Cereal Biotechnology and Biochemistry
Online ISSN: 2783-5170
Homepage: https://cbb.razi.ac.ir

Investigating the drought resistance of native bread wheat (*Triticum aestivum* L.) populations using drought sensitivity and resistance indices

Zahra Morovati[1] ✉, Ezatollah Farshadfar[2] & Hooman Shirvani[3]

[1] PhD student, Department of Genetics and Plant Breeding, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

[2] Department of Plant Genetics and Production Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran.

[3] Nutrition Sciences and Food Technology Research Center, Health Institute, Kermanshah University of Medical Science, Kermanshah, Iran.

✉ Corresponding author. E-mail: morovatizahra@modares.ac.ir

ABSTRACT

Introduction: Wheat is the most important food crop in the world in terms of cultivated area, commercial value and human nutrition. It plays the biggest role in providing food security in the world compared to other agricultural products. Drought is one of the major environmental factors which threaten wheat production worldwide. Drought and heat stress are two main factors reducing wheat productivity worldwide. Therefore, it is inevitable to improve and release new wheat cultivars adapted to adverse climate change. Drought stress during sensitive growth stages of wheat, including grain filling, decreases kernel weight and the number of grains in the spike, which results in a considerable drop in wheat yield. In recent years, numerous studies have focused on identifying wheat genotypes that are well-suited to dry conditions. Local varieties and wild relatives are being explored as primary sources of drought tolerance. The results of these studies serve as a foundation for further research into specific species found within wheat germplasm.

Materials and methods: Nineteen genotypes were studied in this research to identify the tolerant genotypes to drought stress. Nineteen indicators were used to assess the genotypes regarding sensitivity and resistance to drought stress. Due to the difference in the indicators' results, the RS rating was used for more accuracy, which is based on the average and standard deviation of the ratings. Finally, the top genotypes were recognized by this ranking.

Results: Considering all indicators, Genotypes 11, 4, and 5 were ranked highest and recognized as drought-resistant genotypes. Principal component analysis was conducted for drought resistance indices, revealing that the first two components made the largest contribution in explaining the variance of the data. The first component accounted for 66.78% and the second component accounted for 32.50% of the total variance. Based on the calculated indices, genotypes were categorized into four distinct groups. Genotypes 11, 4, and 5, which were identified as the best genotypes based on RS, were grouped together. Through cluster analysis, genotypes were further classified into four groups: resistant, semi-resistant, semi-sensitive, and sensitive.

Conclusion: The results showed that Genotypes 4, 5, 11, and 14 had the highest YS, HAM, and YI indices under drought stress conditions. In contrast, Genotypes 1, 6, 7, and 10 had the lowest YS and YI values. These findings align with previous research showing that grain yield in stress and non-stress conditions is the best criterion for evaluating drought resistance.

Keywords: Index, Tolerance, Stress, Wheat.

Article Type: Research Article

Article history: Received: 08 Jan 2024, **Revised:** 03 Feb 2024, **Accepted:** 16 Apr 2024, **Published online:** 21 Jun 2024

Cite this article: Morovati, Z., Farshadfar, E. & Shirvani, H. (2024). Investigating the drought resistance of native bread wheat (*Triticum aestivum* L.) populations using drought sensitivity and resistance indices. *Cereal Biotechnology and Biochemistry*, *3*(2), 305-324. DOI: 10.22126/cbb.2024.11075.1082

© The Author(s).
10.22126/cbb.2024.11075.1082

Publisher: Razi University

بیوتکنولوژی و بیوشیمی غلات

شاپا الکترونیکی: ۵۱۷۰-۲۷۸۳

Homepage: https://cbb.razi.ac.ir

بررسی مقاومت به خشکی توده‌های بومی گندم نان (*Triticum aestivum* L.) با استفاده از شاخص‌های حساسیت و مقاومت به خشکی

زهرا مروتی[۱]✉، عزت اله فرشادفر[۲] و هومن شیروانی[۳]

[۱] دانشجوی دکتری، گروه ژنتیک و به‌نژادی گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

[۲] استاد گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.

[۳] مرکز تحقیقات علوم تغذیه و صنایع غذایی، پژوهشکده سلامت، دانشگاه علوم پزشکی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران.

✉نویسنده مسئول. رایانامه: morovatizahra@modares.ac.ir

چکیده

مقدمه: گندم مهم‌ترین محصول غذایی جهان از نظر سطح زیر کشت، ارزش تجاری و تغذیه‌ای است و در مقایسه با سایر محصولات کشاورزی، بیشترین نقش را در تأمین امنیت غذایی جهان دارد. خشکسالی یکی از عوامل مهم محیطی است که تولید گندم را در سراسر جهان تهدید می‌کند. درواقع خشکسالی و تنش گرمایی دو عامل اصلی در کاهش بهره‌وری گندم محسوب می‌شوند. به همین دلیل شناسایی و معرفی ارقام جدید گندم سازگار به تغییرات اقلیمی نامطلوب اجتناب‌ناپذیر است.اعمال تنش خشکی در مراحل حساس رشدی گندم، همچون مرحله پر شدن دانه، از طریق کاهش وزن و تعداد دانه در سنبله، موجب افت شدید عملکرد گندم خواهد شد. در سال‌های اخیر مطالعات زیادی در خصوص به دست آوردن ژنوتیپ‌های سازگار گندم در شرایط دیم از طریق واریته‌های بومی و خویشاوندان وحشی به عنوان منابع اصلی تحمل به خشکی انجام شده است، به طوری که نتایج حاصل از این تحقیقات زمینه بررسی دقیق‌تر برخی از گونه‌های موجود در ژرم پلاسم گندم را فراهم کرده‌اند.

مواد و روش‌ها: در این تحقیق، ۱۹ ژنوتیپ گندم به منظور شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل به تنش خشکی مورد بررسی قرار گرفتند. این آزمایش بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی و با سه تکرار در دو شرایط تنش خشکی و بدون تنش اجرا شد. برای بررسی ژنوتیپ‌های مورد مطالعه از نظر حساسیت و مقاومت به تنش خشکی از ۱۹ شاخص استفاده گردید. به دلیل تفاوت در نتایج شاخص‌ها برای دقت بیشتر از رتبه‌بندی RS که بر مبنای میانگین و انحراف معیار رتبه‌ها است، استفاده گردید. در نهایت توسط این رتبه‌بندی ژنوتیپ‌های برتر شناسایی شدند.

یافته‌ها: با در نظر گرفتن تمام شاخص‌ها، ژنوتیپ‌های شماره ۱۱، ۴ و ۵ به ترتیب دارای بهترین رتبه بودند و می‌توان آن‌ها را به عنوان ژنوتیپ‌های متحمل به تنش خشکی معرفی نمود. نتایج حاصل از تجزیه به مؤلفه‌های اصلی برای شاخص‌های مقاومت به خشکی، نشان داد که مؤلفه اول و دوم به ترتیب ۶۶/۷۸ و ۳۲/۵۰ درصد از واریانس کل را توجیه نمودند. با توجه به شاخص‌های محاسبه شده و بر اساس نتایج حاصل از تجزیه خوشه‌ای، ژنوتیپ‌ها به ۴ گروه مجزا قرار گرفتند، به این ترتیب که، ژنوتیپ‌های ۱۱، ۴ و ۵ که بر اساس RS به عنوان برترین ژنوتیپ‌ها،در یک گروه قرار گرفتند. به طور کلی و بر اساس نتایج تجزیه کلاستر، ژنوتیپ‌ها به چهار گروه مقاوم، نیمه مقاوم، نیمه حساس و حساس متمایز شدند.

نتیجه‌گیری: نتایج نشان داد که ژنوتیپ‌های شماره ۴، ۵، ۱۱، و ۱۴ بالاترین مقادیر شاخص‌هایYS، HAM، و YI را در شرایط تنش خشکی به خود اختصاص دادند. در مقابل، ژنوتیپ‌های ۱، ۶، ۷، و ۱۰ دارای کمترین مقادیر YS و YI بودند. همچنین، می‌توان با توجه به این نتایج می توان اذعان داشت که، عملکرد دانه در شرایط تنش خشکی نرمال معیار مناسبی برای ارزیابی مقاومت به خشکی محسوب می‌شود.

واژه‌های کلیدی: شاخص، تحمل، تنش، گندم.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

نوع مقاله: دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۱۸ **اصلاح:** ۱۴۰۲/۱۱/۱۴ **پذیرش:** ۱۴۰۳/۰۱/۲۸، **انتشار آنلاین:** ۱۴۰۳/۰۴/۰۱

استناد: مروتی، ز.، فرشادفر، ع. و شیروانی، ه. (۱۴۰۳). بررسی مقاومت به خشکی توده‌های بومی گندم نان (*Triticum aestivum* L.) با استفاده از شاخص‌های حساسیت و مقاومت به خشکی. *بیوتکنولوژی و بیوشیمی غلات*، ۳(۲)، ۳۰۵-۳۲۴. DOI: 10.22126/cbb.2024.11075.1082

ناشر: دانشگاه رازی

© نویسندگان.

مقدمه

اصلاح گیاهان به شناسایی و درک عمیق ساختار ژنتیکی صفات مورد بررسی وابسته است. ژن‌های اثرگذار بر صفات کمی، نقش مهمی در مقاومت به تنش‌های غیر زیستی ایفا می‌کنند. اصلاح گیاهان زراعی به‌منظور افزایش مقاومت در برابر تنش‌های غیر زیستی، یکی از راه‌های مؤثر در سازگاری گیاهان به شرایط مختلف است (Farshadfar, 2018). در همین راستا، هدف اصلاح‌کنندگان گندم تولید ژنوتیپ‌های جدیدی است که علاوه بر داشتن عملکرد بالا، از پایداری عملکرد در محیط‌های مختلف نیز برخوردار باشند. پایداری عملکرد، برای دست‌یابی به عملکردی مطلوب در شرایط متغیر محیطی، اهمیت بالایی دارد. از جمله عوامل اصلی کاهش پایداری عملکرد، تنش‌های محیطی است که در بسیاری از مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان از جمله ایران منجر به کاهش عملکرد محصولات می‌شود (Foroozanfar *et al.*, 2011).

گیاهان به‌طور مداوم در معرض تنش‌های محیطی قرار دارند (Akbari *et al.*, 2016). تنش خشکی به‌ویژه پس از گرده‌افشانی و در انتهای فصل رشد در مناطقی مانند کرمانشاه، به‌شدت عملکرد دانه را کاهش می‌دهد؛ بنابراین، بررسی ابعاد مختلف مرتبط با خشکی در گندم به‌عنوان یکی از راه‌کارهای مقابله با این تنش ضروری است (Amiri *et al.*, 2013). تنش خشکی یکی از پیچیده‌ترین تنش‌های غیرزیستی در سطح جهان به‌شمار می‌آید و در مناطق خشک و متاثر از تغییرات اقلیمی، به‌طور فزاینده‌ای افزایش پیدا کرده است (Nahas *et al.*, 2020). مطالعه اثرات این تنش بر گیاهان مختلف اهمیت ویژه‌ای دارد. کم‌آبی، که به‌عنوان تنش خشکی شناخته می‌شود، یکی از مهم‌ترین عوامل محدودکننده عملکرد در کشاورزی است (Akbari *et al.*, 2016). تنش کم‌آبی علاوه بر اثراتی که بر روی حیات گیاهان می‌گذارد می‌تواند بر کارایی بازیابی گیاهان پس از تنش نیز تاثیر گذار باشد (Laxa *et al.*, 2019).

خشکسالی یکی از چالش‌های بزرگ در تولید محصولات کشاورزی، به‌ویژه گندم به شمار می‌رود که افزایش جمعیت و کاهش منابع آبی موجب بحرانی‌تر شدن شرایط شده است. اصلاح ژنوتیپ‌های گندم مقاوم به خشکی، به‌خصوص در مناطقی که با تغییرات اقلیمی و کمبود آب مواجه هستند، یک اولویت تحقیقاتی مهم به‌شمار می‌آید (Khadka *et al.*, 2020). گندم نان (*Triticum aestivum L.*)، به‌دلیل سازگاری گسترده آن باشرایط اقلیمی متفاوت، حدود ۹۰ درصد از اراضی زیر کشت گندم جهان را به خود اختصاص داده است و نقش کلیدی در تأمین امنیت غذایی دارد (Imam, 2016).

اصلاح‌گران به‌منظور بهبود پیشرفت ژنتیکی در عملکرد گندم، به دنبال استفاده از منابع ژنتیکی متنوع همچون ژرم پلاسم‌های بومی هستند، که به دلیل تحمل بالای آن‌ها به تنش‌ها مورد توجه قرار گرفته‌اند (Al-Naggar *et al.*, 2020). در سال‌های اخیر، تحقیقات متعددی برای شناسایی

ژنوتیپ‌های مقاوم به خشکی در گندم دیم، با استفاده از واریته‌های بومی و خویشاوندان وحشی آن انجام شده است (Warschefsky *et al.*, 2014; Pour-Aboughadareh *et al.*, 2018). از این رو، هدف از مطالعه حاضر، بررسی مقاومت توده‌های بومی گندم به تنش خشکی با استفاده از شاخص‌های مقاومت و حساسیت به تنش خشکی است.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق، ۱۹ ژنوتیپ (Landrace) گندم نان (جدول ۱) به منظور شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی مورد بررسی قرار گرفتند. ژنوتیپ‌های مورد مطالعه از مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر کرج تهیه شد و سپس جهت سهولت کار این ژنوتیپ‌ها کد گذاری شدند.

جدول ۱- مشخصات ژنوتیپ‌های مورد مطالعه

Table 1. Characteristics of studied genotypes

Genotype code	Genotype name	Genotype code	Genotype name
1	wc-47456	11	wc-47341
2	Pishtaz	12	wc-4931
3	wc-4566	13	wc-5053
4	wc-46697-II	14	wc-47619
5	wc-47367	15	wc-47360
6	wc-4780	16	wc-47628
7	wc-47636	17	wc-4640
8	wc-47381	18	wc-4823
9	wc-4584	19	wc-5047
10	wc-4530	---	------

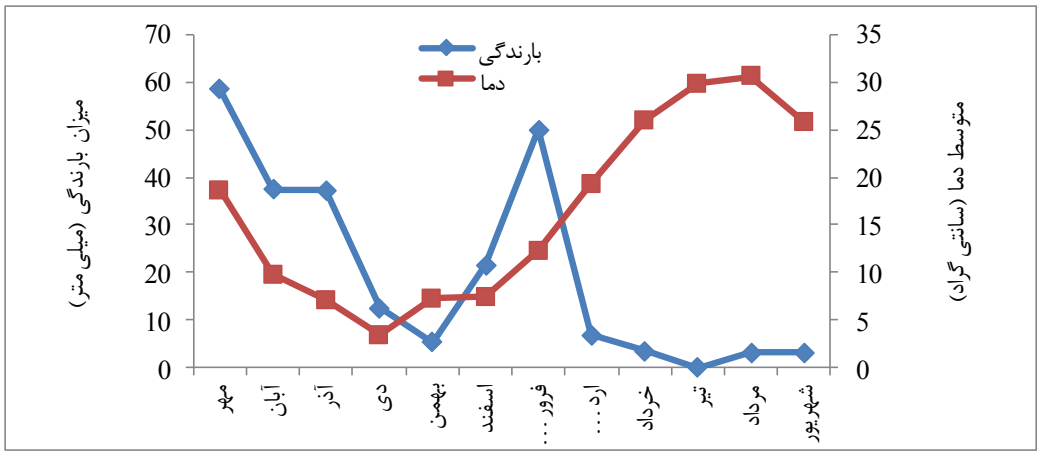
موقعیت محل اجرای آزمایش و نمودار آمبروتیک

این مطالعه در سال زراعی ۹۴-۱۳۹۳ در مزرعه تحقیقاتی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه رازی کرمانشاه اجرا شد. موقعیت جغرافیایی و آب و هوایی مزرعه‌ی تحقیقاتی پردیس کشاورزی دانشگاه رازی کرمانشاه مطابق جدول ۲ بود. همچنین نمودار دما و بارندگی محل آزمایش در شکل ۱ ارائه شده است.

جدول ۲- موقعیت جغرافیایی و آب هوایی محل اجرای آزمایش

Table 2. Geographical location and weather of the test site

طول جغرافیایی	**47** درجه و **9** دقیقه
عرض جغرافیایی	**34** درجه و **21** دقیقه
ارتفاع از سطح دریا	**1319**متر
متوسط بارندگی	**450-480** میلی‌متر
بافت خاک	سیلتی رسی
وضعیت آب و هوایی و وضع طبیعی	سرد معتدل، رشته کوه‌های زاگرس شمالی
متوسط درجه حرارت سالیانه	**27/9** و **3/26** درجه سانتی‌گراد
میزان بارندگی در سال اجرای آزمایش	**397/3** میلی‌متر



شکل ۱- نمودار دما و بارندگی محل آزمایش در سال زراعی ۹۴-۱۳۹۳ (سازمان هواشناسی ایران)

Figure 1. Temperature and rainfall diagram of the experimental site in the crop year 2013-2014 (Iran Meteorological Organization)

خصوصیات طرح آزمایشی و عملیات زراعی

این آزمایش بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار و در دو شرایط تنش خشکی و نرمال اجرا شد. هر کرت آزمایشی شامل پنج خط به طول دو متر بود. فاصله بین خطوط ۲۳ سانتی‌متر با تراکم ۴۰۰ بذر در متر مربع در نظر گرفته شد. اولین آبیاری پس از کاشت در تاریخ ۲۴ آبان انجام شد و این تاریخ به عنوان زمان کاشت ثبت گردید. در شرایط نرمال، آبیاری به‌صورت منظم ادامه داشت، اما در شرایط تنش، آبیاری در طول دوره رشد گیاهان انجام نشد. در طول آزمایش، از کود شیمیایی استفاده نشد و عملیات وجین به‌صورت دستی انجام گرفت. برداشت محصول در اوایل تیرماه ۱۳۹۴ و در مرحله رسیدگی فیزیولوژیکی، که بر اساس زرد شدن کامل سنبله‌ها و خشک شدن ساقه‌ها و برگ‌ها تشخیص داده شد، انجام گرفت. به دلیل تفاوت در شرایط تنش خشکی و بدون تنش، رسیدگی در شرایط مختلف با کمی تفاوت زمانی رخ داد؛ با این حال، برداشت زمانی انجام شد که حداقل ۹۰ درصد سنبله‌ها به مرحله زردی کامل رسیده و رطوبت دانه‌ها به حدود ۱۲-۱۴ درصد (وزن تر) کاهش یافته بود. عملکرد دانه در متر مربع (GY) پس از حذف اثر حاشیه، با برداشت سنبله‌ها از سه ردیف یک‌متری از هر کرت وسپس خرمن‌کوبی، و توزین دانه‌ها محاسبه شد.

محاسبه شاخص‌های کمی مقاومت به خشکی مبتنی بر عملکرد دانه

برای بررسی ژنوتیپ‌های مورد مطالعه از نظر حساسیت و مقاومت به تنش خشکی از شاخص‌های تنش شامل: شاخص حساسیت به تنش (SSI) (Fischer and Maurer, 1978)، تحمل به تنش (TOL) (Rossielli & Hamblin, 1981)، میانگین بهره‌وری (MP) (Rossielli & Hamblin, 1981)، شاخص عملکرد (YI) (Lin *et al.*,

1986)، شاخص پایداری عملکرد (YSI) (Bouslama and Schapaugh, 1984)، شاخص تحمل به تنش (STI) (Fernandez, 1992)، میانگین هندسی بهره‌وری (GMP) (Fernandez, 1992)، میانگین هارمونیک (HMP) (Fernandez, 1992)، شاخص مقاومت به خشکی (DI) (Lan, 1998)، شاخص حساسیت به خشکی (DSI) (Fischer and Maurer, 1978)، شاخص پاسخ به خشکی (RDI) (Fischer and Maurer, 1978)، شاخص کاهش نسبی عملکرد (RDY) (Emre et al. 2011)، شاخص درصد حساسیت به تنش (SSPI) (Moosavi *et al.*, 2008)، شاخص کارایی نسبی (REI) (Ramirez-Vallejo and Kelly, 1998)، شاخص شدت تنش اشنایدر (SSPI) (Schneider *et al.*, 1997)، ارزیابی فشار تنش (PEV) (Bouslama and Schapaugh, 1984)، شاخص تحمل به تنش تعدیل شده برای شرایط بدون تنش رطوبتی (K1STISTI) (Naderi *et al.*, 2000)، شاخص تحمل به تنش تعدیل شده برای شرایط تنش (K2STISTI) (Naderi *et al.*, 2000) و میانگین نسبی عملکرد (MRP) (Ramirez-Vallejo and Kelly, 1998) استفاده شد.

تجزیه داده‌ها

نرمال بودن داده‌ها قبل از انجام تحلیل‌های آماری با استفاده از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف (Kolmogorov-Smirnov) در نرم افزار SPSS بررسی شد. بر اساس نتایج بدست آمده از آزمون، داده‌ها از توزیع نرمال برخوردار بودند و بنابراین تحلیل‌های آماری مبتنی بر نرمال بودن داده‌ها قابل اجرا بوده است. رتبه شاخص‌ها، همبستگی میان شاخص‌ها، تجزیه به مولفه‌های اصلی و تجزیه کلاستر به روش Ward به ترتیب با استفاده از نرم افزارهای Excel، GraphPad، Minitab و Clustvis (Metsalu and Vilo 2015) انجام شد.

نتایج و بحث

بررسی جدول تجزیه واریانس ساده برای صفت عملکرد دانه در شرایط تنش (Ys) و آبی (Yp) (جدول ۳) تفاوت معنی‌داری بین ژنوتیپ‌ها را نشان داد. عملکرد دانه ($gr\ m^{-2}$) برای ژنوتیپ‌ها دارای دامنه‌ی تغییرات وسیعی بود.

جدول ۳ تجزیه واریانس برای صفت عملکرد دانه در ژنوتیپ‌های مورد ارزیابی

Table 3. Variance analysis for the grain yield trait of evaluated genotypes

Sources of Variation	df	Yp	Ys
Block	2	1097.545*	251.057*
Genotype	18	7233.201**	1648.018**
Error	36	1403.58	343.324
Coefficient of variation%	-	27.464	25.30

*Significant (P<0.05); **Significant (P<0.01)

عملکرد دانه در شرایط نرمال (Yp)، عملکرد دانه در شرایط تنش (Ys)

برای شناسایی ژنوتیپ‌های مقاوم به خشکی بر اساس تمامی شاخص‌ها، ابتدا رتبه‌بندی هر ژنوتیپ انجام شد (جدول ۴) و مقادیر عددی و رتبه‌های هر شاخص مورد مقایسه قرار گرفت (جدول ۵)، در نهایت، با توجه به میانگین و انحراف معیار در شاخص‌های مختلف، ژنوتیپ‌های مطلوب برای تحمل خشکی شناسایی شدند.

ژنوتیپ‌های شماره ۴، ۵، ۱۱ و ۱۴ بیشترین عملکرد دانه در شرایط تنش (YS)، میانگین هارمونیک (HMP) و شاخص عملکرد (YI) را داشتند، در حالی‌که ژنوتیپ‌های شماره ۱، ۶، ۷ و ۱۰ کمترین عملکرد دانه در شرایط تنش (YS) و شاخص عملکرد (YI) را نشان دادند (جدول ۴). همچنین، ژنوتیپ‌های ۲، ۳، ۱۴ و ۱۶ بالاترین و ژنوتیپ‌های ۶، ۸، ۱۲ و ۱۹ پایین‌ترین عملکرد دانه در شرایط عدم تنش (YP)را داشتند (جدول ۴). هرچه عملکرد دانه در هر دو شرایط بیشتر باشد، نشان‌دهنده مقاومت بالاتر آن رقم است. در شناسایی ارقام مقاوم به خشکی بیان شده که عملکرد دانه به عنوان معیاری قابل اعتماد برای مقاومت به خشکی در نظر گرفته می‌شود (Singh *et al.*, 2008). پایداری عملکرد دانه نشان‌دهنده تفاوت بین عملکرد بالقوه و واقعی در شرایط تنش محیطی است (Moradi, 2017). در مناطق نیمه‌خشک که پراکنش بارندگی مناسب نیست، پتانسیل عملکرد در شرایط تنش ممکن است بهترین معیار برای تحمل خشکی نباشد، بلکه پایداری عملکرد و مقایسه عملکرد در شرایط تنش و بدون تنش به عنوان معیارهای مناسب‌تری معرفی شده‌اند (Golestani Esfandabadi and Paknit, 2014). ژنوتیپ‌های شماره ۲، ۴، ۱۱ و ۱۴ در شاخص‌های تحمل تنش (STI) و میانگین هندسی بهره‌وری (GMP) بالاترین مقادیر را داشتند و به عنوان ژنوتیپ‌های با پتانسیل عملکرد بالا شناسایی شدند. در مقابل، ژنوتیپ‌های شماره ۶، ۷، ۸ و ۱۹ به عنوان ژنوتیپ‌های حساس به خشکی شناخته شدند. ژنوتیپ‌های شماره ۲، ۳، ۴ و ۱۴ بالاترین مقادیر شاخص میانگین بهره‌وری (MP) را داشتند، در حالی که ژنوتیپ‌های شماره ۶، ۱۲، ۸ و ۱۹ کمترین مقادیر آن را نشان دادند (جدول ۴). این ژنوتیپ‌ها می‌توانند برای تلاقی و تجزیه ژنتیکی جهت بهبود مقاومت به خشکی از طریق روش‌هایی مانند تجزیه دی‌آلل، نقشه‌یابی و انتخاب به کمک نشانگر معرفی شوند.

شاخص تحمل به تنش (TOL) نشان‌دهنده حساسیت ژنوتیپ‌ها به تنش است و شاخص میانگین محصول‌دهی (MP) به تمایل به انتخاب ژنوتیپ‌هایی با عملکرد بالقوه بالاتر و تحمل کمتر به تنش اشاره دارد (Rossielli, & Hamblin, 1981). در صورتی که اختلاف قابل توجهی بین عملکرد در شرایط تنش و بدون تنش وجود داشته باشد، ممکن است نتیجه به سمت عملکرد در شرایط بدون تنش تمایل پیدا کند. به همین دلیل، شاخص میانگین هندسی بهره‌وری (GMP) معرفی شد که نسبت به تفاوت‌های عملکرد در شرایط تنش و غیر تنش حساسیت کمتری دارد

(Fernandez, 1992). علاوه بر این، شاخص تحمل به تنش (STI) نیز ارائه شد. شاخص‌های تحمل تنش (STI)، میانگین هندسی بهره‌وری (GMP) و میانگین بهره‌وری (MP) بیشترین همبستگی را با عملکرد دانه در شرایط مطلوب، تنش خشکی ملایم و شدید دارند و به عنوان شاخص‌های مناسب برای انتخاب ژنوتیپ‌های مقاوم به خشکی شناخته شدند (Dastfal *et al.*, 2018). شاخص حساسیت به تنش (SSI) یکی دیگر از شاخص‌های انتخاب است که قادر به تفکیک گروه A از C نیست و به‌طور گسترده برای شناسایی ژنوتیپ‌های حساس و مقاوم استفاده شده است (Clarke *et al.*, 1992: Fischer & Maurer, 1978). ژنوتیپ‌های شماره ۴، ۵، ۱۱ و ۱۹ کمترین و ژنوتیپ‌های شماره ۱، ۳، ۷ و ۱۰ بیش‌ترین میزان شاخص حساسیت به تنش (SSI) را داشتند (جدول ۴). همچنین، ژنوتیپ‌های ۴، ۵، ۱۱ و ۱۹ بالاترین مقادیر و ژنوتیپ‌های ۱، ۳، ۷ و ۱۰ پایین‌ترین مقادیر شاخص‌های پایداری عملکرد (YSI) و پاسخ به خشکی (RDI) را نشان دادند (جدول ۴). شاخص پایداری عملکرد (YSI) به ارزیابی عملکرد یک رقم تحت شرایط تنش نسبت به شرایط غیر تنش می‌پردازد و به عنوان نشانگری برای مقاومت به خشکی در مواد ژنتیکی محسوب می‌شود (Bouslama & Schapaugh, 1984). بنابراین، ارقامی با شاخص پایداری عملکرد (YSI) بالاتر انتظار می‌رود که تحت هر دو شرایط عملکرد بالاتری داشته باشند. اما مطالعه دیگر نشان داد که ارقامی با شاخص پایداری عملکرد (YSI) بالاتر، کم‌ترین عملکرد را در شرایط بدون تنش و بالاترین عملکرد را در شرایط تنش داشتند (Siose Mardeh *et al.*, 2006).

بر اساس شاخص مقاومت خشکی (DI) ژنوتیپ‌های ۴، ۵، ۱۱ و ۱۷ بیشترین مقدار و ژنوتیپ‌های ۱، ۶، ۷ و ۱۰ کمترین مقدار را داشتند (جدول ۴). بر اساس شاخص حساسیت به خشکی (DSI) ژنوتیپ‌های ۴، ۵، ۱۱ و ۱۹ کمترین مقدار و ژنوتیپ‌های ۱، ۳، ۷ و ۱۰ بیشترین میزان را داشتند. بر اساس شاخص تحمل به تنش تعدیل شده برای شرایط بدون تنش رطوبتی (K1STISTI) ژنوتیپ‌های ۲، ۴، ۱۶ و ۱۴ بیشترین میزان و ژنوتیپ‌های ۶، ۱۲، ۸ و ۱۹ کمترین میزان را داشتند. همچنین ژنوتیپ‌های ۴، ۵، ۱۱ و ۱۴ بیشترین مقادیر و ژنوتیپ‌های ۶، ۷، ۸ و ۱۹ کمترین مقادیر شاخص تحمل به تنش تعدیل شده برای شرایط تنش (K2STISTI) نشان دادند (جدول ۴). بر اساس شاخص‌های کارایی نسبی (REI) و میانگین نسبی عملکرد (MRP) ژنوتیپ‌های ۲، ۴، ۱۱ و ۱۴ بیشترین میزان و ژنوتیپ‌های ۶، ۷، ۸ و ۱۹ کمترین میزان را داشتند. علاوه بر این، از نظر شاخص ارزیابی فشار تنش (PEV) ژنوتیپ‌های ۴، ۵، ۱۱ و ۱۹ از مقادیر کمتری برخوردار بودند و به‌عنوان ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی بر اساس این شاخص‌ها انتخاب شدند. همچنین ژنوتیپ‌های ۱، ۳، ۷ و ۱۰

دارای بیشترین میزان بر اساس این شاخص‌ها و به عنوان حساس‌ترین ژنوتیپ‌ها معرفی گردیدند.

ژنوتیپ‌های ۵، ۱۱، ۱۲ و ۱۹ از نظر شاخص‌های تحمل تنش (TOL) و شدت تنش اشنایدر (SSPI) از کمترین مقادیر و ژنوتیپ‌های ۲، ۳، ۹ و ۱۴ از بیشترین میزان برخوردار بودند. ژنوتیپ‌هایی با مقادیر کم برای شاخص تحمل تنش (TOL) اختلاف عملکرد کمتری در شرایط تنش و فاقد تنش داشتند و ژنوتیپ‌های که دارای مقادیر زیاد شاخص حساسیت به تنش (SSI) بودند به دلیل حساسیت بالا به شرایط تنش پایین‌ترین میزان عملکرد دانه در محیط تنش را داشتند. شاخص تحمل تنش (TOL) از اختلاف عملکرد یک ژنوتیپ در محیط بدون تنش و تنش بدست می‌آید. مقدار بالای تحمل تنش (TOL) نشان دهنده حساسیت نسبی ژنوتیپ‌ها به تنش می‌باشد این شاخص فقط می‌تواند ژنوتیپ‌های با عملکرد نسبی بالا در محیط دارای تنش را انتخاب کند و ژنوتیپ‌های انتخابی تظاهر خوبی در محیط بدون تنش نخواهند داشت (Fernandez, 1992; Rossielli & Hamblin,1981). هر مقدار شاخص تحمل به تنش (TOL) کم باشد مطلوب‌تر است، انتخاب بر اساس شاخص تحمل تنش (TOL) باعث انتخاب ژنوتیپ‌هایی می‌شود که در محیط بدون تنش عملکرد و میانگین بهره‌وری پایینی دارند (Fernandez, 1992; Rossielli & Hamblin,1981) لذا، این شاخص به‌تنهایی نمی‌تواند شاخص مناسبی جهت انتخاب ژنوتیپ-های گروه A محسوب شود. انتخاب بر اساس شاخص حساسیت به تنش (SSI) نیز باعث انتخاب ژنوتیپ‌هایی می‌شود که متحمل به تنش هستند ولی پتانسیل عملکردشان پایین است (Fernandez, 1992) لذا، این شاخص نیز قادر به تشخیص ژنوتیپ‌هایی که در هر دو شرایط عملکرد بالایی دارند نیست. در مطالعه دیگر شاخص حساسیت به تنش (SSI) را به عنوان شاخص مناسبی برای تشخیص ارقام مقاوم به خشکی در شرایط تنش شدید معرفی کردند (Siose Mardeh *et al.*, 2006). شاخص‌های تحمل به تنش (TOL) و میانگین بهره‌وری (MP) ازجمله شاخص‌های مهم مورد استفاده در پژوهش‌های دیگر محققین است (Rossielli & Hamblin, 1981).

جدول ۴- میانگین عملکرد دانه و شاخص‌های حساسیت و تحمل به خشکی در ژنوتیپ‌های مورد بررسی

Table 4. The mean grain yield and indicators of sensitivity and tolerance to drought in the examined genotypes

G	Yp	Ys	SSI	TOL	MP	GMP	STI	YI	YSI	HAM	DI	RDI	SSPI	K1STI	K2STI	DSI	REI	MRP	PEV
1	221.027	41.117	1.098	179.910	131.072	95.330	0.198	0.741	0.186	69.335	0.138	0.719	41.972	0.210	0.109	1.098	0.765	1.773	0.814
2	273.727	65.597	1.026	208.130	169.662	133.998	0.391	1.183	0.240	105.832	0.283	0.926	48.556	0.638	0.547	1.026	1.511	2.460	0.760
3	261.060	50.030	1.091	211.030	155.545	114.284	0.284	0.902	0.192	83.968	0.173	0.741	49.232	0.422	0.231	1.091	1.099	2.120	0.808
4	235.510	81.927	0.880	153.583	158.718	138.905	0.420	1.477	0.348	121.565	0.514	1.344	35.830	0.507	0.917	0.880	1.623	2.576	0.652
5	190.170	83.653	0.756	106.517	136.912	126.128	0.346	1.508	0.440	116.194	0.664	1.700	24.850	0.273	0.788	0.756	1.338	2.396	0.560
6	180.823	35.797	1.082	145.027	108.310	80.454	0.141	0.645	0.198	59.762	0.128	0.765	33.834	0.100	0.059	1.082	0.545	1.489	0.802
7	200.330	37.137	1.099	163.193	118.733	86.253	0.162	0.670	0.185	62.658	0.124	0.716	38.072	0.142	0.073	1.099	0.626	1.604	0.815
8	174.220	44.000	1.008	130.220	109.110	87.554	0.167	0.793	0.253	70.256	0.200	0.976	30.380	0.110	0.105	1.008	0.645	1.606	0.747
9	226.693	45.777	1.077	180.917	136.235	101.869	0.226	0.825	0.202	76.172	0.167	0.780	42.207	0.253	0.154	1.077	0.873	1.883	0.798
10	215.990	41.350	1.091	174.640	128.670	94.505	0.194	0.746	0.191	69.412	0.143	0.740	40.743	0.197	0.108	1.091	0.751	1.753	0.809
11	217.817	87.623	0.806	130.193	152.720	138.151	0.416	1.580	0.402	124.973	0.636	1.555	30.373	0.429	1.037	0.806	1.606	2.596	0.598
12	173.997	47.217	0.983	126.780	110.607	90.640	0.179	0.851	0.271	74.277	0.231	1.049	29.577	0.118	0.130	0.983	0.691	1.663	0.729
13	205.787	51.713	1.010	154.073	128.750	103.160	0.232	0.932	0.251	82.656	0.234	0.971	35.945	0.214	0.201	1.010	0.895	1.893	0.749
14	279.670	66.773	1.027	212.897	173.222	136.655	0.407	1.204	0.239	107.807	0.287	0.923	49.668	0.692	0.589	1.027	1.571	2.509	0.761
15	219.870	49.587	1.045	170.283	134.728	104.416	0.237	0.894	0.226	80.923	0.202	0.872	39.726	0.250	0.190	1.045	0.917	1.920	0.774
16	243.857	64.293	0.993	179.563	154.075	125.213	0.341	1.159	0.264	101.758	0.306	1.019	41.891	0.442	0.459	0.993	1.319	2.297	0.736
17	214.370	63.820	0.947	150.550	139.095	116.966	0.298	1.151	0.298	98.358	0.343	1.151	35.123	0.298	0.394	0.947	1.151	2.151	0.702
18	184.887	50.903	0.978	133.983	117.895	97.012	0.205	0.918	0.275	79.828	0.253	1.064	31.258	0.152	0.173	0.978	0.792	1.781	0.725
19	152.297	45.383	0.947	106.913	98.840	83.137	0.150	0.818	0.298	69.928	0.244	1.152	24.942	0.076	0.101	0.947	0.582	1.529	0.702

عملکرد دانه در شرایط نرمال (Yp)، عملکرد دانه در شرایط تنش (Ys)، شاخص حساسیت به تنش (SSI)، تحمل تنش (TOL)، میانگین بهره‌وری (MP)، شاخص عملکرد (YI)، شاخص پایداری عملکرد (YSI)، شاخص تحمل تنش (STI)، میانگین هندسی بهره‌وری (GMP)، میانگین هارمونیک (HMP)، شاخص مقاومت خشکی (DI)، شاخص حساسیت به خشکی (DSI)، شاخص پاسخ به خشکی (RDI)، شاخص کاهش نسبی عملکرد (RDY)، شاخص درصد حساسیت به تنش (SSPI)، شاخص کارایی نسبی (REI)، شاخص شدت تنش اشنایدر (SSPI)، ارزیابی فشار تنش (PEV) و میانگین نسبی عملکرد (MRP)

شاخص‌های تحمل خشکی نشان دادند که شناسایی ارقام مقاوم به خشکی نمی‌تواند بر اساس یک معیار واحد انجام شود. به دلیل تفاوت‌های موجود در نتایج شاخص‌ها، برای دستیابی به دقت بیشتر، از رتبه‌بندی RS استفاده شد (Tiwari *et al.*, 2023) که بر اساس میانگین و انحراف معیار رتبه‌ها و همچنین ژنوتیپ‌های برتر تنظیم شده است (جدول ۵). بر اساس تمام شاخص‌ها، ژنوتیپ‌های شماره ۱۱، ۴ و ۵ بالاترین رتبه‌ها را کسب کرده و به عنوان ژنوتیپ‌های مقاوم به خشکی شناسایی شدند. بنابراین، این ژنوتیپ‌ها می‌توانند برای تلاقی و تجزیه ژنتیکی جهت بهبود مقاومت به خشکی از طریق روش‌هایی مانند تجزیه دی‌آلل، نقشه‌یابی و انتخاب به کمک نشانگر استفاده شوند (Kumar *et al.*, 2023). در مقابل، ژنوتیپ‌های شماره ۱۹، ۶ و ۷ به عنوان ژنوتیپ‌های حساس به خشکی معرفی شدند (جدول ۵).

در پژوهش‌های پیشین با استفاده از رتبه‌بندی RS بر اساس شاخص‌های خشکی، موفق به شناسایی ژنوتیپ‌های مقاوم به خشکی شدند (Farshadfar *et al.*, 2013; Noorifarjam *et al.*, 2013). همچنین با استفاده از روش رتبه‌بندی، متحمل‌ترین ژنوتیپ‌ها شناسایی شد (Khalilelahi *et al.*, 2020). در رتبه‌بندی بر اساس مجموع، میانگین و انحراف معیار رتبه‌ها، ژنوتیپ‌های برتر شناسایی شدند (Naderi *et al.*, 2020). ازطرفی در بررسی تحمل ژنوتیپ‌های گندم نان (*Triticum aestivum*) به تنش خشکی انتهای فصل از میانگین رتبه‌ی هر ژنوتیپ، بر اساس برخی صفات زراعی و ۱۱ شاخص تحمل و حساسیت به تنش، استفاده شد (Afiuni *et al.*, 2015). کاربرد شاخص‌های تحمل به خشکی (STI، TOL، SSI، MP، GMP، SDI، RDI، SSPI، HARM و YSI) در ارزیابی ۲۷ ژنوتیپ گندم نان، تریتیکاله و تریتی پایروم بررسی شد و با انجام رتبه‌بندی ژنوتیپ‌ها، ژنوتیپ‌های مقاوم به خشکی شناسایی شد (Shanazari *et al.*, 2015).

جدول ۵- رتبه عملکرد دانه و شاخص‌های حساسیت و تحمل به خشکی در ژنوتیپ‌های مختلف گندم

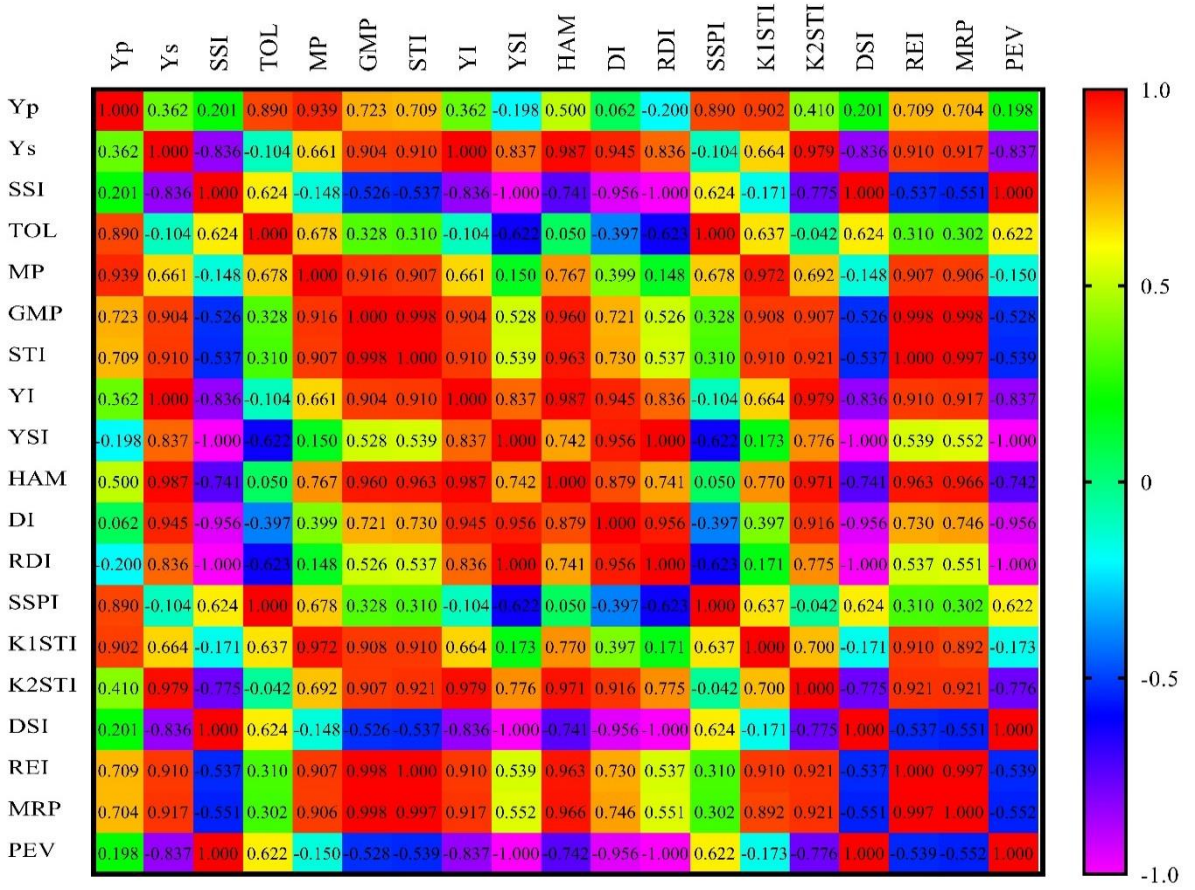
Table 5. Seed yield rank and indicators of sensitivity and tolerance to drought in different wheat genotypes

G	Yp	Ys	SSI	TOL	MP	GMP	STI	YI	YSI	HAM	DI	RDI	SSPI	K1STI	K2STI	DSI	REI	MRP	PEV	SUM	AVE	STD	RS
1	7	17	18	15	11	13	13	17	18	17	17	18	15	12	14	18	13	13	18	284	14.947	3.045	17.993
2	2	5	11	17	2	4	4	5	11	5	7	11	17	2	5	11	4	4	11	138	7.263	4.747	12.011
3	3	10	16	18	4	8	8	10	16	8	14	16	18	6	8	16	8	8	16	211	11.105	4.864	15.969
4	5	3	3	9	3	1	1	3	3	2	3	3	9	3	2	3	1	2	3	62	3.263	2.232	5.495
5	14	2	1	1	8	5	5	2	1	3	1	1	1	8	3	1	5	5	1	68	3.579	3.453	7.032
6	16	19	15	7	18	19	19	19	15	19	18	15	7	18	19	15	19	19	15	311	16.368	3.715	20.083
7	13	18	19	11	14	17	17	18	19	18	19	19	11	15	18	19	17	17	19	318	16.737	2.663	19.400
8	17	15	9	5	17	16	16	15	9	14	13	9	5	17	16	9	16	16	9	243	12.789	4.144	16.934
9	6	13	14	16	9	11	11	13	14	12	15	14	16	9	12	14	11	11	14	235	12.368	2.565	14.933
10	10	16	17	13	13	14	14	16	17	16	16	17	13	13	15	17	14	14	17	282	14.842	1.951	16.793
11	9	1	2	4	6	2	2	1	2	1	2	2	4	5	1	2	2	1	2	51	2.684	2.083	4.767
12	18	12	7	3	16	15	15	12	7	13	11	7	3	16	13	7	15	15	7	212	11.158	4.598	15.756
13	12	8	10	10	12	10	10	8	10	9	10	10	10	11	9	10	10	10	10	189	9.947	1.026	10.973
14	1	4	12	19	1	3	3	4	12	4	6	12	19	1	4	12	3	3	12	135	7.105	5.877	12.983
15	8	11	13	12	10	9	9	11	13	10	12	13	12	10	10	13	9	9	13	207	10.895	1.696	12.591
16	4	6	8	14	5	6	6	6	8	6	5	8	14	4	6	8	6	6	8	134	7.053	2.758	9.811
17	11	7	5	8	7	7	7	7	5	7	4	5	8	7	7	5	7	7	5	126	6.632	1.571	8.203
18	15	9	6	6	15	12	12	9	6	11	8	6	6	14	11	6	12	12	6	182	9.579	3.322	12.901
19	19	14	4	2	19	18	18	14	4	15	9	4	2	19	17	4	18	18	4	222	11.684	6.913	18.597

عملکرد دانه در شرایط نرمال (Yp)، عملکرد دانه در شرایط تنش (Ys)، شاخص حساسیت به تنش (SSI)، تحمل تنش (TOL)، میانگین بهره‌وری (MP)، شاخص عملکرد (YI)، شاخص پایداری عملکرد (YSI)، شاخص تحمل تنش (STI)، میانگین هندسی بهره‌وری (GMP)، میانگین هارمونیک (HMP)، شاخص مقاومت خشکی (DI)، شاخص حساسیت به خشکی (DSI)، شاخص پاسخ به خشکی (RDI)، شاخص کاهش نسبی عملکرد (RDY)، شاخص درصد حساسیت به تنش (SSPI)، شاخص کارایی نسبی (REI)، شاخص شدت تنش اشنایدر (SSPI)، ارزیابی فشار تنش (PEV) و میانگین نسبی عملکرد (MRP)

در بررسی عملکرد ژنوتیپ‌ها در شرایط تنش و بدون تنش تأکید شد که بهترین شاخص‌ها، آن‌هایی هستند که همبستگی بالایی با عملکرد دانه دارند، زیرا این شاخص‌ها قادر به شناسایی ژنوتیپ‌هایی با عملکرد بالا در هر دو محیط هستند (Fernandez & Kuo, 1992). نتایج تحلیل همبستگی بین شاخص‌های مقاومت به خشکی مبتنی بر عملکرد دانه در شرایط تنش و بدون تنش (شکل ۲)، نشان داد که شاخص‌های STI، MP، GMP، HMP، K1STI، K2STI، YI، MRP و REI همبستگی مثبت و معناداری با عملکرد دانه در هر دو شرایط داشتند. این نتایج با یافته‌های پیشین مطابقت دارد (Khyber *et al.*, 2019; Kamrani *et al.*, 2018; Afiuni *et al.*, 2015; Shanazari *et al.*, 2015) که نشان می‌دهد که این شاخص‌ها می‌توانند به‌عنوان شاخص‌های مناسب برای انتخاب ژنوتیپ‌های پربازده در هر دو شرایط محیطی معرفی شوند.

در عین حال، شاخص‌های TOL و SSPI همبستگی مثبت و معناداری با عملکرد در شرایط بدون تنش نشان دادند. بنابراین، می‌توان گفت که این شاخص‌ها از جمله بهترین معیارها برای شناسایی ژنوتیپ‌های مقاوم هستند، که با نتایج دیگر همخوانی دارد (Sardouie-Nasab *et al.*, 2014; Noorifarjam *et al.*, 2013). شاخص TOLبا عملکرد در شرایط بدون تنش و SSI همبستگی مثبت و معنی‌دار داشت. بدین ترتیب، شاخص DIباعث افزایش عملکرد و شاخص‌های SSPI، DSI و SSI باعث کاهش عملکرد دانه در شرایط تنش می‌شوند. همچنین همبستگی بین شاخص‌های مقاومت به خشکی نشان داد که شاخص‌های STI، MRP و صفت عملکرد بیولوژیک با عملکرد دانه در هر دو شرایط تنش و بدون تنش همبستگی مثبت و معنی‌دار داشتند (Naderi *et al.*, 2020).



شکل ۲- همبستگی بین شاخص‌های حساسیت و تحمل خشکی با عملکرد دانه در شرایط تنش و بدون تنش

Figure 2. Correlation between drought sensitivity and tolerance indices with grain yield under stress and non-stress conditions

تجزیه به مؤلفه‌های اصلی برای شاخص‌های مقاومت به خشکی انجام شد (جدول ۶). نتایج نشان داد که دو مؤلفه اول بیشترین سهم را در توجیه واریانس داده‌ها داشته‌اند به گونه‌ای که، مؤلفه اول ۶۶/۷۸ درصد و مؤلفه دوم ۳۲/۵۰ درصد از واریانس کل را توجیه می‌کند. مؤلفه اول دارای ضرایب مثبت و بالا برای شاخص‌های Yp، Ys، MP، GMP، STI، YI، YSI، HAM، DI، RDI، K1STI، K2STI، REI و MRP و ضرایب منفی و بالا برای شاخص‌های SSI، TOL، SSPI، DSI و PEV است و شاخص پایداری عملکرد و تحمل به تنش خشکی نامیده می‌شود.

جدول ۶- بررسی شاخص‌های مقاومت به خشکی با استفاده از تجزیه به مؤلفه‌های اصلی

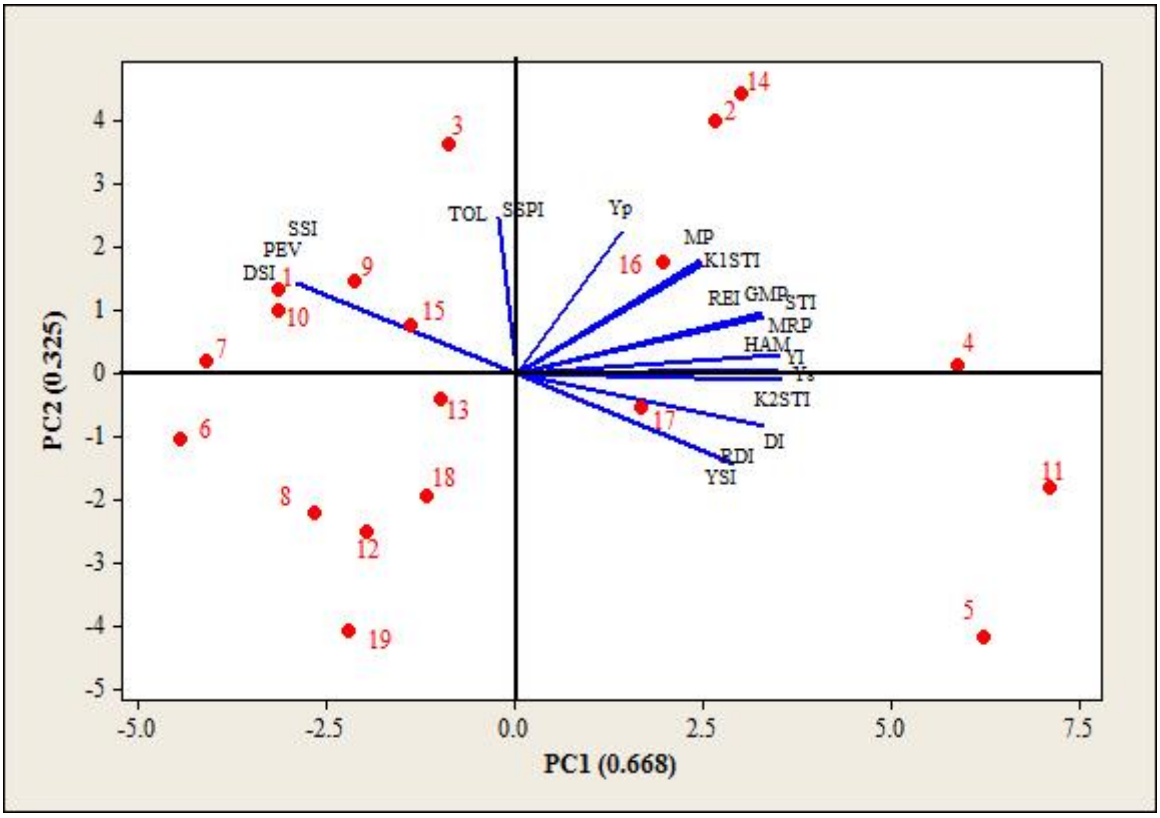
Table 6. Examining drought resistance indices using decomposition into main components

Indexes	PC1	PC2
Yp	.915	.399
Ys	-.040	.999
SSI	.576	-.815
TOL	.995	-.064
MP	.722	.690
GMP	.389	.920
STI	.375	.926
YI	-.040	.999
YSI	-.576	.815
HAM	.116	.991
DI	-.342	.932
RDI	-.576	.815
SSPI	.995	-.064
K1STI	.692	.697
K2STI	.027	.981
DSI	.576	-.815
REI	.375	.926
MRP	.362	.931
PEV	.576	-.815
Total	6.177	12.689
% of Variance	32.508	66.783
Cumulative %	99.291	66.783

براساس نمودار بای‌پلات (شکل ۳)، ژنوتیپ‌های شماره ۱۴، ۲، ۱۶ و ۴ در مواجهه با شاخص‌های مقاومت به خشکی، در هر دو شرایط تنش و بدون تنش، عملکرد بالایی از خود نشان دادند که این امر نشان‌دهنده‌ی جایگاه این ژنوتیپ‌ها در گروه A است. در مطالعه‌ای که با استفاده از دیاگرام بای‌پلات، ژنوتیپ‌های برتر تحت هر دو شرایط تنش و بدون تنش شناسایی شدند که می‌توان از این ژنوتیپ‌ها در برنامه‌های به‌نژادی برای ایجاد ارقام متحمل به خشکی گندم نان بهره برد (Khalilelahi *et al.*, 2020).

تجزیه به مؤلفه‌های اصلی، نشان داد که دو عامل اول ۹۹/۹ درصد از تغییرات متغیرهای مورد بررسی در شرایط تنش و بدون تنش را توجیه می‌کند. نمودار چندمتغیره بای‌پلات نیز نشان داد که ارقام مورد نظر در نزدیکی بردارهای مربوط به بهترین شاخص‌های مقاومت به خشکی، یعنی STI، GMP، MP و HM قرار دارند. همچنین، توزیع ارقام در فضای بای‌پلات تنوع ژنتیکی نسبت به تنش خشکی را به وضوح نشان می‌دهد (Bakhshashi Qeshlaq & Shecharchizadeh,1981).

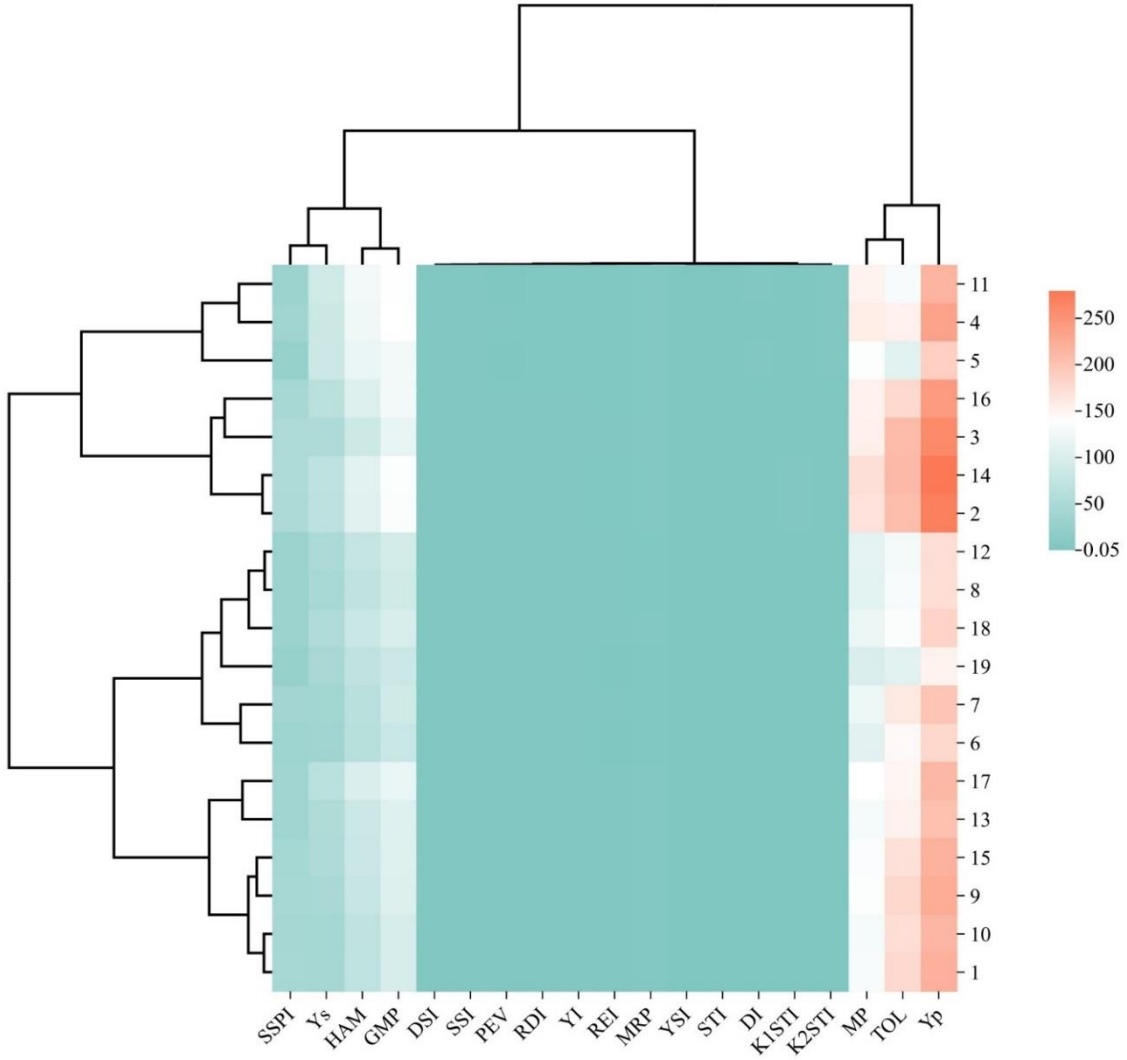
در ارزیابی بر اساس نمودار بای‌پلات به روش گابریل، ژنوتیپ‌های مورد مطالعه در دو ناحیه با پتانسیل عملکرد بالا و پایین قرار گرفتند، به‌طوری‌که سه نوع ژنوتیپ در نزدیکی بردارهای تحمل به تنش خشکی شناسایی شدند و به‌عنوان ژنوتیپ‌های برتر معرفی شدند. همچنین با استفاده از نتایج حاصل از تجزیه به مؤلفه‌های اصلی و شاخص‌های مقاومت به خشکی، ژنوتیپ‌های گندم با تحمل نسبی به تنش کم‌آبی شناسایی شد (Hooshmandi *et al.*, 2019).



شکل ۳- نمودار بای‌پلات حاصل از تجزیه به مؤلفه‌های اصلی برای شاخص‌های مقاومت به خشکی

Figure 3. Biplot diagram resulting from decomposition into main components for drought resistance indices

با توجه به شاخص‌های ذکر شده در تجزیه خوشه‌ای، ژنوتیپ‌ها در ۴ گروه جداگانه قرار گرفتند (شکل ۴) بطوری‌که ژنوتیپ‌های ۱۱، ۴ و ۵ که دارای RS بالا بودند در یک گروه قرار گرفتند. این گروه از نظر شاخص‌های ذکر شده در حد بالایی از مقاومت به خشکی قرار دارند و دارای YP و YS بیشتری بودند. پس این ژنوتیپ‌ها مقاوم به خشکی می‌باشند. ژنوتیپ‌های ۱۶، ۳، ۱۴ و ۲ نیز در یک گروه قرار گرفته که دارای YP بالا و همچنین مقادیر بالایی از شاخص‌های مهم تحمل به خشکی هستند بنابراین، این ژنوتیپ‌ها نیمه مقاوم به خشکی هستند. ژنوتیپ‌های ۱۲، ۸، ۱۹، ۱۸، ۶ و ۷ نیز در یک گروه قرار گرفته که دارای مقادیر پایینی از شاخص‌های مهم تحمل به خشکی هستند و در گروه ژنوتیپ‌های حساس می‌باشند. سایر ژنوتیپ‌ها در گروه ژنوتیپ‌های نیمه حساس قرار گرفتند. بر اساس نتایج حاصل از تجزیه کلاستر، ژنوتیپ‌ها به چهار گروه مقاوم، نیمه مقاوم، نیمه حساس و حساس متمایز شدند.



شکل ۴- دندروگرام حاصل از تجزیه خوشه‌ای با روش Ward برای شاخص‌های حساسیت و تحمل به خشکی در ژنوتیپ‌های مورد بررسی

Figure 4. Dendrogram resulting from cluster analysis with Ward's method for drought sensitivity and tolerance indicators in the studied genotypes.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، برای شناسایی ژنوتیپ‌های برتر، ابتدا رتبه‌بندی ژنوتیپ‌ها بر اساس شاخص‌های مختلف انجام شد و سپس از طریق میانگین و انحراف معیار، مطلوب‌ترین ژنوتیپ‌ها شناسایی شدند. نتایج نشان داد که ژنوتیپ‌های شماره ۴، ۵، ۱۱، و ۱۴ بالاترین مقادیر شاخص‌های YS، HAM، و YI را در شرایط تنش خشکی داشتند. در مقابل، ژنوتیپ‌های ۱، ۶، ۷، و ۱۰ دارای کمترین مقادیر YS و YI بودند. از این رو می‌توان اذعان داشت که عملکرد دانه در شرایط تنش و بدون تنش معیار مناسبی برای ارزیابی مقاومت به خشکی است. علاوه بر این، ژنوتیپ‌های شماره ۲، ۳، ۱۴ و ۱۶ بیشترین

عملکرد را در شرایط بدون تنش نشان دادند، در حالی که ژنوتیپ‌های ۶، ۸، ۱۲، و ۱۹ کمترین عملکرد را داشتند. شاخص‌های نظیر STI و GMP نیز برای ارزیابی پتانسیل عملکردی این ژنوتیپ‌ها استفاده شد که ژنوتیپ‌های شماره ۲، ۴، ۱۱، و ۱۴ به عنوان ژنوتیپ‌های با عملکرد بالا شناخته شدند. این تحقیق همچنین نشان داد که شاخص‌های TOL و SSI در شناسایی ژنوتیپ‌های حساس به تنش نیز کارآمد هستند. ژنوتیپ‌های با مقادیر بالای TOL حساسیت بیشتری به تنش دارند، در حالی که ژنوتیپ‌های با مقادیر بالای SSI نشان‌دهنده‌ی پتانسیل پایین عملکرد در شرایط تنش هستند.

References

Afiuni, D., Allahdadi, I., Akbari, Gh. A. & Najafian, G. 2015. Evaluation of tolerance of bread wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes to terminal drought stress based on some agronomic traits. Arid Biome Scientific and Research Journal, 15 (1) 1-17. (In Persian). https://www.magiran.com/p1508372

Akbari, S., Kafi, M. & Rezvan Beidokhti., S. 2016. The effects of drought stress on yield, yield components and antioxidant of two garlic *(Allium sativum L.)* Ecotypes with different planting densities. Journal of Agroecology, 8l: 95-106. (In Persian). Doi: 10.22067/jag.v8i1.47373

Al-Naggar, A. M. M., El-Shafi, M. A. E. M. A., El-Shal, M. H. & Anany, A. H. 2020c. Evaluation of Egyptian wheat landraces (*Triticum Aestivum* L.) for drought tolerance, agronomic, grain yield and quality traits. Plant Archives, 20(1): 3487-3504.

Amiri, R., Bahraminejad, S. & Jalali-Honarmand, S. 2013. Effect of terminal drought stress on grain yield and some morphological traits in 80 bread wheat genotypes. International Journal of Agriculture and Crop Sciences, 5(10): 1145.

Bakhshashi Qeshlaq, M. & Shecharchizadeh, M. 2014. Evaluation of bread wheat genotypes using drought stress tolerance indices. Agricultural Plant Breeding Journal, 7(16): pp. 49-59. (In Persian). https://doi.org/10.22077/escs.2020.3202.1820

Bouslama, M., & Schapaugh, W. 1984. Stress tolerance in soybeans. I. Evaluation of three screening techniques for heat and drought tolerance. Crop Science, 24: 933-937. https://doi.org/10.2135/cropsci1984.0011183X002400050026x

Clarke, J.M., DePauw, R.M. & TownleySmith, T.F. 1992. Evaluation of methods for quantification of drought tolerance in wheat. Crop Science, 32, 723-728. https://doi.org/10.2135/cropsci1992.0011183X003200030029x

Dastfal, M., Barati, W., Imam, Y., Haqit Nia, H. & Ramzanpour, M. 2018. Evaluation of grain yield and its components in the genetics of wheat legs under drought stress conditions at the end of the season in Darab region. Journal of seedling and seed farming, 2(27): 195-217. (In Persian). https: https//doi.org/10.22092/sppj.2017.110432

Emre, I., Ozgur, T., Fatma, A. T. & Muzaffer, T. 2011. Determination of tolerance level of some wheat genotypes to post-anthesis drought. Turkish Journal of Field Crops, 16 (1): 59-63. https://www.researchgate.net/publication/288171933

Farshadfar, E. 2018. Genetic modification of environmental stresses. Trust publications, First edition, pp. 844. (In Persian).

Farshadfar, E., Romena., H. & Shabani. A. 2013. Evaluation of genetic parameters in agro-physiological traits of wheat (*Triticum aestivum* L.) under irrigated condition. International Journal Advanced Biological Biomedical Research, 14: 331-340. https://civilica.com/doc/1804530

Fernandez, G. & Kuo, C. 1992. Proceedings of the International Symposium on Adaptation of Vegetables and Other Food Crops in Temperature and Water Stress. AVRDC Publication, Tainan, Taiwan, pp: 257-270.

Fernandez, G.C.J. 1992. Effective selection criteria for assessing stress tolerance. In: C.G. Kuo, (Ed.), Proceedings of the International Symposium on Adaptation of Vegetables and Other Food Crops in Temperature and Water Stress, Publication, Tainan, Taiwan. https://doi.org/10.22001/wvc.72511

Fischer, R. & Maurer, R. 1978. Drought resistance in spring wheat cultivars. I. Grain yield responses. Crop and Pasture Science, 29: 897-912. https://doi.org/10.1071/AR9780897

Foroozanfar, M., Bihamta, M. R., Peyghambary, S. A., Zeynal, H. 2011. Evaluation of Bread Wheat Genotypes under Normal and Water Stress Conditions for Agronomic Traits. Agricultural Science and Sustainable Production, 21(3) 33-46. (In Persia) . https://www.magiran.com/p1003848

Golestani Esfandabadi, M. & Paknit, H. 2014. selection for drought resistance in sesame lines, 9th Iran Soil Science Congress, Tehran. (In Persian) .https://civilica.com/doc/11456.

Hooshmandi, B. 2019. Evaluation of tolerance to drought stress in wheat genotypes. Idesia journal (Chile), 37(2): 37-43. https://doi.org/10.3390/agronomy11061252

Imam, Y. 2016. Cereal cultivation. Shiraz University Press. Third edition. pp. 190.[In Persian].

Kamrani, M., Hoseini, Y. & Ebadollahi. A. 2018. Evaluation for heat stress tolerance in durum wheat genotypes using stress tolerance indices. Archives of Agronomy and Soil Science, 64(1): 38-45. https://doi.org/10.1080/03650340.2017.1326104

Khadka, K., Earl, H. J., Raizada., M. N. & Navabi, A. 2020. A Physio-Morphological Trait-Based Approach for Breeding Drought Tolerant Wheat. Frontiers in Plant Science, 11(715): 1-26. DOI: 10.3389/fpls.2020.00715

Khalilelahi, N., Sasani, S., Ahmadi, G., & Daneshvar, M. 2020. Effect of terminal drought stress on some agronomic traits of 20 elite bread wheat genotypes. Environmental Stresses in Crop Sciences, 13 (3) 683-699. (In Persian). https://doi.org/10.22077/escs.2020.2226.1564

Khyber, J. A., Soomro, F., Sipio, W. D., Baloch, A. W., Soothar, J. K., Soothar, M. K. & Ali, Z. 2019. Evaluation of Bread Wheat (*Triticum aestivum* L.) Genotypes for Drought Tolerance through Selection Indices. Journal of Horticulture and Plant Research, 7: 40-52. doi: 10.1371/journal.pone.0283347

Lan, J. 1998. Comparison of evaluating methods for agronomic drought resistance in crops. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 7: 85-87. Doi: 10.3724/SP.J.1006.2012.00665

Laxa, M., Liebthal, M., Telman, W., Chibani, K. & Dietz, K. J. 2019. The Role of the Plant Antioxidant System in Drought Tolerance. Antioxidants, 8(94): 1-31. DOI: 10.3390/antiox8040094

Lin, C. S., Binns, M. R. & Lefkovitch, L. P. 1986. Stability analysis: where do we stand? Crop Science, 26: 894-900. https://doi.org/10.2135/cropsci1986.0011183X002600050012x

Moosavi, S., Yazdi Samadi, B., Naghavi, M., Zali, A., Dashti, H. & Pourshahbazi, A. 2008. Introduction of new indices to identify relative drought tolerance and resistance in wheat genotypes. Desert, 12: 165-178. DOI: 10.22059/jdesert.2008.27115

Moradi, A. 2017. Investigation of the genetic diversity of different genotypes of durum wheat using molecular markers and agricultural traits (morphology, physiology and phenology). Master's thesis. Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah. (In Persian). DOI: 10.22126/cbb.2022.8491.1024

Naderi, A., Majidi-Hervan, E., Hashemi-Dezfoli, A., Rezaei, A. & Nourmohammadi, G. 2000. Efficiency analysis of indices for tolerance to environmental stresses in field crops and introduction of a new index. Plant Seed Journal, 15: 390-402.

Naderi, N., Bavandpori, F., Farshadfar, E., & Farshadfar, M. 2020. Screening and Identification of Drought Tolerant Bread Wheat Landraces (*Triticum aestivum* L.). Journal of Crop Ecophysiology, 14 (2) 275-292. (In Persian). DOI: 10.30495/jcep.2020.676143

Nahas, L. D., Alsamman, A. M., Hamwieh, A., Al-Husein, N. & Lababidi, Gh. 2020. Characterization of EST-SSR markers in bread wheat EST related to drought tolerance

and functional analysis of SSR-containing unigenes. Highlights in Bioscience, 3:1-12. DOI:10.36462/H.BioSci.20203

Noorifarjam, Sh., Farshadfar, E. & Saeidi, M. 2013. Evaluation of drought tolerant genotypes in bread wheat using yield-based screening techniques. European Journal of Experimental Biology, 3 (1): 138-143. www.pelagiaresearchlibrary.com

Pour-Aboughadareh, A., Omidi, M., Etminan, A. & Mehrabi, A.A. 2018. The importance of wild wheat germplasm in breeding for resistance to abiotic stresses. Modern Genetics Journal, 51:489–504. (In Persian). https://www.magiran.com/p1808245

Ramirez-vallejo, P. and Kelly, J. D. 1998. Traits related to drought resistance in common bean. Euphytica, 99: 127-136.

Roostaei1, M., Rajabi, R., Jafarzadeh, J. & Mohammadi, R., 2022. Assessment of drought tolerance and grain yield stability of rainfed winter bread wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes. Crop Breeding Journal, 11 (1&2) 25-44. (In Persian). DOI: 10.22092/cbj.2022.359076.1075

Rossielli, A. & Hamblin, A. 1981. Theorical aspects of selection for stress and non-stress environment. Crop Science, 21: 1441-1446. https://doi.org/10.2135/cropsci1981.0011183X002100060033x

Sardouie-Nasab, S., Mohammadi-Nejad, G. & Nakhoda, B. 2014. Field Screening of Salinity Tolerance in Iranian Bread Wheat Lines. Crop Science, 54 (4): 1489-1496. https://doi.org/10.2135/cropsci2013.06.0359

Schneider, K. A., Rosales-Serena, F., Ibarra-Perez, B., Cacares-Enriguez, J. A., Acosta-Gallegos, R., Ramirec-Vallejo, N., Wassimi, N. & Kelly, J. P. 1997. Improvement common bean performance under drought stress. Crop Science, 37: 43- 50.

https://doi.org/10.2135/cropsci1997.0011183X003700010007x

Shanazari, M., Golkar, P., Mirmohammady Maibody, S. A. M. & Shahsavand-Hassani, H. 2021. Using Drought Tolerance Indices in Evaluation of Some Wheat, Triticale and Tritipyrum Genotypes. Journal of Crop Production and Processing, 10 (4) 45-68. [In Persian]. DOI: 10.47176/jcpp.10.4.35721

Singh, S., Khan, N. A., Nazar, R. & Anjum, N. A. 2008. Photosynthetic traits and activities of antioxidant enzymes in blackgram (*Vignamungo* L. *Hepper*) under cadmium stress. Am Journal Plant Physiology, 3: 25-32. DOI: 10.3923/ajpp.2008.25.32

Siosemardeh, A., Ahmadi, A., Poustini, K. & Mohammadi, V. 2006. Evaluation of drought resistance indices under various environmental conditions. Field Crops Research, 98: 222-229. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2006.02.001

Warschefsky, E., Penmetsa, R. V., Cook, D. R. & Von Wettberg, E. J. B. 2014. Back to the wilds: tapping evolutionary adaptations for resilient crops through systematic hybridization with crop wild relatives. American Journal Botany, 101: 1791-1800. DOI: 10.3732/ajb.1400116

Metsalu, T. & Vilo, J. 2015. ClustVis: a web tool for visualizing clustering of multivariate data using Principal Component Analysis and heatmap. Nucleic acids research, 43 (W1): W566-W570.

Tiwari, P. N., Tiwari, S., Sapre, S., Babbar, A., Tripathi, N., Tiwari, S., & Tripathi, M. K. 2023. Screening and selection of drought-tolerant high-yielding chickpea genotypes based on physio-biochemical selection indices and yield trials. Life, 13(6), 1405.

Kumar, P. K., Bellundagi, A., Krishna, H., Mallikarjuna, M. G., Thimmappa, R. K., Rai, N., & Prabhu, K. V. 2023. Development of bread wheat (*Triticum aestivum L*) variety HD3411 following marker-assisted backcross breeding for drought tolerance. Frontiers in Genetics, 14, 1046624