypes 12, 2, 4, and 1 in the GMP index. Using the multivariate selection indices of the IGSI and MGIDI, genotypes 11, 5, 1, and 12, with the highest IGSI value and the lowest MGIDI value, are among the genotypes with high end-season drought stress tolerance. This was confirmed through heat map cluster analysis and bi-plot diagram in principle components analysis. Also, genotypes 20, 16, and 19, having the lowest value of IGSI and the highest MGIDI, showed higher sensitivity to drought stress. The comparison of the means of the selected genotypes with the total means showed that these genotypes under the end-of-the-season drought stress conditions performed better in stress conditions (with higher Ys) and had less yield reduction compared to the average of other genotypes.

Conclusion

The ideotype genotype selection index (IGSI) and the multi-trait genotype–ideotype distance index (MGIDI) for different genotypes based on the quantitative indices of tolerance and stress show that genotype 11, having a high value of IGSI and the lowest value of MGIDI is the most tolerant to end-season drought stress. The genotypes 5, 1, and 12 were ranked next. Based on these results, it is clear that different genotypes exhibit varying levels of drought tolerance based on the indices evaluated. Overall, the results of this experiment provide valuable insights into the potential for improving drought tolerance in wheat through the selection of tolerant genotypes using IGSI and MGIDI indices. The selected genotypes can be further evaluated for their agronomic and physiological traits to confirm their suitability for cultivation in drought-prone areas.

Keywords: Abiotic stress, Multivariate selection, Stress sensitivity index, Water limitation

گزینش ژنوتیپ‌های پیشرفته گندم نان برای تحمل به تنش خشکی آخر فصل با استفاده از شاخص‌های گزینش چند صفتی MGIDI و IGSI

احمد شاه‌ی زاده^۱، رسول اصغری زکریا^{۲*}، معرفت قاسمی کلخوران^۳، پریسا شیخ‌زاده مصدق^۴

۱. دانشجوی دکتری، گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی

۲. استاد گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی

۳. استادیار، بخش تحقیقات زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی اردبیل، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اردبیل

۴. دانشیار گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی

مشخصات مقاله	چکیده
واژه‌های کلیدی: انتخاب چندمتغیره تنش غیرزیستی حساسیت به تنش محدودیت آبی	به منظور شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی با استفاده از شاخص‌های تحمل به تنش خشکی، تعداد ۱۸ ژنوتیپ گندم نان به همراه ۲ رقم شاهد در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در دو شرایط آبیاری کامل و تنش خشکی آخر فصل در سال زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ در ایستگاه تحقیقات کشاورزی اردبیل اجرا شد. عملکرد در شرایط بدون تنش (Y_p) و عملکرد در شرایط تنش (Y_s) اندازه‌گیری و از روی آن شاخص‌های تحمل و حساسیت به تنش مختلف برآورد شدند. با استفاده از شاخص‌های گزینش چند متغیره شاخص انتخاب ژنوتیپ ایده‌آل (IGSI) و شاخص فاصله چند متغیره ژنوتیپ از ژنوتیپ ایده‌آل (MGIDI)، ژنوتیپ‌های ۱۱، ۵، ۱ و ۱۲ با داشتن بیشترین مقدار IGSI و کمترین مقدار MGIDI، جزو ژنوتیپ‌های با تحمل تنش خشکی آخر فصل شناخته شدند که این موضوع از طریق تجزیه کلاستر، نقشه حرارتی و نمودار بای‌پلات در تجزیه به مؤلفه‌های اصلی نیز مورد تأیید قرار گرفت. مقایسه میانگین ژنوتیپ‌های منتخب با میانگین کل برای شاخص‌های مورد مطالعه در شرایط تنش خشکی آخر فصل نشان داد که ژنوتیپ‌های منتخب تحت شرایط تنش خشکی آخر فصل از لحاظ عملکرد در شرایط تنش بالاتر از میانگین کل بودند و به‌ویژه کاهش عملکرد کمتری در شرایط تنش در مقایسه با میانگین ژنوتیپ‌های دیگر نشان دادند. در کل، نتایج این آزمایش نشان داد که می‌توان ژنوتیپ‌های گندم متحمل به خشکی را با استفاده از شاخص‌های IGSI و MGIDI انتخاب کرد. ژنوتیپ‌های انتخاب‌شده را می‌توان از نظر ویژگی‌های زراعی و فیزیولوژیکی بیشتر ارزیابی کرد تا مناسب بودن آن‌ها برای کشت در مناطق مستعد خشکی تأیید شود.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۱۷ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۹/۰۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۲۰ تاریخ انتشار: بهار ۱۴۰۴ ۱۵۵-۱۴۱ (۱): ۱۸	

مقدمه

قلمداد می‌شود (Lugojan and Ciulca, 2011). شاخص‌های متفاوتی برای بررسی واکنش ژنوتیپ‌ها به تنش خشکی و تعیین تحمل و حساسیت آن‌ها بر اساس ارزیابی عملکرد دانه در شرایط بدون تنش و تنش ارائه شده‌اند و این شاخص‌ها از طریق شناسایی ژنوتیپ‌های سازگار به شرایط تنش و بدون تنش در دست‌یابی به لاین‌های برتر مؤثرند (Jafari et al., 2009). گزارش‌های مختلف نشان داده‌اند که سه شاخص میانگین بهره‌وری (MP)، شاخص تحمل به تنش

گندم نان (*Triticum aestivum* L.) یکی از غلات مهم است که کشت و کار آن اغلب با تنش‌های مختلف زیستی و غیرزیستی که بر رشد و تولید آن تأثیر منفی می‌گذارند، مواجهه است (Saddiq et al., 2021). تنش خشکی به‌ویژه در مراحل زایشی و پر شدن دانه مهم‌ترین علت کاهش عملکرد گندم در مناطق نیمه‌خشک است (Farshadfar et al., 2011; Cappelli, 2021). اصلاح ارقام متحمل به خشکی یکی از مهم‌ترین راهکارهای مقابله با کمبود آب

مختلف تحمل و حساسیت به تنش خشکی و گزینش ژنوتیپ-های متحمل به کمک شاخص‌های انتخاب چند صفتی مانند شاخص‌های MGIDI و IGSI بود تا بتوان ژنوتیپ‌های برتر را با اطمینان بیشتر شناسایی کرد.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش ۱۸ ژنوتیپ گندم نان به همراه دو رقم شاهد (جدول ۱) از بخش تحقیقات غلات مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اردبیل وابسته به مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر کشور تهیه شدند. این ژنوتیپ‌ها بخشی از برنامه به نژادی گندم بودند که به دلیل برتری طی آزمایش‌های مربوط در سال‌های قبل از جمله آزمایش مقایسه عملکرد مقدماتی و پیشرفته انتخاب و در این آزمایش همراه با شاهد‌های تجاری منطقه از نظر تحمل به تنش خشکی بعد از گرده‌افشانی ارزیابی شدند.

این بررسی در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در دو شرایط آبیاری کامل و تنش خشکی آخر فصل در ایستگاه تحقیقات کشاورزی اردبیل اجرا شد. این ایستگاه در طول جغرافیایی °۴۸ و °۲۰ و عرض جغرافیایی °۳۸ و °۱۵ و ارتفاع ۱۳۵۰ متر از سطح دریا و با اقلیم نیمه‌خشک و سرد با متوسط بارندگی ۳۱۰/۹ میلی‌متر و متوسط حداقل و حداکثر دمای سالانه ۱/۹۸- و ۱۵/۱۸ درجه سانتی‌گراد واقع شده است. ویژگی‌های خاک مزرعه در جدول ۲ آمده است. هر کرت در مزرعه شامل چهار خط سه متری، با فاصله خطوط ۲۰ سانتی‌متر و تراکم ۴۰۰ بذر در مترمربع بود. کشت در مهرماه ۱۳۹۹ انجام شد و آبیاری در مرحله جوانه‌زنی به‌منظور رسیدن به سطح سبز یکنواخت در هر دو شرایط انجام شد. در شرایط تنش از مرحله گلدهی تا رسیدگی دانه آبیاری انجام نشد، در صورتی‌که در شرایط بدون تنش از زمان گلدهی تا رسیدگی فیزیولوژیک در سه نوبت (اوایل گل‌دهی، اواسط دانه بستن و اواخر دانه بستن) آبیاری انجام گرفت.

ارزیابی ژنوتیپ‌های متحمل و حساس به تنش خشکی با استفاده از شاخص‌های کمی تحمل و حساسیت به تنش، با استفاده از میانگین عملکرد هر ژنوتیپ در شرایط بدون تنش (Yp) و شرایط تنش (Ys) طبق روابط زیر محاسبه گردید:

(STI) و شاخص میانگین هندسی بهره‌وری (GMP) همبستگی مثبت و معنی‌داری با عملکرد در شرایط تنش و بدون تنش داشته و می‌توانند شاخص‌های مناسبی برای شناسایی ارقام گندم متحمل به تنش خشکی آخر فصل باشند (Karimzadeh Sureshjani et al., 2012; Kamrani et al., 2018; Tahmasebi et al., 2015; al., 2015). با این حال، با افزایش تعداد این شاخص‌ها، انتخاب ژنوتیپ‌های برتر دشوار می‌شود و ممکن است هرکدام از آن‌ها منجر به انتخاب ژنوتیپ‌های متفاوتی بشوند. برای افزایش کارایی گزینش هم‌زمان برای چندین صفت یا شاخص، شاخص‌هایی مانند شاخص انتخاب ژنوتیپ ایده‌آل (IGSI)^۱ (Zali et al., 2016) و شاخص فاصله چند متغیره از ژنوتیپ ایده‌آل (MGIDI)^۲ (Olivoto and Nardino, 2020) مورد استفاده قرار می‌گیرند که برای محاسبه آن‌ها می‌توان از صفات مورفوفیزیولوژیک و شاخص‌های مختلف استفاده نمود. در این دو شاخص، صفات مختلف مورد بررسی به یک کمیت واحد تبدیل شده و رتبه‌بندی و تعیین ژنوتیپ‌های برتر بر اساس این کمیت انجام می‌گیرد (Zali et al., 2015; Olivoto and Nardino, 2020). استفاده از شاخص IGSI برای گزینش ژنوتیپ‌های برتر در تعدادی از مطالعات گزارش شده است. به‌طور مثال، استفاده از شاخص IGSI برای معرفی ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی در گندم نان (Yaghutipoor et al., 2017) و کلزا (Zali et al., 2019)، جفجفک (Solat et al., 2023)، شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل به تنش آلومینیوم در گندم دوروم (Ramzi et al., 2018)، تعیین ژنوتیپ‌های متحمل به تنش یخ‌زدگی در کلزا (Abdollahi Hesar et al., 2021) و شناسایی ژنوتیپ‌های مطلوب عدس در شرایط دیم (Amiri et al., 2021) گزارش شده است. شاخص MGIDI نیز توسط اولیوتو و ناردینو (Olivoto and Nardino, 2020) برای تسهیل گزینش ژنوتیپ‌های مطلوب بر اساس اطلاعات چند صفت در توت‌فرنگی استفاده شد. همچنین استفاده از شاخص MGIDI توانست غربالگری ژنوتیپ‌های جو نسبت به تنش شوری را در مراحل اولیه رشد تسریع کند (Pour-Aboughadareh et al., 2021).

هدف از این پژوهش ارزیابی ژنوتیپ‌های پیشرفته گندم برای تحمل به خشکی آخر فصل با استفاده از شاخص‌های

² The multi-trait genotype-ideotype distance index (MGIDI)

¹ Ideotype genotype selection index (IGSI)

جدول ۱. ژنوتیپ‌های گندم مورد استفاده در آزمایش و شجره آن‌ها

Table 1. Wheat genotypes used in the experiment and their genealogy

شماره ژنوتیپ‌ها Genotype number	شجره Pedigree
G1	Zarrineh
G2	Heyran
G3	EVWYT2/Azd/Rsh*2/10120/3/ Yan7578.128//Chil/2*Star
G4	Charger/40817
G5	Zagross/Astet
G6	40653//CM67A.912/CMH76A.769
G7	Shpd/Guadalop//Zareh
G8	EVWYT2/Azd/Rsh*2/10120/4/ Ghk"s"/Bow"s"/90Zhong87/3/Shiroodi
G9	Spb"s"/K1349/Go/3/Vee"s"/4/Bkt/90-Zhong 87
G10	Ymh/Tob//Lira(BDME-G)/3/Gaspard/4/Shahriyar
G11	B1551-WH/KS94U326/3/F10S-1//STOZHER/KARL/4/F10S-1//STOZHER/KARL
G12	MV SED
G13	ART/KS990494-11~O//KS06O3A~36
G14	ADAGIO
G15	PATWIN YR15/4/VORONA/HD2402/3/RSK/CA8055//CHAM6
G16	BABAX/LR42//BABAX*2/3/KURUKU/4/TX96V2427/5/KAUZ//ALTAR 84/AOS/3/F10S-1
G17	SAVALAN//KRC66/SERI/3/TORIK/4/2*F10S-1//STOZHER/KARL
G18	PRL/2*PASTOR//OVL/5/T67/JGR 'S'/K92/3/SNF/4/JGR 'S'/JGR 'S'/HBC059E
G19	FGMUT213
G20	AiIII192

جدول ۲. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه مورد آزمایش

Table 2. Physicochemical characteristics of the field soil

شوری Salinity	اسیدیته pH	درصد اشباع Saturation	درصد آهک Lime	درصد رس Clay	درصد سیلت Silt	درصد شن Sand	بافت Texture
dSm ⁻¹				%			
2.04	7.76	53	5	39	30	31	رسی لومی

Table 2. Continued

جدول ۲. ادامه

منگنز Mn	مس Cu	آهن Fe	روی Zn	پتاسیم قابل جذب Absorbable potassium	فسفر قابل جذب Absorbable phosphorus	نیتروژن Nitrogen	درصد کربن آلی Organic carbon
				ppm			%
4.27	8.56	2.52	2.32	594	2.2	0.08	0.858

شاخص میانگین هارمونیک (Hossain et al., 1990)

$$HM = 2(Y_p \times Y_s) / (Y_p + Y_s) \quad [۶]$$

شاخص حساسیت به تنش (Fischer and Maurer, 1978)

$$SSI = (1 - (Y_s / Y_p)) / SI \quad [۷]$$

شدت تنش خشکی (Fischer and Maurer, 1978)

$$SI = 1 - (\bar{Y}_s / \bar{Y}_p) \quad [۸]$$

شاخص عملکرد (Gavuzzi et al., 1997)

$$YI = Y_s / \bar{Y}_s \quad [۹]$$

شاخص پایداری عملکرد (Bouslama, and Chapaugh, 1984)

$$YSI = Y_s / Y_p \quad [۱۰]$$

شاخص تحمل (Rossielle and Hamblin, 1981)

$$TOL = Y_p - Y_s \quad [۱]$$

شاخص متوسط بهره‌وری (Hossain et al., 1990)

$$MP = (Y_p + Y_s) / 2 \quad [۲]$$

شاخص تحمل به تنش (Fernandez, 1992)

$$STI = (Y_p)(Y_s) / (\bar{Y}_p)^2 \quad [۳]$$

تحمل به تنش تغییر یافته (Farshadfar and Sutka, 2002)

$$MSTI = K_i . STI \quad [۴]$$

$$K1 = Y_p^2 / Y_p; K2 = Y_s^2 / Y_s$$

میانگین هندسی بهره‌وری (Hossain et al., 1990)

$$GMP = \sqrt{(\bar{Y}_p \times Y_s)} \quad [۵]$$

برای صفت ژام از ژنوتیپ $\bar{X}_{ij}$ از طریق رابطه ۱۶ به دست آمد:

$$rX_{ij} = \frac{\eta_{ij} - \varphi_{ij}}{\eta_{oj} - \varphi_{oj}} \times (\theta_{ij} - \eta_{oj}) + \eta_{ij} \quad [16]$$

که در آن η_{ij} و φ_{ij} به ترتیب حداکثر (۱۰۰) و حداقل (صفر) مقادیر جدید برای صفت ژام پس از تغییر مقیاس بودند. η_{oj} و φ_{oj} به ترتیب حداکثر و حداقل مقادیر صفت ژام هستند و θ_{ij} مقدار صفت ژام در ژنوتیپ $\bar{X}_{ij}$ است. مقادیر η_{ij} و φ_{ij} برای صفاتی که مقادیر کمتر آن‌ها مدنظر است (SSI, TOL, YRP)، از $\eta_{ij} = 0$ و $\varphi_{ij} = 100$ و برای صفاتی که مقادیر بالاتر آن‌ها موردنظر است (Y_s, Y_p) و شاخص‌های تحمل (دیگر)، از $\eta_{ij} = 100$ و $\varphi_{ij} = 0$ استفاده شد. پس از تغییر مقیاس، یک جدول دوطرفه از مقادیر جدید (rX_{ij}) به دست آمد. مرحله دوم تجزیه و تحلیل عاملی برای گروه‌بندی صفات مرتبط با هر عامل و سپس برآورد نمرات هر ژنوتیپ برای این فاکتورها است. مقادیر ویژه و بردارهای ویژه از ماتریس همبستگی ماتریس دوطرفه rX_{ij} به دست آمد. نمرات عاملی تنها با در نظر گرفتن عواملی با مقادیر ویژه بالاتر از یک به دست آمد. چرخش واریماکس برای چرخش و برآورد ضرایب نهایی استفاده شد. سپس نمرات ژنوتیپ‌ها به همراه ژنوتیپ ایده‌آل برای هر عامل به دست آمد. طبق تعریف (رابطه ۱۲)، ژنوتیپ ایده‌آل دارای بیشترین مقدار مقیاس جدید (۱۰۰) برای همه صفات مورد تجزیه و تحلیل است. در مرحله آخر شاخص فاصله چند متغیره از ژنوتیپ ایده‌آل (MGIDI) طبق رابطه ۱۷ محاسبه شد:

$$MGIDI_i = \sqrt{\sum_{j=1}^f (\gamma_{ij} - \gamma_j)^2} \quad [17]$$

که در آن $MGIDI_i$ شاخص فاصله چند متغیره از ژنوتیپ ایده‌آل برای ژنوتیپ i ام، γ_{ij} نمره ژنوتیپ i ام در فاکتور j ام ($j=1, 2, \dots, f$ و $i=1, 2, \dots, g$) است که g تعداد ژنوتیپ‌ها، f تعداد فاکتورها و γ_j نمره ژنوتیپ ایده‌آل در فاکتور j ام است. بر این اساس، ژنوتیپ با کمترین MGIDI به ژنوتیپ ایده‌آل نزدیک‌تر است و با محاسبه آن تمام شاخص‌ها در انتخاب ژنوتیپ‌های مطلوب لحاظ می‌شود.

تجزیه واریانس داده‌ها بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی و مقایسه میانگین تیمارها با استفاده از آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار (LSD) در سطح احتمال ۵ درصد، تجزیه عاملی بر اساس تجزیه به مؤلفه‌های اصلی، چرخش واریماکس به کمک نرم‌افزار SPSS و محاسبه شاخص‌های IGSI و MGIDI به ترتیب با استفاده از نرم‌افزار EXCEL و بسته

درصد کاهش عملکرد (Choukan et al., 2006)

$$YRP = \frac{(\bar{Y}_p - \bar{Y}_s)}{\bar{Y}_p} \times 100 \quad [11]$$

در روابط فوق، $\bar{Y}_p$ و $\bar{Y}_s$ به ترتیب میانگین عملکرد تمامی ژنوتیپ‌ها در محیط بدون تنش و تنش است. در شاخص MSTI، مقدار K_i ضریب تصحیح شاخص STI است که با توجه به شرایط محیطی و احتمال بروز شرایط مطلوب یا نامطلوب در آن محیط محاسبه می‌شود. مقدار K_1 نسبت مجذور عملکرد هر ژنوتیپ در شرایط مطلوب به مجذور میانگین عملکرد همه ژنوتیپ‌ها در همان شرایط است. مقدار K_2 نسبت مجذور عملکرد هر ژنوتیپ در شرایط تنش به مجذور میانگین عملکرد همه ژنوتیپ‌ها است. به منظور ارزیابی کارآمدتر تحمل خشکی ژنوتیپ‌ها با استفاده از کلیه شاخص‌های تحمل و حساسیت، شاخص انتخاب ژنوتیپ ایده‌آل (IGSI) و شاخص فاصله چند متغیره ژنوتیپ از ژنوتیپ ایده‌آل (MGIDI) محاسبه شد:

$$r_{ij} = \frac{X_{ij}}{\sqrt{\sum X_{ij}^2}} \quad [12]$$

سپس برای هر صفت یا شاخص بهترین ژنوتیپ به عنوان ژنوتیپ ایده‌آل و ضعیف‌ترین ژنوتیپ به عنوان ژنوتیپ ضعیف تعیین و انتخاب شدند. در گام بعدی فاصله اقلیدسی هر ژنوتیپ از ژنوتیپ‌های ایده‌آل (d_i^+) و ضعیف (d_i^-) طبق روابط زیر محاسبه شدند:

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^g (r_{ij} - r_i^+)^2} \quad [13]$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^g (r_{ij} - r_i^-)^2} \quad [14]$$

که در آن r_{ij} مقدار نرمال شده شاخص (صفت) i ام برای ژنوتیپ j ام ($j=1, 2, \dots, g$ و $i=1, 2, \dots, n$) و r_i^+ و r_i^- به ترتیب مقدار نرمال شده ژنوتیپ‌های ایده‌آل و ضعیف برای شاخص (صفت) i ام بود. در نهایت مقدار شاخص انتخاب ژنوتیپ ایده‌آل (IGSI) برای هر ژنوتیپ طبق رابطه ۱۵ محاسبه شد.

$$IGSI = \frac{d_i^-}{(d_i^+ + d_i^-)} \quad [15]$$

شاخص فاصله چند متغیره از ژنوتیپ ایده‌آل (MGIDI): برای محاسبه شاخص MGIDI ابتدا ماتریس X تغییر مقیاس داده شد به طوری که همه مقادیر دارای محدوده ۰-۱۰۰ شدند (Olivoto and Nardino, 2020). مقادیر تغییر مقیاس

$$SD_S\% = \frac{X_S - X_{ns}}{X_{ns}} \times 100 \quad [۱۹]$$

در این روابط SD_S و SD_T به ترتیب درصد دیفرانسیل انتخاب نسبت به میانگین کل و میانگین ژنوتیپ‌های غیر منتخب، X_S ، میانگین گروه منتخب، X_0 ، میانگین کل و X_{ns} میانگین ژنوتیپ‌های غیر منتخب هستند.

نتایج و بحث

بر اساس نتایج تجزیه واریانس، اختلاف معنی‌داری بین ژنوتیپ‌ها از نظر شاخص‌های تحمل خشکی وجود داشت (جدول ۳).

نرم‌افزاری metan در محیط R انجام گرفت (Olivoto and Nardino, 2020). ترسیم نقشه‌های حرارتی و تجزیه خوشه‌ای بر اساس روش Ward و فاصله اقلیدسی با استفاده از ابزار CIMMiner (discover.nci.nih.gov/cimminer) صورت گرفت. برای تعیین تعداد گروه‌ها از طریق تجزیه تابع تشخیص از نرم‌افزار SPSS استفاده شد. دیفرانسیل انتخاب طبق شاخص MGIDI بر اساس درصد اختلاف میانگین گروه منتخب از میانگین کل ($SD_T\%$) و از میانگین ژنوتیپ‌های غیر منتخب ($SD_S\%$) طبق روابط ۱۸ و ۱۹ محاسبه شد.

$$SD_T\% = \frac{X_S - X_0}{X_0} \times 100 \quad [۱۸]$$

جدول ۳. تجزیه واریانس شاخص‌های تحمل خشکی بر اساس طرح بلوک‌های کامل تصادفی

Table 3. Analysis of variance of drought tolerance indices based on randomized complete block design														
منابع تغییرات	df	HM	YRP	YI	GMP	MP	YSI	K ₂ STI	K ₁ STI	STI	SSI	TOL	Y _s	Y _p
S.O.V														
بلوک	2	0.29**	75.30**	1×10 ⁻⁴ ns	0.33**	0.38**	0.01**	2×10 ⁻⁴ ns	2×10 ⁻⁴ ns	0.01 ns	0.01 ns	0.68**	0.06 ns	1.06**
Block														
ژنوتیپ	19	0.78**	100.66**	0.02**	0.82**	0.87**	0.01**	0.06**	0.11**	0.04**	0.21**	0.93**	0.55**	1.66**
Genotype														
خطا	38	0.04	12.65	0.001	0.043	0.044	0.001	0.006	0.006	0.002	0.03	0.089	0.05	0.08
Error														
ضریب تغییرات		3.10	16.03	3.16	3.07	3.08	4.06	7.71	7.68	5.75	17.32	17.25	3.80	3.73
CV (%)														

ns، * و ** به ترتیب بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار و اختلاف معنی‌دار در سطوح احتمال پنج و یک درصد هستند.

عملکرد هر ژنوتیپ در شرایط بدون تنش (Yp)، عملکرد هر ژنوتیپ در شرایط تنش (Ys)، شاخص تحمل (TOL)، شاخص متوسط بهره‌وری (MP)، شاخص میانگین هندسی بهره‌وری (GMP)، میانگین هارمونیک (HM)، شدت تنش خشکی (SI)، شاخص حساسیت به تنش (SSI)، شاخص تحمل تنش (STI)، درصد کاهش عملکرد (YRP)، شاخص عملکرد (YI) و پایداری عملکرد (YSI).

ns, * and ** indicate no significant difference and significant difference at five and one percent probability levels, respectively. Yield of each genotype under non-stress conditions (Yp), yield of each genotype under stress conditions (Ys), tolerance index (TOL), mean productivity (MP), Geometric mean productivity (GMP), harmonic mean (HM), stress sensitivity index (SSI), stress tolerance index (STI), yield reduction percentage (YRP), yield index (YI), and yield stability (YSI).

از آنجاکه بالاترین میانگین عملکرد در شرایط نرمال و تنش متعلق به ژنوتیپ ثابتی نبود، محاسبه شاخص‌های کمی تحمل و حساسیت به تنش در ارزیابی و شناسایی ژنوتیپ‌های برتر انجام گرفت. هر چه شاخص‌های YRP، TOL و SSI کوچک‌تر باشد تحمل به خشکی ژنوتیپ‌ها بیشتر است؛ لذا بر اساس این شاخص‌ها ژنوتیپ‌های شماره ۵، ۱۱، ۹ و ۱۰ به عنوان ژنوتیپ‌های متحمل انتخاب شدند (جدول ۴).

بیشترین میانگین عملکرد دانه در شرایط بدون تنش (YP) به ترتیب متعلق به ژنوتیپ شماره ۱۴ (۸/۷۸ تن در هکتار)، ژنوتیپ شماره ۴ (۸/۵۴ تن در هکتار) و ژنوتیپ شماره ۲ (۸/۵۳ تن در هکتار) بود. در حالی که بیشترین عملکرد در شرایط تنش (YS)، به ترتیب متعلق به ژنوتیپ شماره ۱۲ (۶/۵ تن در هکتار)، ژنوتیپ شماره ۱ (۶/۴۶ تن در هکتار) و ژنوتیپ شماره ۱۱ (۶/۴۳ تن در هکتار) بود (جدول ۴).

جدول ۴. میانگین ژنوتیپ‌های گندم نان برای شاخص‌های تحمل و ضرایب عاملی شاخص‌های تحمل برای دو عامل اول و دوم در تجزیه عاملی به روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی

Table 4. The means of bread wheat genotypes for tolerance indices and the factor coefficients of these indices for the first and second factors in the factor analysis using the principal component analysis

Genotype	Yp	Ys	TOL	SSI	STI	K ₁ STI	K ₂ STI	YSI	MP	GMP	YI	YRP	HM
G1	8.11 ^b	6.46 ^a	1.65 ^{cdef}	0.90 ^{b-f}	0.89 ^{ab}	1.12 ^{bc}	1.18 ^a	0.80 ^{b-f}	7.29 ^{ab}	7.24 ^{ab}	1.09 ^a	20.34 ^{bcdef}	7.19 ^a
G2	8.53 ^{ab}	6.30 ^{ab}	2.23 ^{gh}	1.16 ^{fg}	0.91 ^a	1.23 ^{ab}	1.12 ^{ab}	0.74 ^{fgh}	7.41 ^a	7.33 ^a	1.06 ^{ab}	26.18 ^{fgh}	7.25 ^a
G3	8.21 ^b	6.34 ^{ab}	1.87 ^{efgh}	1.01 ^{def}	0.88 ^{ab}	1.14 ^{bc}	1.14 ^{ab}	0.77 ^{defg}	7.27 ^{ab}	7.21 ^{ab}	1.07 ^{ab}	22.78 ^{defg}	7.15 ^a
G4	8.54 ^{ab}	6.17 ^{ab}	2.36 ^{hi}	1.23 ^{fg}	0.89 ^{ab}	1.24 ^{ab}	1.08 ^{ab}	0.72 ^{gh}	7.35 ^a	7.26 ^{ab}	1.04 ^{ab}	27.68 ^{gh}	7.16 ^a
G5	7.50 ^c	6.36 ^{ab}	1.13 ^{bc}	0.67 ^{ef}	0.81 ^{bc}	0.95 ^d	1.14 ^{ab}	0.85 ^{bc}	6.93 ^{bc}	6.91 ^{bc}	1.07 ^{ab}	15.10 ^{bc}	6.88 ^{ab}
G6	8.35 ^{ab}	6.26 ^{ab}	2.09 ^{e-h}	1.11 ^{bc}	0.89 ^{ab}	1.18 ^{abc}	1.11 ^{ab}	0.75 ^{efg}	7.31 ^{ab}	7.23 ^{ab}	1.05 ^{ab}	24.99 ^{efg}	7.16 ^a
G7	8.34 ^{ab}	6.19 ^{ab}	2.15 ^{efgh}	1.14 ^{fg}	0.88 ^{ab}	1.18 ^{abc}	1.08 ^{ab}	0.74 ^{fgh}	7.27 ^{ab}	7.19 ^{ab}	1.04 ^{ab}	25.81 ^{fgh}	7.11 ^a
G8	8.22 ^b	5.99 ^{bc}	2.23 ^{fgh}	1.20 ^{fg}	0.83 ^{abc}	1.15 ^{bc}	1.01 ^{bc}	0.73 ^{fgh}	7.11 ^{ab}	7.02 ^{abc}	1.01 ^{bc}	27.09 ^{fgh}	6.93 ^{ab}
G9	6.52 ^d	5.59 ^{cd}	0.93 ^{ab}	0.63 ^b	0.62 ^e	0.72 ^f	0.88 ^{cd}	0.86 ^b	6.06 ^{fg}	6.04 ^{ef}	0.94 ^{de}	14.31 ^b	6.02 ^{cd}
G10	6.57 ^d	5.45 ^d	1.11 ^{bc}	0.75 ^{bcd}	0.61 ^e	0.73 ^f	0.84 ^d	0.83 ^{bcd}	6.01 ^j	5.98 ^f	0.92 ^e	16.94 ^{bcd}	5.96 ^{cd}
G11	6.97 ^{cd}	6.43 ^a	0.54 ^a	0.34 ^a	0.76 ^{cd}	0.82 ^{def}	1.17 ^a	0.92 ^a	6.70 ^{cd}	6.69 ^{cd}	1.08 ^a	7.74 ^a	6.69 ^b
G12	8.28 ^{ab}	6.50 ^a	1.77 ^{defg}	0.95 ^{bcd}	0.91 ^a	1.16 ^{bc}	1.20 ^a	0.79 ^{cdefg}	7.39 ^a	7.34 ^a	1.09 ^a	21.43 ^{cdefg}	7.28 ^a
G13	8.01 ^b	6.26 ^{ab}	1.74 ^{defg}	0.96 ^{cdef}	0.85 ^{ab}	1.09 ^c	1.11 ^{ab}	0.78 ^{defg}	7.13 ^{ab}	7.08 ^{ab}	1.05 ^{ab}	21.73 ^{defg}	7.03 ^{ab}
G14	8.78 ^a	5.96 ^{bc}	2.82 ⁱ	1.43 ^g	0.89 ^{ab}	1.31 ^a	1.00 ^{bc}	0.68 ^h	7.37 ^a	7.23 ^{ab}	1.00 ^{bcd}	32.14 ^h	7.10 ^a
G15	6.61 ^d	5.37 ^d	1.23 ^{bcd}	0.83 ^{bcde}	0.60 ^e	0.74 ^f	0.82 ^d	0.81 ^{bcde}	5.99 ^g	5.96 ^f	0.90 ^e	18.68 ^{bcde}	5.93 ^d
G16	7.45 ^c	5.46 ^d	1.99 ^{e-h}	1.18 ^{fg}	0.69 ^{de}	0.94 ^d	0.84 ^d	0.73 ^{fgh}	6.46 ^{de}	6.38 ^{de}	0.92 ^e	26.70 ^{fgh}	6.30 ^{cd}
G17	7.23 ^c	5.62 ^{cd}	1.60 ^{cde}	0.98 ^{def}	0.69 ^{de}	0.89 ^{de}	0.89 ^{cd}	0.78 ^{defg}	6.43 ^{def}	6.37 ^{de}	0.95 ^{cde}	22.15 ^{defg}	6.33 ^c
G18	6.73 ^d	5.48 ^d	1.25 ^{bcd}	0.82 ^{bcde}	0.63 ^e	0.77 ^{ef}	0.85 ^d	0.81 ^{bcde}	6.10 ^{efg}	6.07 ^{ef}	0.92 ^e	18.54 ^{bcde}	6.04 ^{cd}
G19	7.26 ^c	5.34 ^d	1.91 ^{e-h}	1.17 ^{fg}	0.66 ^e	0.89 ^{de}	0.81 ^d	0.74 ^{fgh}	6.30 ^{efg}	6.23 ^{ef}	0.90 ^e	26.38 ^{fgh}	6.15 ^{cd}
G20	7.37 ^c	5.380 ^d	1.99 ^{efgh}	1.20 ^{fg}	0.67 ^e	0.92 ^d	0.82 ^d	0.73 ^{fgh}	6.38 ^{defg}	6.30 ^{ef}	0.90 ^e	27.04 ^{fgh}	6.22 ^{cd}
Factor 1 (69.2%)	0.748	0.982	0.22	0.013	0.933	0.753	0.978	-0.019	0.919	0.938	0.981	0.019	0.955
Factor 2 (30.7%)	0.657	-0.175	0.972	0.986	0.289	0.636	-0.198	-0.997	0.385	0.336	-0.188	0.997	0.284

عملکرد (kg ha⁻¹) هر ژنوتیپ در شرایط بدون تنش (Yp)، عملکرد (kg ha⁻¹) هر ژنوتیپ در شرایط تنش (Ys)، شاخص تحمل (TOL)، شاخص متوسط بهره‌وری (MP)، میانگین هندسی بهره‌وری (GMP)، میانگین هارمونیک (HM)، شدت تنش خشکی (SI)، شاخص حساسیت به تنش (SSI)، شاخص تحمل تنش (STI)، درصد کاهش عملکرد (YRP)، شاخص عملکرد (YI) و پایداری عملکرد (YSI).

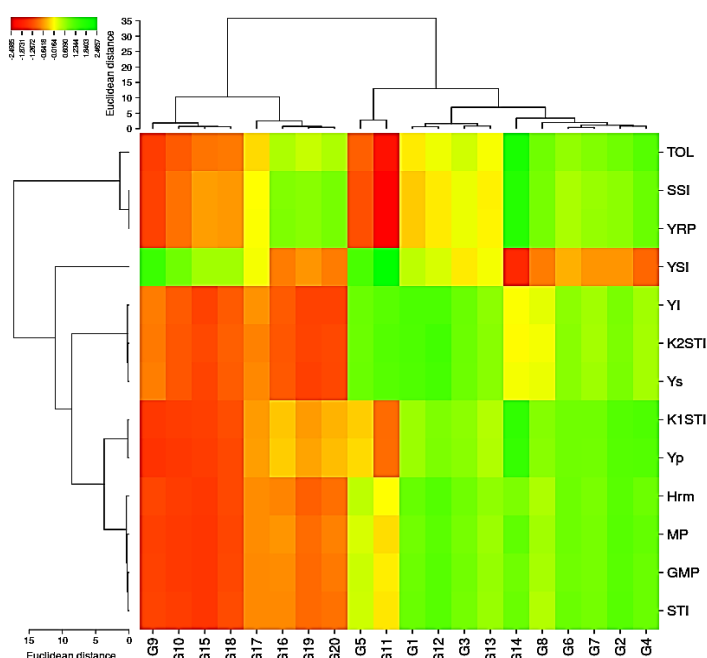
Yield (kg/ha) of each genotype under non-stress conditions (Yp), yield (kg/ha) of each genotype under stress conditions (Ys), tolerance index (TOL), average productivity index (MP), geometric mean productivity (GMP), harmonic mean (HM), stress sensitivity index (SSI), stress tolerance index (STI), yield reduction percentage (YRP), yield index (YI), and yield stability (YSI).

گروه A محسوب شود. انتخاب بر اساس شاخص SSI نیز باعث انتخاب ژنوتیپ‌هایی می‌شود که پتانسیل عملکرد پایینی داشته و از تحمل به تنش خوبی برخوردارند (Fernandez, 1992)؛ بنابراین این شاخص نیز نمی‌تواند

انتخاب ژنوتیپ‌ها بر اساس مقدار پایین شاخص TOL به نفع ژنوتیپ‌هایی با عملکرد پایین در شرایط غیر تنش و ژنوتیپ‌هایی با عملکرد بالا در شرایط تنش است؛ لذا این شاخص، به‌تنهایی نمی‌تواند شاخص مناسبی جهت انتخاب

نقشه حرارتی توزیع شاخص‌های موردبررسی در ژنوتیپ‌های مختلف و نتایج حاصل از تجزیه خوشه‌ای ژنوتیپ‌ها (شکل ۱) نیز نشان داد که ژنوتیپ‌های ۱۱، ۵، ۱ و ۱۲ از نظر شاخص‌های حساسیت مقادیر کمتر یعنی حساسیت به تنش کمتر و از نظر شاخص‌های تحمل مقادیر بیشتری داشته و جزو ژنوتیپ‌های متحمل محسوب شدند؛ و ژنوتیپ‌های ۱۷، ۱۶، ۱۹ و ۲۰ از نظر شاخص‌های حساسیت دارای مقادیر بیشتر و از نظر عملکرد در شرایط تنش و نرمال و نیز شاخص‌های تحمل دارای مقادیر کمتر بوده و جزو ژنوتیپ‌های حساس محسوب شدند.

ژنوتیپ‌هایی که در هر دو محیط تنش و بدون تنش عملکرد بالایی دارند را تشخیص دهد؛ اما بر اساس شاخص‌های YI , GMP , MP , YSI , $k2STI$, $k1STI$, STI و HM ژنوتیپ‌هایی متحمل محسوب می‌شوند که مقادیر بیشتری را کسب کرده باشند؛ لذا بر اساس شاخص‌های STI و HM به ترتیب ژنوتیپ‌های ۱۲، ۲، ۱ و ۶ و در ارزیابی با شاخص‌های $k2STI$ و YI به ترتیب ژنوتیپ‌های ۱۲، ۱، ۱۱ و ۳ برتری داشتند. همچنین در ارزیابی با شاخص $k1STI$ ژنوتیپ‌های ۱۴، ۴، ۲ و ۶، با شاخص YSI ژنوتیپ‌های ۱۱، ۹، ۵ و ۱۰، با شاخص MP ژنوتیپ‌های ۲، ۱۲، ۱۴ و ۴ و طبق شاخص GMP به ترتیب ژنوتیپ‌های ۱۲، ۲، ۴ و ۱ از لحاظ تحمل تنش برتری داشتند (جدول ۴).

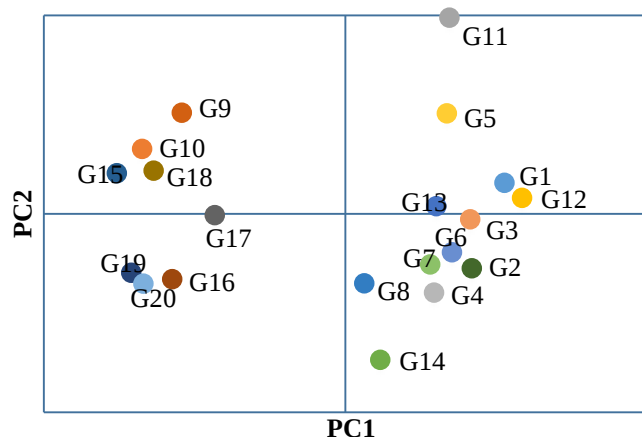


شکل ۱. نقشه حرارتی نشان‌دهنده توزیع شاخص‌های موردبررسی در ژنوتیپ‌های گندم و گروه‌بندی آن‌ها بر اساس روش وارد.

Fig. 1. Heatmap showing the scattering of studied traits in wheat genotypes and their clustering based on Ward method.

گرفتند که با میانگین عملکرد و شاخص‌های تحمل آن‌ها به تنش خشکی مرتبط بود. به‌طوری‌که ژنوتیپ‌های ۱۱، ۵، ۱ و ۱۲ در گروه ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی با عملکرد بالا قرار گرفتند و ژنوتیپ‌های ۲۰، ۱۹، ۱۷ و ۱۶ جزو گروه ژنوتیپ-های حساس به خشکی با عملکرد پایین بودند (شکل ۲) و مؤلفه‌های اول و دوم توانست ژنوتیپ‌های با عملکرد بالا و متحمل را از سایر ژنوتیپ‌های موجود تفکیک کند.

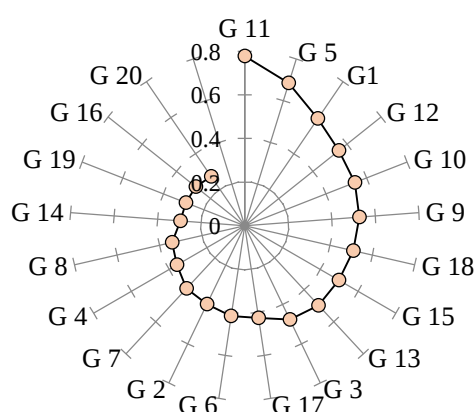
تجزیه به مؤلفه‌های اصلی نشان داد که دو مؤلفه اول و دوم هرکدام به ترتیب ۶۹/۲ و ۳۰/۷ درصد از تغییرات کل بین متغیرها را توجیه می‌کنند. در مؤلفه اول، MP , Ys , Yp ، GMP ، STI و YI بیشترین ضرایب را داشتند و در مؤلفه دوم، TOL ، SSI ، YRP و YSI بیشترین ضرایب را به خود اختصاص دادند. مطابق با نمودار دوبعدی بر اساس مقادیر مؤلفه‌های اول و دوم، ژنوتیپ‌ها در گروه‌های مختلفی قرار



شکل ۲. نمودار بای پلات توزیع ژنوتیپ‌ها بر اساس دو مؤلفه اول (PC1) و دوم (PC2) در تجزیه به مؤلفه‌های اصلی

Fig. 2. Bi-plot diagram showing the distribution of genotypes based on the first (PC1) and second (PC2) in principal components analysis.

فصل نشان دادند (شکل ۳). استفاده از شاخص IGSI برای گزینش ژنوتیپ‌های برتر در تعدادی از مطالعات گزارش شده است. به طور مثال، از شاخص IGSI برای ادغام آماره‌های مختلف پایداری در گندم دوروم (Najafi Mirak et al., 2018) و در کلزا برای معرفی ارقام پایدار استفاده شد (Zali et al., 2016). همچنین استفاده از این شاخص برای معرفی ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی در گندم نان (Yaghutipoor et al., 2017)، معرفی ژنوتیپ‌های متحمل به تنش آلومینیوم در گندم دوروم (Ramzi et al., 2018) و تعیین ژنوتیپ‌های متحمل به تنش یخ‌زدگی در کلزا (Abdollahi Hesar et al., 2021) گزارش شده است.



شکل ۳. مقادیر شاخص انتخاب ژنوتیپ ایده‌آل (IGSI) در ژنوتیپ‌های گندم نان مورد بررسی

Fig. 3. Ideal genotype selection index (IGSI) values for the studied bread wheat genotypes

شاخص فاصله چند متغیره از ژنوتیپ ایده‌آل (MGIDI) نیز با در نظر گرفتن همه شاخص‌های مورد استفاده محاسبه شد (شکل ۴). بر اساس این شاخص هر چه ژنوتیپ مورد نظر

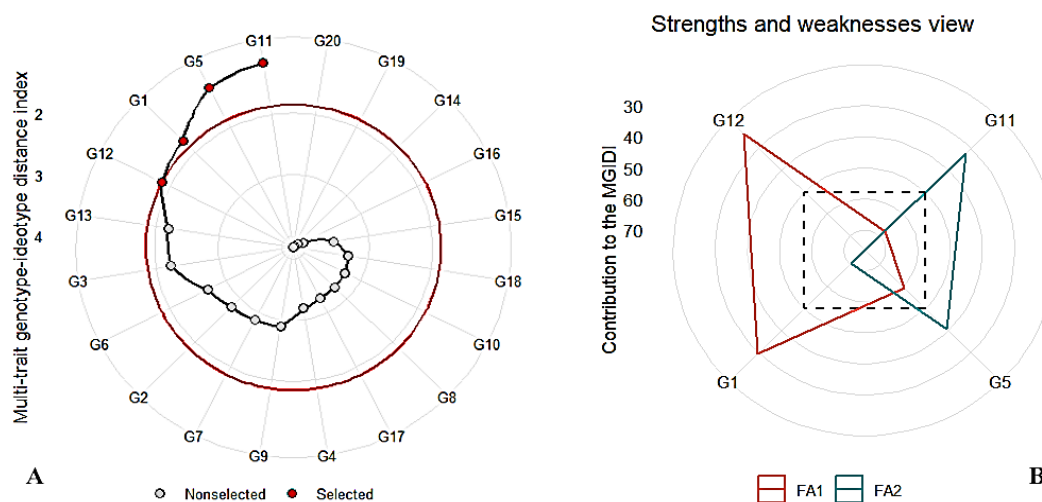
شاخص‌های انتخاب چند صفتی IGSI و MGIDI

با توجه به متفاوت بودن ژنوتیپ‌های منتخب در هر یک از شاخص‌های کمی تحمل و حساسیت به تنش، گزینش ژنوتیپ‌های متحمل بر اساس شاخص‌های انتخاب چند صفتی مانند IGSI و MGIDI که مبتنی بر عملکرد و همه شاخص‌های تحمل مورد بررسی بود، صورت گرفت. درواقع این شاخص‌ها نتایج حاصل از بررسی همه صفات و شاخص‌ها را لحاظ کرده و تبدیل به یک شاخص واحد می‌کنند. با این کار انتخاب ژنوتیپ‌های متحمل راحت‌تر و کارایی آن بیشتر می‌شود (Zali et al., 2015; Olivoto and Nardino, 2020).

در مورد IGSI با توجه به این که مقدار آن بین صفر و یک است هر چه مقدار این شاخص برای ژنوتیپی به یک نزدیک باشد، به این معنی است که فاصله آن از ژنوتیپ حساس بیشتر بوده و آن ژنوتیپ از تحمل تنش بالایی برخوردار است (Zali et al., 2015). از سوی دیگر هرچه مقدار IGSI برای ژنوتیپی نزدیک به صفر باشد به این معنی است که فاصله آن از ژنوتیپ ایده‌آل منفی (ژنوتیپ حساس) کمتر بوده و در نتیجه از تحمل تنش پایین‌تری برخوردار است. بر این اساس، برآورد شاخص IGSI برای ژنوتیپ‌های مختلف نشان داد که ژنوتیپ ۱۱ دارای بیش‌ترین مقدار IGSI (۰/۷۷۸) بود و ژنوتیپ‌های ۵، ۱ و ۱۲ در رتبه‌های بعدی قرار داشتند؛ بنابراین، این ژنوتیپ‌ها با داشتن بیش‌ترین مقدار IGSI، فاصله بیشتری از ژنوتیپ حساس داشته و تحمل بالایی به تنش خشکی آخر فصل نشان دادند. همچنین ژنوتیپ ۲۰ با مقدار IGSI برابر ۰/۲۳۷ و ژنوتیپ ۱۸ با مقدار IGSI برابر ۰/۲۹۰ با داشتن کمترین مقدار IGSI و در نتیجه فاصله کمتر از ژنوتیپ حساس، حساسیت بسیار بالایی به تنش خشکی آخر

را داشت و ژنوتیپ متحمل در برابر تنش خشکی آخر فصل محسوب شد، در رتبه‌های بعدی ژنوتیپ‌های ۵ با مقدار (۱/۲۷۹)، ۱ با مقدار (۱/۷۵۷) و ۱۲ با مقدار (۱/۸۸۱) قرار داشتند. از سوی دیگر ژنوتیپ‌های ۲۰ و ۱۹ بیشترین مقدار MGIDI (۴/۱۹۶ و ۴/۱۹۵) را به خود اختصاص دادند و از این‌رو، این ژنوتیپ‌ها به تنش خشکی آخر فصل حساس بودند (شکل ۴).

مقدار MGIDI کمتری داشته باشد نشان می‌دهد که این ژنوتیپ فاصله کمتری از ژنوتیپ ایده‌آل داشته و قرابت بیشتری با ژنوتیپ مطلوب دارد. برعکس هرچه مقدار MGIDI برای ژنوتیپی بیشتر باشد، به این معنی است که فاصله آن از ژنوتیپ ایده‌آل (متحمل) بیشتر بوده و حساسیت بیشتری به شرایط تنش دارد (Olivoto and Nardino, 2020). بر اساس شاخص MGIDI، در شرایط تنش خشکی آخر فصل و شرایط نرمال ژنوتیپ ۱۱ کمترین مقدار (۱/۱۴۱)



شکل ۴. مقادیر شاخص فاصله چند متغیره از ژنوتیپ ایده‌آل (MGIDI) در ژنوتیپ‌های گندم نان مورد بررسی (a) و سهم عامل‌های اول و دوم در شاخص MGIDI برای ژنوتیپ‌های منتخب (b)

Fig. 4. Multi-trait genotype-ideotype distance index (MGIDI) values for the studied bread wheat genotypes (a), and the contribution of the first and second factors in the MGIDI index for the selected genotypes (b)

و YPR که با توجه به نقش منفی آن‌ها در تحمل ژنوتیپ‌ها، کمترین مقدار را داشته و از این لحاظ به ژنوتیپ ایده‌آل نزدیک بودند (جدول ۵). به بیان دیگر، ژنوتیپ‌های متحمل ۵ و ۱۱ در شرایط تنش کاهش عملکرد کمتری داشتند و از این نظر جزو ژنوتیپ‌های برتر بودند ولی ژنوتیپ‌های متحمل ۱ و ۱۲ با داشتن میانگین عملکرد بیشتر در دو شرایط تنش و بدون تنش ژنوتیپ‌های برتر محسوب می‌شدند. شاخص MGIDI برای تسهیل انتخاب ژنوتیپ‌ها، توسط اولیوتو و ناردینو (Olivoto and Nardino, 2020) برای گزینش ژنوتیپ‌های مطلوب بر اساس اطلاعات صفات مختلف پیشنهاد شد. اولیوتو و همکاران (Olivoto et al., 2019) از این شاخص برای انتخاب ژنوتیپ‌های ایده‌آل توت‌فرنگی استفاده

محاسبه سهم عامل‌های اول و دوم در شاخص MGIDI در ژنوتیپ‌های منتخب نشان داد که عامل اول کمترین سهم را در ژنوتیپ‌های ۱ و ۱۲ داشت، در حالی که عامل دوم کمترین سهم را در ژنوتیپ‌های ۱۱ و ۵ نشان داد (شکل ۴). با توجه به این‌که هر ژنوتیپ برای عامل‌هایی که سهم کمتری در آن‌ها نشان می‌دهد از لحاظ صفات درون آن عامل به ژنوتیپ ایده‌آل نزدیک‌تر است، بر این اساس می‌توان گفت که ژنوتیپ‌های متحمل ۱ و ۱۲ برای صفاتی که بیشترین ضریب را در عامل اول دارند مانند Yp، MP، GMP، HM و Ys بیشترین مقدار را داشته و از این لحاظ به ژنوتیپ ایده‌آل نزدیک بودند ولی ژنوتیپ‌های متحمل ۵ و ۱۱ برای صفاتی که بیشترین ضریب را در عامل دوم دارند مانند SSI، TOL

شاخص‌های SSI، YRP و TOL که مقادیر کمتر آن‌ها نشانگر تحمل بالای ژنوتیپ‌ها است، به میزان حدود ۲۷ درصد نسبت به میانگین کل بود (جدول ۵). این مقادیر نسبت به میانگین ژنوتیپ‌های غیرمنتخب به ترتیب ۲۱/۸۲ و حدود ۳۱ درصد بود. درحالی‌که ژنوتیپ‌های منتخب Yp بالاتری نسبت به میانگین ژنوتیپ‌های غیرمنتخب و نیز میانگین کل نشان ندادند. این امر نشان داد که ژنوتیپ‌های منتخب تحت شرایط تنش خشکی آخر فصل از لحاظ Ys بالاتر از میانگین کل و میانگین ژنوتیپ‌های غیرمنتخب بودند و به‌ویژه کاهش عملکرد کمتری در شرایط تنش در مقایسه با میانگین ژنوتیپ‌های دیگر نشان دادند. همچنین همه ژنوتیپ‌های منتخب دارای شاخص MP، GMP، YI، HM، STI و YSI بالاتری نسبت به میانگین ژنوتیپ‌های غیرمنتخب و نیز میانگین کل بودند.

کردند. همچنین استفاده از شاخص MGIDI توانست غربالگری ژنوتیپ‌های جو نسبت به تنش شوری را در مراحل اولیه رشد تسریع کند (Pour-Aboughadareh et al., 2021). از این شاخص برای گزینش ژنوتیپ‌های متحمل به شوری در مرحله جوانه‌زنی استفاده شده است (Saber et al., 2023). انتظار می‌رود که استفاده از این شاخص در برنامه‌های گزینشی گیاهان بیشتر مورد توجه قرار گیرد.

جدول ۵ مقایسه شاخص‌های حساسیت و تحمل به شوری ژنوتیپ‌های منتخب گندم را با میانگین کل و میانگین ژنوتیپ‌های انتخاب‌نشده در شدت گزینش ۲۰ درصد نشان می‌دهد. مقایسه میانگین ژنوتیپ‌های منتخب (ژنوتیپ‌های ۱۱، ۵، ۱ و ۱۲) با میانگین کل برای شاخص‌های مورد مطالعه در شرایط تنش خشکی آخر فصل (جدول ۵) نشان داد که بیشترین درصد افزایش در مورد شاخص k2STI به میزان ۱۶/۷۲ درصد بود و همچنین بیشترین درصد کاهش در مورد

جدول ۵. دیفرانسیل انتخاب بر اساس شاخص MGIDI برای صفات مورد مطالعه در ژنوتیپ‌های گندم نان برای شاخص‌های تحمل تنش

Table 5. Selection differential based on MGIDI index of studied traits in bread wheat genotypes for stress tolerance indices

شاخص Index	فاکتور Factor	میانگین Mean			درصد دیفرانسیل گزینش نسبت به Selection Differential Percentage (SD%) per	
		کل Total	گروه منتخب (20%) Selected genotypes	گروه غیرمنتخب Non-Selective	میانگین کل Total mean	گروه غیرمنتخب Non-Selective group
GMP	FA1	6.75	7.05	6.68	4.32	5.46
MP	FA1	6.81	7.08	6.75	3.88	4.90
YSI	FA1	0.78	0.84	0.76	7.97	10.16
K2STI	FA1	1.00	1.17	0.96	16.72	21.82
K1STI	FA1	1.01	1.01	1.01	0.40	0.50
STI	FA1	0.78	0.84	0.76	8.29	10.58
Ys	FA1	5.95	6.44	5.82	8.28	10.56
Yp	FA1	7.68	7.72	7.67	0.47	0.59
HM	FA1	6.69	7.01	6.62	4.72	5.97
SSI	FA2	0.98	0.72	1.05	-27.26	-31.90
TOL	FA2	1.73	1.27	1.84	-26.42	-30.98
YRP	FA2	22.19	16.15	23.70	-27.20	-31.84
YI	FA2	1.00	1.08	0.98	8.25	10.53

شدت گزینش یکسان بود (شکل‌های ۳ و ۴). بر این اساس می‌توان گفت که شاخص‌های MGIDI و IGSI توانستند به‌عنوان یک شاخص گزینشی مبتنی بر چند صفت در شناسایی ژنوتیپ‌های برتر مفید باشند.

مقایسه بین دو شاخص MGIDI و IGSI از لحاظ ژنوتیپ‌های انتخابی در شدت گزینش ۲۰ درصد نشان داد که انطباق بالایی بین این دو شاخص در ژنوتیپ‌های انتخابی وجود دارد، به‌طوری‌که ژنوتیپ‌های انتخابی توسط این دو شاخص در این

نتیجه‌گیری نهایی

برآورد شاخص انتخاب ژنوتیپ ایده‌آل (IGSI) و شاخص فاصله چند متغیره از ژنوتیپ ایده‌آل (MGIDI) برای ژنوتیپ‌های مختلف بر اساس شاخص‌های کمی تحمل و حساسیت به تنش نشان داد که ژنوتیپ ۱۱ با داشتن بیشترین مقدار IGSI و کمترین مقدار MGIDI، متحمل‌ترین ژنوتیپ بود و ژنوتیپ‌های ۵، ۱ و ۱۲ در رتبه بعدی قرار داشتند و جزو ژنوتیپ‌های با تحمل تنش خشکی آخر فصل نسبتاً بالا

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, 270-288. [In Persian with English Summary]. <https://doi.org/10.22034/saps.2021.13109>
- Amiri, R., Pezeshkpour, P., Karami, I., 2021. Identification of lentil desirable genotypes using multivariate statistical methods and selection index of ideal genotype under rainfed conditions. *Journal of Crop Breeding*. 13, 140-151. [In Persian with English Summary]. <https://doi.org/10.52547/jcb.13.39.140>
- Bouslama, M., Schapaugh, W.T., 1984. Stress tolerance in soybean. Part 1: evaluation of three screening techniques for heat and drought tolerance. *Crop Science*. 24, 933-937. <https://doi.org/10.2135/cropsci1984.0011183X002400050026x>
- Cappelli, A., Cini, E., 2021. Challenges and opportunities in wheat flour, pasta, bread, and bakery product production chains: A systematic review of innovations and improvement strategies to increase sustainability, productivity, and product quality. *Sustainability*. 2021, 13, 2608. <https://doi.org/10.3390/su13052608>
- Choukan, R., Taherkhani, T., Ghannadha, MR., Khodarahmi, M., 2006. Evaluation of drought tolerance in grain maize inbred lines using drought tolerance indices. *Iranian Journal of Agricultural Science*. 8, 79-89. [In Persian with English Summary]. <http://dorl.net/dor/20.1001.1.15625540.1385.8.1.7.6>
- Farshadfar, E., Sutka, J., 2002. Screening drought tolerance criteria in maize. *Acta Agronomica Hungarica*. 50, 411-16. <https://doi.org/10.1556/AAgr.50.2002.4.3>
- Farshadfar, E., Rasoli, V., Silva, J.A.T., Farshadfar, M., 2011. Inheritance of drought tolerance indicators in bread wheat (*Triticum aestivum* L.) using a diallel technique. *Australian Journal of Crop Science*. 5, 870-878.
- 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., Maurer, R., 1978. Drought resistance in spring wheat cultivars. I. grain yield responses. *Australian Journal of Agricultural Research*. 29, 897-912. <https://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 cereals. *Journal of Plant Science*. 77, 523-531. <https://doi.org/10.4141/P96-130>
- Hossain, A.B.S., Sears, A.G., Cox T.S., Paulsen, G.M., 1990. Desiccation tolerance and its relationship to assimilate partitioning in winter wheat, *Crop Science*. 30, 622-627. <https://doi.org/10.2135/cropsci1990.0011183X003000030030x>
- Irshad, M., Ullah, F., Fahad, S., Mehmood, S., Khan, A.U., Brtnicky, M., Kintl, A., Holatko, J., Irshad, I., El-Sharnouby, M., 2021. Evaluation of *Jatropha curcas* L. leaves mulching on wheat growth and biochemical

- attributes under water stress. *BMC Plant Biology*. 21, 303. <https://doi.org/10.1186/s12870-021-03097-0>
- Jafari, A., Paknejad, F., Jami AL-Ahmaidi, M., 2009. Evaluation of selection indices for drought tolerance of corn (*Zea mays* L.) hybrids. *International Journal of Plant Production*. 3, 33-38. <https://doi.org/10.22069/ijpp.2012.661>
- Kamrani, M., Farzi, A., Ebadi, A., 2015. Evaluation of grain yield performance and tolerance to drought stress in wheat genotypes using drought tolerance indices. *Cereal Research*. 5, 231-246. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.22520163.1394.5.3.3.8>
- Karimzadeh Soureshjani, H., Emam, Y., Moori, S., 2012. Effect of post-anthesis drought stress on yield, yield components and canopy temperature of bread wheat cultivars. *Journal of Plant Process and Function*. 1, 38-56. [In Persian with English Summary]. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.23222727.1391.1.1.4.1>
- Lan, J., 1998. Comparison of evaluating methods for agronomic drought resistance in crops. *Acta Agriulturae Boreali-Occidentalis Sinica*. 7, 85-87.
- Lugojan, C., Ciulca, S., 2011. Analysis of excised leaves water loss in winter wheat. *Journal of Horticulture, Forestry and Biotechnology*. 15, 178-182.
- Najafi Mirak, T., Dastfal, M., Andarzian, B., Farzadi, H., Bahari, M., Zali, H., 2018. Stability analysis of grain yield of durum wheat promising lines in warm and dry areas using parametric and non-parametric methods. *Journal of Crop Production and Processing*. 8, 79-96. [In Persian with English Summary]. <https://doi.org/10.29252/jcpp.8.2.79>
- Olivoto, T., Nardino, M., 2020. MGIDI: toward an effective multivariate selection in biological experiments. *Bioinformatics*. 10, 981-1093. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btaa981>
- Olivoto, T., Lúcio, A.D.C., Da Silva, J.A.G., Sari, B.G., Diel, M.I., 2019. Mean performance and stability in multi-environment trials II: Selection based on multiple traits. *Agronomy Journal*. 111, 2961-2969. <https://doi.org/10.2134/agronj2019.03.0221>
- Pour-Aboughadareh, A., Sanjani, S., Nikkhah Chamanabad, H., 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, 117-128. <https://doi.org/10.1186/s42269-021-00576-0>
- Ramzi, E., Asghari, A., Khomari, S., Mohammaddoust e Chamanabad, H.R., 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>
- Rosielle, A.A., Hamblin, J., 1981. Theoretical aspects of selection for yield in stress and non-stress environments. *Crop Science* 21, 943-946. <https://doi.org/10.2135/cropsci1981.0011183X002100060033x>
- Saber, F., Asghari Zakaria, R., Zare, N., Farzaneh, S., 2022. Selection of salinity-tolerant durum wheat genotypes at germination stage using MGIDI and IGSi multi-trait selection indices. *Cereal Research*. 12, 263-279. <https://doi.org/10.22124/cr.2023.24343.1762>
- Saddiq, M.S., Afzal, I., Iqbal, S., Hafeez, M.B., Raza, A., 2021. Low leaf sodium content improves the grain yield and physiological performance of wheat genotypes in saline-sodic soil. *Pesquisa Agropecuária Tropical*. 2021, 51. <https://doi.org/10.1590/1983-40632021v5167663>
- Solat Petloo, N., Asghari Zakaria, R., Ebadi, A., Sharifi Ziveh, P., 2023. Evaluation of yield and drought tolerance indices of cow cockle (*Vaccaria hispanica* (Mill.) Rauschert) ecotypes. *Journal of Environmental Stresses in Crop Sciences*. 16, 517-530. [In Persian with English Summary]. <https://doi.org/10.22077/escs.2023.4779.2069>
- Tahmasebi, S., Dastfal, M., Zali, H., Rajaie, M., 2018. Drought tolerance evaluation of bread wheat cultivars and promising lines in warm and dry climate of the south. *Cereal Research*. 8, 209-225. [In Persian with English Summary]. <https://doi.org/10.22124/c.2018.10434.1398>
- Trethowan, R.M., Reynolds, M., 2007. Drought resistance: Genetic approaches for improving productivity under stress. In: Buck H.R. et al. (eds): wheat production in stressed environments. 289-299, Springer Pub., the Netherlands. https://doi.org/10.1007/1-4020-5497-1_37

- United States Department of Agriculture, World Agricultural Production and Global Market Analysis. 2022. www.apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/production
- Yaghutipoor, A., Farshadfar, E., Saeedi, M., 2017. Investigation of bread wheat genotypes for drought tolerance using suitable combination method. *Journal of Environmental Stresses 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, 425-436.
- Zali, H., Sofalian, O., Hasanloo, T., Asghari, A., Zeinalabedini, M., 2016. Appropriate strategies for selection of drought tolerant genotypes in canola. *Journal of Crop Breeding*, 8, 77-90. [In Persian with English Summary]. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.22286128.1395.8.20.7.4>
- Zali, H., Hasanloo, T., Sofalian, O., Asgharii, A., Enayati Shariatpanahi, M., 2019. Identifying drought tolerant canola genotypes using selection index of ideal genotype. *Journal of Crop Breeding*. 11, 117 -126. [In Persian with English Summary]. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.22286128.1398.11.29.5.1>