Plant Prod., 2026, 49(2), 321-337
https://plantproduction.scu.ac.ir/
**ISSN (P):** 2588-543X; **ISSN (E):** 2588-5979
**Doi:** 10.22055/ppd.2025.50056.2282
**Received:** 12 July 2024
**Accepted:** 19 October 2025

**Plant Productions**

**Research Article**

# Evaluation of drought tolerance indices to identify superior bread wheat genotypes under terminal irrigation cut-off conditions

**Saeed Bagherikia[1], Faramarz Sayyedi[1], Manoochehr Khodarahmi[2*], Habiballah Soughi[1]**

1- Department of Horticulture Crops Research, Golestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Gorgan, Iran
2- Seed and Plant Improvement Institute, AREEO, Karaj, Iran

**Citation:** Bagherikia, S., Sayyedi, F., Khodarahmi, M., & Soughi, H. (2026). Evaluation of drought tolerance indices to identify superior bread wheat genotypes under terminal irrigation cut-off conditions. *Plant Productions*, 49(2), 321- 337.

## Abstract

### Introduction

Terminal drought stress represents a major threat to wheat production in Iran. Developing cultivars with enhanced drought tolerance is therefore a key objective of many wheat breeding programs. In most regions of Iran, bread wheat cultivation is subjected to drought stress during the grain-filling period, one of the crop's most sensitive developmental stages. To assess crop responces, various indices have been developed, including the the tolerance index (TOL), mean productivity (MP), geometric mean productivity (GMP), harmonic mean (HM), stress tolerance index (STI), stress sensitivity index (SSI), yield index (YI), yield stability index (YSI) and relative stress index (RSI). The effectiveness of each index depends on the specific breeding objectives and the characteristics of the target environment.

### Materials and Methods

This study was conducted over two consecutive cropping seasons (2022-2023 and 2023-2024) at the Gonbad Agricultural Research Station. To evaluate thirty bread wheat lines and cultivars under terminal drought stress, two separate experiments were conducted in format of split plots design within a randomized complete block framwork, each with three replications. Two levels of irrigations [normal moisture and terminal drought stress] were assigned to the main plots, while the thirty genotypes were randomized in the subplots. Drought stress was imposed by withholding irrigation beginning at the full heading stage. Based on grain yield under normal (Yp) and stress (Ys) conditions, the following indices were calculated: mean productivity (MP), geometric mean productivity (GMP), harmonic mean (HM), stress tolerance index (STI), stress sensitivity index (SSI), yield index (YI),

* **Corresponding Author:** Manoochehr Khodarahmi
**E-mail:** khodarahmi_m@yahoo.com

© 2026 The Author(s). Published by Shahid Chamran University of Ahvaz. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited

tolerance index (TOL), relative stress index (RSI) and yield stability index (YSI). Data analysis was performed using iPASTIC and NTSYS software packages.

## Results and Discussion

The results of this study showed that the mean grain yield across all genotypes was 5.219 t $ha^{-1}$ under optimal irrigation and 4.129 t $ha^{-1}$ under terminal drought stress, corresponding to an approximately 21% reduction under stress conditions. Correlation analysis of drought tolerance indices identified mean productivity (MP), geometric mean productivity (GMP), harmonic mean (HM), and the stress tolerance index (STI) as the most reliable indicators for identifying drought-tolerant genotypes. Principal component analysis (PCA) showed that the first and second principal components accounted for 63.64% and 36.24% of the total variation, respectively. Furthermore, biplot analysis demonstrated that the majority of drought-tolerant genotypes were closely associated with the vectors representing these key tolerance indices. The combined use of a three-dimensional index plot and hierarchical cluster analysis classified genotypes 9, 11, 17, 18, 19, and 20 as tolerant to terminal drought stress, whereas genotypes 1, 6, 8, 12, 23, 25, 27, and 30 were identified as highly sensitive. These drought-tolerant genotypes represent valuable genetic resources for wheat breeding programs aimed at improving drought resilience. Their incorporation into future breeding efforts is expected to facilitate the development and eventual release of high-yielding, drought-tolerant cultivars for cultivation in terminal drought-prone environments.

## Conclusions

Correlation analysis of drought tolerance indices revealed that mean productivity (MP), geometric mean productivity (GMP), harmonic mean (HM), and stress tolerance index (STI) were the most suitable metrics for selecting drought-tolerant genotypes. Based on three-dimensional plotting, principal component analysis, and cluster analysis, genotypes 9, 11, 17, 18, 19, and 20 were identified as the most tolerant to terminal drought stress, whereas genotypes 1, 6, 8, 12, 23, 25, 27, and 30 were classified as the most sensitive.

**Keywords:** Biplot, Cluster analysis, Correlation analysis, Grain yield

**تولیدات گیاهی، ۱٤۰۵، ٤۹(۲)، ۳۲۱ – ۳۳۷**
https://plantproduction.scu.ac.ir/
**ISSN (P):** 2588-543X; **ISSN (E):** 2588-5979
**Doi:** 10.22055/ppd.2025.50056.2282
**تاریخ دریافت:** ۱۴۰۴/ ۰۴/ ۲۱
**تاریخ پذیرش:** ۱۴۰۴/ ۰۷/ ۲۷

تولیدات گیاهی
مقاله پژوهشی

# ارزیابی شاخص‌های تحمل به خشکی برای شناسایی ژنوتیپ‌های برتر گندم نان تحت شرایط قطع آبیاری انتهای فصل

**سعید باقری کیا[۱]، فرامرز سیدی[۱]، منوچهر خدارحمی[۲*]، حبیب اله سوقی[۱]**

۱- بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی گلستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، گرگان، ایران
۲- مؤسسهٔ تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران

## چکیده

**گندم نان به‌عنوان یکی از مهم‌ترین محصولات راهبردی، سهم قابل‌توجهی در تأمین غذای جمعیت و حفظ امنیت غذایی کشور دارد. با این حال، تولید پایدار این محصول به شدت تحت تأثیر تنش‌های محیطی، به‌ویژه خشکی انتهای فصل رشد، قرار می‌گیرد. اگرچه عملکرد بالا در شرایط تنش اغلب به‌عنوان معیاری از تحمل به خشکی در نظر گرفته می‌شود، اما به‌تنهایی معیار مناسبی برای ارزیابی این صفت نیست. در مقابل، پایداری عملکرد که بر پایهٔ مقایسه عملکرد ژنوتیپ‌ها در شرایط مطلوب و تنش رطوبتی ارزیابی می‌شود، شاخص دقیق‌تری برای شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل و بررسی واکنش آن‌ها به کمبود آب محسوب می شود. به‌منظور بررسی واکنش برخی ارقام و لاین‌های امیدبخش گندم نان به تنش خشکی انتهای فصل، این پژوهش طی دو سال زراعی متوالی (۱٤۰۱ تا ۱٤۰۳) در ایستگاه تحقیقات کشاورزی گنبد اجرا شد. در هر سال، آزمایش به‌صورت کرت‌های خرد شده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. دو سطح رطوبتی بدون تنش و تنش خشکی انتهای فصل در کرت‌های اصلی و ۳۰ ژنوتیپ گندم نان در کرت‌های فرعی قرار گرفتند. بر اساس مقادیر عملکرد دانه در شرایط بدون تنش (Yp) و تنش خشکی (Ys) شاخص‌های تحمل به خشکی شامل MP، GMP، HM، STI، SSI، YI، TOL، RSI و YSI محاسبه شدند. نتایج نشان داد تنش خشکی باعث کاهش معنی‌دار عملکرد دانه در ژنوتیپ‌ها شد به گونه‌ای که میانگین عملکرد دانه در شرایط بدون تنش و تنش خشکی به‌ترتیب ۵/۲۱۹ و ٤/۱۲۹ تن در هکتار بود. به عبارت دیگر، تنش خشکی در انتهای فصل باعث کاهش ۲۱ درصدی عملکرد دانه در مقایسه با شرایط بدون تنش گردید. بررسی ضرایب همبستگی بین شاخص‌های تحمل به خشکی نشان داد که شاخص‌های MP، GMP، HM و STI مناسب‌ترین شاخص‌ها برای گزینش ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی هستند. همچنین نتایج تجزیه به مؤلفه‌های اصلی نشان داد که سهم مؤلفه اول و دوم در تبیین تغییرات کل شاخص‌ها به ترتیب برابر با ٦۳/٦٤ و ۳٦/۲٤ درصد بود و در مجموع ۹۹/۸۸ درصد از تغییرات توسط این دو مؤلفه توجیه شدند. نمودار چند**

**نویسنده مسئول:** منوچهر خدارحمی
**رایانامه:** khodarahmi_m@yahoo.com

**متغیره بای‌پلات نشان داد که اغلب ژنوتیپ‌های متحمل به تنش خشکی در مجاورت بردارهای مربوط به شاخص‌های برتر قرار داشتند. بر اساس نمودارهای سه‌بعدی شاخص‌های برتر و نتایج تجزیه کلاستر، ژنوتیپ‌های شمارۀ ۱۱، ۱۹، ۲۰، ۱۷، ۱۸و ۹ به‌عنوان ژنوتیپ‌های متحمل به تنش خشکی انتهایی فصل شناسایی شدند؛ درحالی‌که ژنوتیپ‌های شمارۀ ۲۳، ٦، ۲۵، ۱۲، ۱، ۸، ۳۰ و ۲۷ به‌عنوان حساس‌ترین ژنوتیپ‌ها معرفی شدند. با توجه به این که ژنوتیپ‌های متحمل شناسایی‌شده عمدتاً در زمرۀ لاین‌های امیدبخش قرار دارند، انتظار می‌رود پس از ارزیابی جامع سایر صفات زراعی و ویژگی‌های مهم، از جمله مقاومت به بیماری‌های قارچی، برخی از این لاین‌ها به‌عنوان ارقام جدید برای کشت در مناطق مستعد تنش خشکی انتهای فصل معرفی شده و در اختیار کشاورزان قرار گیرند.**

**کلید واژه‌ها: بای پلات، تجزیه خوشه‌ای، تجزیه همبستگی، عملکرد دانه**

**مقدمه**

گندم نان (*Triticum aestivum* L.) به عنوان یکی از محصولات راهبردی، نقش مهمی در تأمین امنیت غذایی کشور ایفا می کند. با این حال، تولید آن به شدت تحت تأثیر عوامل محیطی، به‌ویژه تنش خشکی قرار دارد. توسعۀ ارقام متحمل به خشکی، یکی از اهداف اصلی برنامه‌های به‌نژادی محسوب می‌شود، زیرا در بسیاری از مناطق ایران، گندم نان در مراحل زایشی، به‌ویژه در مرحلۀ پر شدن دانه، با تنش‌های خشکی و گرمای انتهای فصل رشد مواجه می‌شود؛ مرحله‌ای که یکی از حساس‌ترین مراحل رشد گیاه نسبت به این تنش‌های محیطی محسوب می‌شود (Ghaffari and Jalal Kamali, 2013; Kianpour *et al.*, 2024; Jalilifar *et al.*, 2025).

در اقلیم‌های نیمه خشک و مناطقی که با کمبود رطوبت مواجه هستند، تولید محصولات کشاورزی با چالش‌های جدی روبه‌رو است. این محدودیت‌ها می‌توانند ناشی از کاهش دورۀ رویشی، کاهش ارتفاع بوته، کاهش تعداد پنجه‌های بارور، کاهش سطح برگ و یا تأخیر در گلدهی باشند. حتی در اقلیم‌های نسبتاً مرطوب نیز توزیع نامناسب بارندگی می‌تواند منجر به بروز دوره‌های خشکی، به‌ویژه در اواخر فصل رشد، و در نتیجه تحمیل تنش خشکی به گیاه شود (Farooq *et al.*, 2014).

برای ارزیابی واکنش گیاهان زراعی به انواع تنش‌ها، شاخص‌های متعددی توسعه یافته‌اند که در برنامه‌های به‌نژادی کاربرد گسترده‌ای دارند. پژوهشگران معتقدند که شناسایی شاخص‌های مؤثر در پایداری عملکرد در شرایط تنش، یکی از معیارهای کلیدی در افزایش کارایی اصلاح ارقام متحمل به خشکی است (Mohammadi, 2018). بر همین اساس، ارزیابی عملکرد ارقام هم در شرایط تنش و هم در شرایط بدون تنش، روشی کارآمد در شناسایی ارقام و ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی به شمار می‌رود (Asadi *et al.*, 2024). شاخص‌های گوناگونی برای سنجش واکنش ژنوتیپ‌ها معرفی شده‌اند (Srivastava *et al.*, 1987).

بسیاری از محققان، شاخص‌های بهره‌وری متوسط (MP)، بهره‌وری متوسط هندسی (GMP) و شاخص تحمل به تنش (STI) را به عنوان مؤثرترین شاخص‌ها برای شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی معرفی کرده‌اند (Saba *et al.*, 2001; Golabadi *et al.*, 2006; Murri *et al.*, 2013). همچنین میانگین هارمونیک (HM) به‌عنوان شاخصی دیگر برای ارزیابی تحمل به

تنش معرفی شده است (Farshadfar and Amiri, 2017). در بسیاری از پژوهش‌ها، GMP و STI مناسب‌ترین معیارها برای انتخاب ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی شناخته شده‌اند (Farayedy, 2004; Kargar *et al.*, 2004). ساندری و همکاران (Sundari *et al.*, 2005) نیز علاوه بر GMP و STI، شاخص MP را به عنوان یکی از شاخص‌های برتر برای تعیین تحمل به تنش در ارقام معرفی کرده‌اند. همچنین، همبستگی مثبت و معنی‌داری بین عملکرد در شرایط بدون تنش (Yp) و عملکرد در شرایط تنش (Ys) با شاخص‌های MP، GMP و STI در گندم گزارش شده است. این یافته‌ها، شاخص‌های MP، GMP و STI را مناسب‌ترین ابزارها برای ارزیابی و شناسایی ارقام گندم تحت تنش کمبود آب در برنامه‌های به‌نژادی دانسته‌اند (Taghian and Abo-Elwafa, 2003).

در مطالعات متعددی، با استفاده از شاخص‌های تحمل به تنش، متحمل‌ترین و حساس‌ترین ژنوتیپ‌های گندم در برابر تنش خشکی شناسایی شده‌اند (Naghavi *et al.*, 2016; Arab *et al.*, 2021; Mahdavi *et al.*, 2023; Lal *et al.*, 2024; Asadi *et al.*, 2024; Gaikwad *et al.*, 2025). برای مثال، نقوی و همکاران (Naghavi *et al.*, 2016) با اعمال تنش خشکی در مراحل قبل و پس از آبستنی، گزارش کردند که از میان ۲۰ رقم گندم نان مورد بررسی، ارقام کویر، نیک‌نژاد، دریا و مغان ۳، بیشترین میزان تحمل را به خشکی نشان دادند. در مطالعه‌ای دیگر با بررسی ۱۵ رقم تجاری و لاین امیدبخش گندم، لاین URBWYT4 به عنوان متحمل‌ترین ژنوتیپ در برابر تنش خشکی معرفی شد (Mahdavi *et al.*, 2023). همچنین، در پژوهشی ۱۲۲ لاین پاکوتاه گندم تحت تنش‌های خشکی و گرمای انتهای فصل مورد بررسی قرار گرفتند و ژنوتیپ TS49 به عنوان متحمل‌ترین ژنوتیپ به هر دو نوع تنش شناخته شد (Gaikwad *et al.*, 2025).

در استان گلستان، بخش قابل توجهی از ارقام گندم نان که عمدتاً برای شرایط آبیاری کامل اصلاح و معرفی شده‌اند، در مزارعی با محدودیت آب یا به‌صورت دیم کشت می‌شوند. این در حالی است که فرآیند انتخاب و معرفی این ارقام در برنامه‌های به‌نژادی، عمدتاً تحت شرایط بدون تنش رطوبتی انجام گرفته است. با توجه به تفاوت ژنتیکی ژنوتیپ‌های گندم از نظر تحمل به خشکی، پژوهش حاضر با هدف ارزیابی عملکرد ارقام تجاری و لاین‌های امیدبخش گندم نان در شرایط قطع آبیاری از مرحله ظهور سنبله و شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل، بر اساس شاخص‌های تحمل به خشکی، در منطقه گنبد اجرا شد.

## مواد و روش‌ها

این پژوهش طی دو فصل زراعی متوالی (۱۴۰۲-۱۴۰۱ و ۱۴۰۳-۱۴۰۲) در ایستگاه تحقیقاتی کشاورزی گنبد اجرا گردید. این ایستگاه واقع در ۵ کیلومتری شرق شهرستان گنبد، در عرض جغرافیایی ۳۷ درجه و ۱۶ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۵ درجه و ۱۳ دقیقه شرقی قرار دارد.

مواد گیاهی مورد استفاده در این پژوهش، ۳۰ ژنوتیپ گندم نان بود که شامل ۵ رقم رایج گندم آبی در استان گلستان و ۲۵ لاین امیدبخش انتخاب شده از برنامه‌های به نژادی ویژهٔ اقلیم گرم و مرطوب شمال کشور بودند. این لاین‌های امیدبخش بر اساس نتایج آزمایش‌های سازگاری انجام شده طی سال‌های ۱۳۹۴ تا ۱۴۰۰ در ایستگاه‌های تحقیقاتی اقلیم گرم و مرطوب (گرگان، گنبد، ساری و مغان) گزینش شدند.

شجره لاین‌ها و ارقام مورد مطالعه در جدول ۱ ارائه شده است.

این پژوهش به‌صورت کرت‌های خرد شده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. دو سطح رطوبتی شامل بدون تنش و تنش خشکی آخر فصل در کرت‌های اصلی و ۳۰ ژنوتیپ گندم نان در کرت‌های فرعی قرار گرفتند. هر کرت به عرض ۱/۲ متر و طول ۴/۶۶ متر بود و کشت با استفاده از ماشین کاشت آزمایشی انجام شد. میزان بذر مورد استفاده بر اساس تراکم ۳۵۰ دانه در متر مربع و با توجه به وزن هزار دانه هر ژنوتیپ محاسبه گردید. مقدار کودهای شیمیایی مصرفی بر اساس نتایج آزمون خاک مزرعه (جدول ۲) تعیین گردید. بر این اساس، ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار کود سولفات پتاسیم، ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار کود سوپر فسفات تریپل، ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار کود اوره (یک بار به‌صورت پایه و سه بار به صورت سرک) و ۳۰ کیلوگرم در هکتار سولفات روی استفاده شد.

کنترل شیمیایی علف‌های هرز باریک برگ و پهن برگ با استفاده از علف‌کش تیفیس به نسبت ۳۵ گرم در هکتار انجام شد. سایر عملیات داشت به طور یکسان برای همهٔ تیمارها در طول دورهٔ رشد انجام شد. در صورت عدم وجود بارندگی کافی برای سبز شدن بذور، اولین آبیاری انجام می‌شد. برای اعمال تنش خشکی، آبیاری از مرحلهٔ ظهور سنبله به طور کامل قطع گردید. با توجه به تفاوت میزان بارندگی در دو سال اجرای آزمایش، در سال اول دو نوبت و در سال دوم یک نوبت آبیاری تکمیلی انجام شد. به عبارتی شدت تنش خشکی در سال اول بیشتر از سال دوم بود. در پایان هر فصل زراعی، برداشت محصول با استفاده از کمباین آزمایشی انجام شد. مساحت برداشت هر کرت ۴/۸ مترمربع (۱/۲ متر عرض و ۴ متر طول) بود و عملکرد هر کرت به صورت تن در هکتار گزارش شد.

به منظور محاسبهٔ شاخص های تحمل به خشکی، از میانگین داده‌های عملکرد دانه در دو شرایط بدون تنش (Yp) و شرایط تنش خشکی (Ys) طی دو سال زراعی بهره گرفته شد. شاخص‌های مورد بررسی شامل شاخص تحمل (TOL)، بهره‌وری متوسط (MP)، بهره‌وری متوسط هندسی (GMP)، میانگین هارمونیک (HM)، شاخص تحمل به تنش (STI)، شاخص حساسیت به تنش (SSI)، شاخص عملکرد (YI)، شاخص ثبات عملکرد (YSI) و شاخص تنش نسبی (RSI) بودند . فرمول‌های محاسبه و منابع مربوط به هر یک در جدول ۳ ارائه شده است.

محاسبات مربوط به شاخص‌های تحمل به خشکی، تحلیل همبستگی بین متغیرها، تجزیه به مؤلفه‌های اصلی، و رسم نمودارهای سه‌بعدی و بای‌پلات با استفاده از توابع موجود در نرم‌افزار برخط محاسبه شاخص‌های مربوط به تنش‌های غیرزیستی (iPASTIC) انجام شد (Pour-Aboughadareh *et al*., 2019). علاوه بر این، برای گروه‌بندی ژنوتیپ‌ها از تجزیه خوشه‌ای از نرم‌افزار آماری NTSYS و به روش UPGMA استفاده شد.

**جدول ۱- مشخصات لاین‌های امید بخش و ارقام گندم نان**

**Table 1. Characteristics of promising bread wheat lines and cultivars**

| NO. | Line/Cltivar | Pedigree |
|---|---|---|
| 1 | N-94-8 | PFAU/SERI.1B//AMAD/3/WAXWING*2/4/TECUE #1 |
| 2 | N-94-12 | WBLL1*2/TUKURU*2/4/CROC_1/AE.SQUARROSA |
| 3 | N-95-6 | KACHU/BECARD//WBLL1*2/BRAMBLING |
| 4 | N-95-7 | SUP152*2/TECUE #1 |
| 5 | N-95-15 | BECARD/3/PASTOR//MUNIA/ALTAR 84 |
| 6 | N-96-5 | QUAIU*2/KINDE |
| 7 | N-96-15 | MERCATO/4/FRAME//MILAN/KAUZ/3/PASTOR/5/WHEAR/SOKOLL |
| 8 | N-97-7 | MERCATO/3/1447/PASTOR//KRICHAUFF/4/BAVIS |
| 9 | N-97-8 | ND643/2*WAXWING/5/BABAX/LR42//BABAX*2/4/SNI |
| 10 | N-97-18 | SUP152/7/TUKURU//BAV92/RAYON/6/NG8201/KAUZ/4/SHA7 |
| 11 | N-97-20 | PASTOR//HXL7573/2*BAU/3/SOKOLL/WBLL1/4/HUW234 |
| 12 | N-97-22 | BECARD*2/PFUNYE #1 |
| 13 | N-98-8 | KACHU/SAUAL*2/3/TACUPETO F2001/BRAMBLI |
| 14 | N-98-14 | KACHU/SAUAL*2/3/TACUPETO F2001/BRAMBLING |
| 15 | N-98-16 | KACHU/SAUAL/4/VARIS/MISR2, EGY/3/FRET2 |
| 16 | N-98-18 | BAJ #1/ALTIGO |
| 17 | N-98-20 | SOKOLL/3/PASTOR//HXL7573/2*BAU*2/4/GLADIUS |
| 18 | N-99-4 | KACHU//WBLL1*2/BRAMBLING/3/KACHU/KIRITATI |
| 19 | N-99-6 | KACHU//WBLL1*2/BRAMBLING*2/3/KACHU/KIRITATI |
| 20 | N-99-15 | NELOKI//SOKOLL/EXCALIBUR |
| 21 | N-99-17 | NELOKI//SOKOLL/EXCALIBUR |
| 22 | N-99-19 | KACHU #1/3/C80.1/3*BATAVIA//2*WBLL1/4/KACHU/8/TACUPETO F2001 |
| 23 | DHN-99-24 | Pishgam/Kalateh/6 /NANJING2149/KAUZ/4/JUP/ALD"S". |
| 24 | DHN-99-29 | Mv17/2*Mehregan |
| 25 | DHN-99-30 | Kalateh/N-92-19/4/ATRAK//ATTILA. |
| 26 | Taktaz | SAUAL/3/MILAN/S87230//BAV92 |
| 27 | Tirgan | PFAU/MILAN/5/CHEN/AEGILOPS SQUARROSA (TAUS)//BCN/3/ VEE#7/BOW/4/PASTOR |
| 28 | Araz | VOROBE |
| 29 | Arman | PBW343/TONI//TROST/3/SOVA |
| 30 | Kalateh | MILAN/S87230//BABAX |

**جدول ۲- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعهٔ ایستگاه تحقیقات کشاورزی گنبد**

**Table 2. Soil physical and chemical characteristics in Gonbad agricultural research station**

| Depth (cm) | Ec ($dS.m^{-1}$) | Saturation percentage | Organic matter (%) | pH | Available Phosphorus (ppm) | Available Potassium (ppm) | Total N (%) | T.N.V (%) | Clay (%) | Silt (%) | Sand (%) | Soil texture |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0-30 | 1.7 | 43.6 | 1.6 | 7.5 | 9.6 | 482 | 0.16 | 26 | 30 | 56 | 15 | Silty-Loam |

**جدول ۳- فرمول محاسبهٔ شاخص‌های تحمل به خشکی**

**Table 4. Formulas for the calculated drought tolerance indices**

| index | Abbreviation | Formula | Reference |
|---|---|---|---|
| Tolerance index | TOL | $Y_P - Y_S$ | Rosielle and Hamblin (1981) |
| Mean Productivity | MP | $\frac{YP + YS}{2}$ | Rosielle and Hamblin (1981) |
| Geometric Mean Productivity | GMP | $\sqrt{YS * YS}$ | Fernandez (1992) |
| Mean Harmonic | HM | $\frac{2(YP * YS)}{(YS + YP)}$ | Bidinger *et al.*, (1987) |
| Stress Tolerance Index | STI | $\frac{YS * YP}{(\bar{Y}P)^2}$ | Fernandez (1992) |
| Stress Sensitivity Index | SSI | $\frac{1 - (\frac{YS}{YP})}{1 - (\frac{\bar{Y}S}{\bar{Y}P})}$ | Fischer and Maurer (1978) |
| Yield Index | YI | $\frac{YS}{\bar{Y}S}$ | Gavuzzi *et al.*, (1997) |
| Yield Stability Index | YSI | $\frac{YS}{YP}$ | Bouslama and Schapaugh (1984) |
| Relative Stress Index | RSI | $RSI = \frac{(\frac{YS}{YP})}{(\frac{\bar{Y}S}{\bar{Y}P})}$ | Fischer and Wood (1979) |

## نتایج و بحث

### تجزیه واریانس مرکب

بر اساس نتایج تجزیهٔ واریانس مرکب، اثر ساده سال در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار بود (جدول ۴)؛ به‌گونه‌ای که میانگین عملکرد دانه ژنوتیپ‌ها در سال دوم بیشتر از سال اول بود. همچنین اثر ساده آبیاری نشان داد که تنش خشکی سبب کاهش معنی‌دار عملکرد دانه ژنوتیپ‌ها در سطح احتمال یک درصد شد. میانگین عملکرد دانه در شرایط بدون تنش ۵/۲۱۹ تن در هکتار و در شرایط تنش خشکی انتهای فصل ۴/۱۲۹ تن در هکتار بود که نشان‌دهندهٔ کاهش ۲۱ درصدی در شرایط تنش نسبت به شرایط بدون تنش بود (جدول ۵). اثر سادهٔ ژنوتیپ و برهمکنش ژنوتیپ × سال نیز دارای اختلاف معنی‌دار آماری در سطح احتمال یک درصد بود (جدول ۴). در شرایط بدون تنش، ژنوتیپ‌های شماره ۱۱، ۱۹، ۱۸، ۹ و ۲۰ بالاترین عملکرد دانه را به‌خود اختصاص دادند، در حالی که کمترین عملکرد مربوط به ژنوتیپ‌های ۲۳، ۶، ۱۶ و ۲۵ بود. در مقابل، در شرایط تنش خشکی انتهای فصل، ژنوتیپ‌های ۱۱، ۱۷، ۲۰، ۲ و ۱۵ بهترین عملکرد را از خود نشان دادند و ژنوتیپ‌های ۲۳، ۲۵، ۲۷ و ۲۸ کمترین میزان عملکرد را داشتند (جدول ۵). شایان ذکر است که عملکرد بالا در شرایط تنش صرفاً معیار مناسبی برای ارزیابی تحمل به خشکی محسوب نمی‌شود؛ بلکه پایداری عملکرد، که از مقایسهٔ عملکرد ژنوتیپ‌ها در هر دو شرایط بدون تنش و تنش حاصل می شود، شاخص معتبرتری برای شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی محسوب می‌شود.

در برنامه‌های به‌نژادی، این رویکرد که گزینش ژنوتیپ‌ها هم در شرایط تنش و هم در شرایط بدون تنش صورت گیرد، منجر به تجمع آلل‌های مطلوب و در نتیجه، انتخاب ژنوتیپ‌های با عملکرد بالاتر و پایداری بیشتر خواهد شد (Sallam *et al.*, 2019). سایر برهمکنش‌ها شامل ژنوتیپ × آبیاری و ژنوتیپ × سال × آبیاری از نظر آماری معنی‌دار نبودند.

**جدول ٤- تجزیه واریانس مرکب عملکرد دانه ۳۰ ژنوتیپ گندم نان تحت دو شرایط بدون تنش و تنش خشکی**

**Table 4. Combined analysis of variance for grain yield of 30 bread wheat genotypes under normal and drought stress conditions**

| SOV | DF | Mean Squares |
|---|---|---|
| Year | 1 | 53.01* |
| Erorr (a) | 4 | 6.59 |
| Irrigation | 1 | 64.07** |
| Year×Irrigation | 1 | 15.00* |
| Erorr (b) | 2 | 0.54 |
| Genotype | 29 | 1.26** |
| Genotype×Year | 29 | 1.55** |
| Genotype×Irrigation | 29 | 0.34ns |
| Genotype×Year×Irrigation | 29 | 0.31ns |
| Erorr (c) | 174 | 0.37 |
| CV (%) | | 14.12 |

**جدول ٥- مقادیر شاخص‌های تحمل تحت تنش خشکی انتهای فصل در ژنوتیپ‌های گندم**

**Table 5. The values of drought tolerance indices under terminal drought stress in wheat genotypes**

| Genotype | Yp | Ys | RC | TOL | MP | GMP | HM | SSI | STI | YI | YSI | RSI |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| G1 | 4.681 | 3.900 | 16.68 | 0.78 | 4.29 | 4.27 | 4.25 | 0.80 | 0.67 | 0.94 | 0.83 | 1.05 |
| G2 | 4.786 | 4.446 | 7.10 | 0.34 | 4.62 | 4.61 | 4.61 | 0.34 | 0.78 | 1.08 | 0.93 | 1.17 |
| G3 | 5.475 | 4.158 | 24.05 | 1.32 | 4.82 | 4.77 | 4.73 | 1.15 | 0.84 | 1.01 | 0.76 | 0.96 |
| G4 | 5.607 | 4.135 | 26.25 | 1.47 | 4.87 | 4.82 | 4.76 | 1.26 | 0.85 | 1.00 | 0.74 | 0.93 |
| G5 | 5.570 | 4.217 | 24.29 | 1.35 | 4.89 | 4.85 | 4.80 | 1.16 | 0.86 | 1.02 | 0.76 | 0.96 |
| G6 | 4.433 | 3.793 | 14.44 | 0.64 | 4.11 | 4.10 | 4.09 | 0.69 | 0.62 | 0.92 | 0.86 | 1.08 |
| G7 | 5.515 | 4.122 | 25.26 | 1.39 | 4.82 | 4.77 | 4.72 | 1.21 | 0.83 | 1.00 | 0.75 | 0.94 |
| G8 | 4.826 | 3.947 | 18.21 | 0.88 | 4.39 | 4.36 | 4.34 | 0.87 | 0.70 | 0.96 | 0.82 | 1.03 |
| G9 | 5.894 | 4.419 | 25.03 | 1.48 | 5.16 | 5.10 | 5.05 | 1.20 | 0.96 | 1.07 | 0.75 | 0.95 |
| G10 | 5.604 | 4.100 | 26.84 | 1.50 | 4.85 | 4.79 | 4.74 | 1.28 | 0.84 | 0.99 | 0.73 | 0.92 |
| G11 | 6.248 | 4.814 | 22.95 | 1.43 | 5.53 | 5.48 | 5.44 | 1.10 | 1.10 | 1.17 | 0.77 | 0.97 |
| G12 | 4.756 | 3.750 | 21.15 | 1.01 | 4.25 | 4.22 | 4.19 | 1.01 | 0.65 | 0.91 | 0.79 | 1.00 |
| G13 | 5.131 | 4.106 | 19.98 | 1.03 | 4.62 | 4.59 | 4.56 | 0.96 | 0.77 | 0.99 | 0.80 | 1.01 |
| G14 | 5.645 | 4.178 | 25.99 | 1.47 | 4.91 | 4.86 | 4.80 | 1.24 | 0.87 | 1.01 | 0.74 | 0.94 |
| G15 | 5.166 | 4.445 | 13.96 | 0.72 | 4.81 | 4.79 | 4.78 | 0.67 | 0.84 | 1.08 | 0.86 | 1.09 |
| G16 | 4.501 | 4.342 | 3.53 | 0.16 | 4.42 | 4.42 | 4.42 | 0.17 | 0.72 | 1.05 | 0.96 | 1.22 |
| G17 | 5.619 | 4.730 | 15.82 | 0.89 | 5.17 | 5.16 | 5.14 | 0.76 | 0.98 | 1.15 | 0.84 | 1.06 |
| G18 | 6.030 | 4.102 | 31.97 | 1.93 | 5.07 | 4.97 | 4.88 | 1.53 | 0.91 | 0.99 | 0.68 | 0.86 |
| G19 | 6.247 | 4.238 | 32.16 | 2.01 | 5.24 | 5.15 | 5.05 | 1.54 | 0.97 | 1.03 | 0.68 | 0.86 |
| G20 | 5.801 | 4.665 | 19.58 | 1.14 | 5.23 | 5.20 | 5.17 | 0.94 | 0.99 | 1.13 | 0.80 | 1.02 |
| G21 | 5.456 | 4.308 | 21.04 | 1.15 | 4.88 | 4.85 | 4.81 | 1.01 | 0.86 | 1.04 | 0.79 | 1.00 |
| G22 | 4.871 | 4.297 | 11.78 | 0.57 | 4.58 | 4.58 | 4.57 | 0.56 | 0.77 | 1.04 | 0.88 | 1.12 |
| G23 | 4.309 | 3.264 | 24.25 | 1.05 | 3.79 | 3.75 | 3.71 | 1.16 | 0.52 | 0.79 | 0.76 | 0.96 |
| G24 | 5.007 | 4.117 | 17.78 | 0.89 | 4.56 | 4.54 | 4.52 | 0.85 | 0.76 | 1.00 | 0.82 | 1.04 |
| G25 | 4.517 | 3.594 | 20.43 | 0.92 | 4.06 | 4.03 | 4.00 | 0.98 | 0.60 | 0.87 | 0.80 | 1.01 |
| G26 | 5.009 | 4.153 | 17.09 | 0.86 | 4.58 | 4.56 | 4.54 | 0.82 | 0.76 | 1.01 | 0.83 | 1.05 |
| G27 | 4.759 | 3.649 | 23.32 | 1.11 | 4.20 | 4.17 | 4.13 | 1.12 | 0.64 | 0.88 | 0.77 | 0.97 |
| G28 | 5.133 | 3.743 | 27.08 | 1.39 | 4.44 | 4.38 | 4.33 | 1.30 | 0.71 | 0.91 | 0.73 | 0.92 |
| G29 | 5.005 | 4.206 | 15.96 | 0.80 | 4.61 | 4.59 | 4.57 | 0.76 | 0.77 | 1.02 | 0.84 | 1.06 |
| G30 | 4.968 | 3.917 | 21.16 | 1.05 | 4.44 | 4.41 | 4.38 | 1.01 | 0.71 | 0.95 | 0.79 | 1.00 |
| Mean | 5.219 | 4.129 | 20.51 | | | | | | | | | |

## شاخص‌های تحمل به خشکی

بررسی شاخص‌های تحمل به تنش نشان داد که کمترین مقادیر شاخص‌های TOL، SSI، YSI و RSI مربوط به متحمل‌ترین ژنوتیپ‌ها است، در حالی‌که در شاخص‌های MP، GMP، HM، STI و YI مقادیر بالا بیانگر ژنوتیپ‌های برتر از نظر تحمل به تنش خشکی هستند (Pour-Aboughadareh *et al*., 2019). بر این اساس، نتایج حاصل از شاخص‌های تحمل به تنش نشان داد که بر اساس

شاخص‌های TOL، SSI، YSI و RSI، ژنوتیپ‌های شماره ۱۶، ۲، ۲۲، ۶ و ۱۵ متحمل‌ترین ژنوتیپ‌ها و ژنوتیپ‌های ۱۹، ۱۸ و ۱۰ حساس‌ترین ژنوتیپ‌ها نسبت به تنش خشکی بودند. از آنجایی که مقادیر پایین‌تر شاخص‌های TOL و SSI بیانگر تفاوت کمتر عملکرد بین شرایط بدون تنش و تنش است، این شاخص‌ها بیشتر ارزش فیزیولوژیکی دارند؛ به عبارت دیگر، ارقامی با عملکرد پایین در هر دو شرایط بدون تنش و تنش، از دیدگاه زراعی مطلوب محسوب نمی‌شوند. در مقابل، بر اساس شاخص‌های MP، GMP، HM، STI و YI، ژنوتیپ‌های شماره ۱۱، ۱۹، ۲۰، ۱۷، ۹ و ۱۸ به‌عنوان متحمل‌ترین ژنوتیپ‌ها و ژنوتیپ‌های ۲۳، ۲۵، ۶، ۲۷ و ۱۲ به‌عنوان حساس‌ترین ژنوتیپ‌ها نسبت به تنش خشکی شناسایی شدند (جدول ۵).

نتایج پژوهش‌های پیشین نیز این یافته‌ها را تأیید می‌کنند. مهدوی و همکاران (Mahdavi *et al.*, 2023) با مطالعهٔ ۱۵ رقم تجاری و لاین امیدبخش گزارش کردند که لاین URBWYT4 با بالاترین مقادیر شاخص‌های MP، GMP، HM و STI، به‌عنوان متحمل‌ترین ژنوتیپ نسبت به تنش خشکی شناخته شد. اسدی و همکاران (Asadi *et al.*, 2024) در بررسی واکنش ۲۰ ژنوتیپ گندم مربوط به اقلیم سرد کشور تحت تنش انتهای فصل گزارش کردند که تنش خشکی باعث کاهش ۲۵ درصدی عملکرد دانه شد و پنج ژنوتیپ متحمل را بر اساس شاخص‌های تحمل به تنش شناسایی کردند.

## ضرایب همبستگی شاخص‌های تحمل به خشکی

شناسایی ارقام متحمل به تنش، با استفاده از شاخص‌های متعددی که بر پایهٔ روابط ریاضی بین عملکرد در شرایط تنش و بدون تنش تعریف شده‌اند، امکان‌پذیر است. وجود همبستگی معنی‌دار بین این شاخص‌ها می‌تواند مبنایی قوی برای گزینش ژنوتیپ‌های متحمل به تنش فراهم آورد (Zebarjadi *et al.*, 2016). از سوی دیگر، شاخص‌هایی که با عملکرد دانه در هر دو شرایط تنش و بدون تنش همبستگی بالایی نشان می‌دهند، به عنوان بهترین شاخص‌ها برای غربال‌گری شناخته می‌شوند. این شاخص‌ها قادرند ژنوتیپ‌هایی با عملکرد بالا در هر دو محیط را شناسایی کرده و بدین ترتیب، ابزاری قابل اعتماد برای تخمین پایداری عملکرد فراهم آورند (Sio-Se Mardeh *et al.*, 2006).

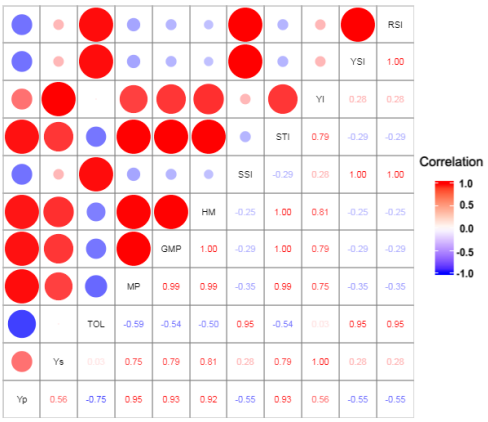
برای بررسی روابط بین عملکرد دانه و شاخص‌های تحمل به تنش، نتایج آزمون ضرایب همبستگی اسپیرمن محاسبه و مورد تحلیل قرار گرفت (شکل ۱). در روش همبستگی اسپیرمن، مقادیر به رتبه تبدیل می‌شوند و همبستگی بر اساس اختلاف رتبه‌ها محاسبه می‌گردد. یافته‌ها حاکی از آن بود که در هر دو شرایط رطوبتی، عملکرد دانه بیشترین ضرایب همبستگی مثبت و معنی‌دار را با شاخص‌های HM، GMP، MP و STI داشت. علاوه بر این، بین شاخص‌های MP، GMP، HM و STI نیز همبستگی مثبت و معنی‌داری مشاهده گردید، که این موضوع بر قابلیت آن‌ها در شناسایی ژنوتیپ‌های برتر تأکید می‌کند (شکل ۱).

یافته‌های حاضر مبنی بر برتری شاخص‌های MP، GMP، HM و STI در ارزیابی تحمل به تنش، با نتایج تحقیقات پیشین همخوانی دارد. به طوری که نقوی و همکاران (Naghavi *et al.*, 2016) نیز گزارش نمودند که شاخص‌های MP، GMP، HM و STI به دلیل داشتن همبستگی مثبت و معنی‌دار با عملکرد دانه در هر دو شرایط تنش و بدون تنش، از بهترین شاخص‌ها برای انتخاب ژنوتیپ‌های متحمل گندم به تنش آخر فصل به شمار می‌روند. شایان ذکر است، برتری این شاخص‌ها در شناسایی ژنوتیپ‌های گندم متحمل به تنش‌های خشکی (Golabadi *et al.*, 2006)، شوری (Khojamli *et al.*, 2021) و گرما (Omidi *et al.*, 2015) توسط سایر پژوهشگران اثبات شده است.

## نمودار سه‌بعدی بر اساس شاخص STI

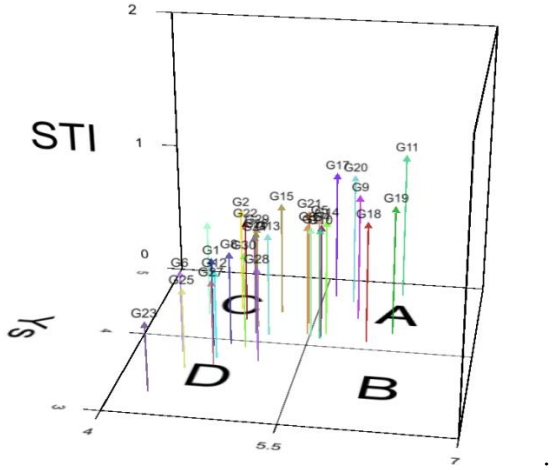
به منظور تعیین ارقام متحمل به تنش خشکی، پس از شناسایی بهترین شاخص‌های تحمل به خشکی که دارای بالاترین همبستگی مثبت با عملکرد دانه در هر دو شرایط بدون تنش و تنش بودند، از نمودار سه‌بعدی شاخص‌های گزینش‌شده استفاده شد (شکل ۲). نمودارهای سه‌بعدی، ژنوتیپ‌ها را به چهار گروه A، B، C و D تقسیم می‌کنند. شاخص ایده‌آل، شاخصی است که بتواند گروه A را به طور مؤثر از سایر گروه‌ها متمایز کند (Fernandez, 1992). گروه

A، ژنوتیپ‌هایی را گزینش می‌کند که در هر دو محیط بدون تنش و تنش دارای عملکرد بالا، گروه B دارای عملکرد بالا در شرایط بدون تنش، گروه C دارای عملکرد بالا در شرایط تنش و گروه D دارای عملکرد پایین در هر دو شرایط هستند (Basafa and Taherian, 2010; Moshattati *et al.*, 2013). نمودارهای سه بعدی عملکرد دانه در شرایط بدون تنش و تنش خشکی در مقابل شاخص‌های تحمل به تنش نشان دادند که ژنوتیپ‌های ۱۱، ۱۹، ۲۰، ۱۸، ۱۷، ۹، ۴، ۱۴، ۱۰، ۵ و ۲۱) در گروه A و ژنوتیپ‌های ۲۳، ۶، ۲۵، ۱۲، ۱، ۸، ۳۰، ۲۷ و ۲۸ در گروه D قرار داشتند. سایر ژنوتیپ‌ها هم در گروه C قرار گرفتند (شکل ۲) که نشان دهنده عملکرد قابل قبول این ژنوتیپ‌ها در شرایط تنش است که ناشی از سازگاری مناسب و پتانسیل بالای عملکرد این ژنوتیپ‌ها است. نکته قابل توجه این بود که هیچ ژنوتیپی در گروه B قرار نگرفت؛ که این موضوع نشان می‌دهد که هیچ ژنوتیپی وجود ندارد که فقط در شرایط بدون تنش عملکرد بالایی داشته باشد.




**شکل ۱- همبستگی اسپیرمن بین شاخص‌های تحمل به تنش در صفت عملکرد دانه تحت شرایط تنش خشکی انتهای فصل**

**Figure 1. Spearman correlation coefficients between drought tolerance indices for grian yield under terminal drought stress**



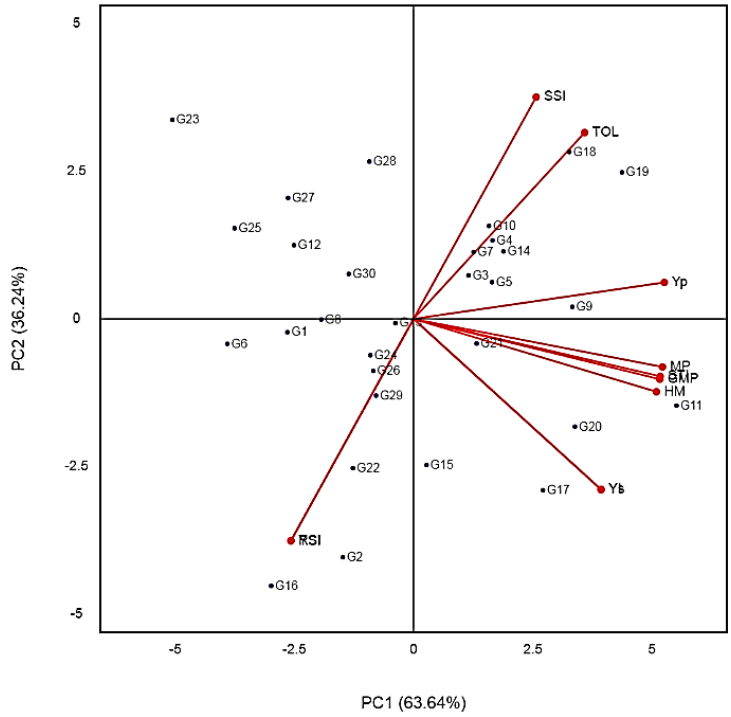

**شکل ۲- نمودار سه‌بعدی عملکرد دانه در شرایط بدون تنش و تنش خشکی انتهای فصل با شاخص STI**

**Figure 2. Three-dimensional plot of grin yield traits under terminal drought stress conditions with STI index**

## تجزیه به مؤلفه‌های اصلی بر اساس مقادیر شاخص‌های تحمل به تنش

نتایج تجزیه به مؤلفه‌های اصلی نشان داد که سهم مؤلفه اول و دوم در تبیین تغییرات کل شاخص‌ها به

ترتیب برابر با ۶۳/۶۴ و ۳۶/۲۴ درصد بود. از آنجایی که این دو مؤلفه مستقل از یکدیگر هستند، می‌توان تغییرات آن‌ها را به‌صورت عمود بر هم نمایش داد. در نمودار حاصل از این تجزیه (شکل ۳)، هر ژنوتیپ به صورت یک نقطه مشخص در سطح نمودار قرار می‌گیرد و موقعیت آن بر اساس مقادیر این دو مؤلفه تعیین می‌شود. در مجموع، دو مؤلفه اول ۹۹/۸۸ درصد از تغییرات موجود در داده‌ها را توجیه می‌کنند که نشان‌دهندهٔ کفایت این دو مؤلفه برای تحلیل و بررسی تغییرات ژنوتیپ‌ها است. عرب و همکاران (Arab *et al.*, 2021). با مطالعه شاخص های تحمل به تنش در ۴۱ لاین گندم نان گزارش کردند که دو مولفه اول ۹۹/۷۰ درصد تغییرات را توجیه نمود. مؤلفهٔ اصلی اول دارای همبستگی مثبت و بالا با عملکرد در شرایط بدون تنش (Yp) و شاخص‌های MP، GMP و STI بود، لذا این مؤلفه، نشان‌دهندهٔ تحمل به تنش است. از آنجا که مقادیر بالای این شاخص‌ها مطلوب تلقی می‌شوند، هرچه مقدار شاخص‌های مربوط به یک ژنوتیپ بالاتر باشد، بیانگر عملکرد بالاتر و تحمل بیشتر آن ژنوتیپ نسبت به خشکی است. در مؤلفه دوم نیز شاخص‌های TOL، SSI بالاترین مقادیر را داشتند و ازآنجایی‌که مقادیر پایین این شاخص‌ها مورد توجه است، لذا این مؤلفه، بر حساسیت به تنش تأکید داشته و هرچه مقدار این مولفه بالاتر باشد، ژنوتیپ حساس‌تر به تنش خشکی خواهد بود (Zebarjadi *et al.*, 2016). توزیع ژنوتیپ‌ها روی بای‌پلات (شکل ۳) نشان‌دهندهٔ وجود تنوع در واکنش به تنش خشکی انتهای فصل بین ژنوتیپ‌ها بود (Asadi *et al.*, 2024). شاخص‌های MP، GMP، HM و STI دارای زوایای تند نسبت به هم در شکل بای‌پلات بودند که این نشان‌دهندهٔ همبستگی بالای این شاخص‌ها با یکدیگر بود (Zebarjadi *et al.*, 2016). به طور مشخص دو ژنوتیپ ۱۱ و ۲۰ که بر اساس نمودار سه‌بعدی و مقادیر شاخص‌ها به‌عنوان ژنوتیپ‌های متحمل شناخته شدند، در مجاورت شاخص‌های MP، GMP، STI و HM قرار داشتند (شکل ۳). با توجه به زوایای خطوط شاخص‌ها در نمایش گرافیکی بای‌پلات مشخص شد که همبستگی مثبت و معنی‌داری بین عملکرد دانه در شرایط بدون تنش (Yp) و تنش (Ys) با MP، GMP، STI و HM وجود داشت که نشان‌دهندهٔ کارایی بالای شاخص‌های مذکور در هر دو شرایط بدون تنش و تنش خشکی است. همچنین همبستگی منفی بین شاخص‌های SSI و TOL با شاخص‌های RSI و YSI مشاهده شد (شکل ۳). در همین رابطه، مطالعه ۲۰ ژنوتیپ گندم نان در اقلیم سرد کشور بر اساس تفسیر بای پلات تجزیه به مؤلفه‌های اصلی نشان داده است که شاخص‌های MP، GMP، HM و STI همبستگی مثبت و بالایی با عملکرد دانه گندم در شرایط تنش و بدون تنش داشته است (Asadi *et al.*, 2024). استفاده از تجزیه به مؤلفه های اصلی و نمودار بای پلات برای گزینش ژنوتیپ‌های متحمل به تنش در گندم نان (Naghavi *et al.*, 2016; Lal *et al.*, 2024) و گندم دوروم (Talebi *et al.*, 2009; Saeidi and Abdoli, 2020) مورد استفاده قرار گرفته است.



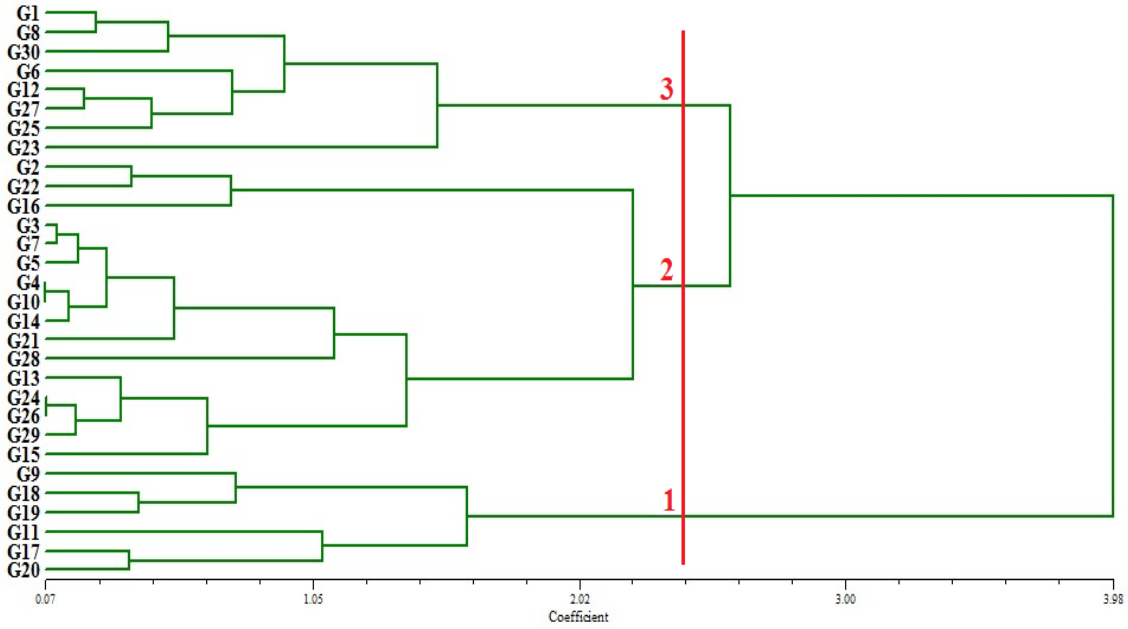

**شکل ۳-نمودار بای‌پلات دو مؤلفهٔ اصلی اول تحت شرایط تنش خشکی انتهای فصل**

**Figure 3. Biplot plot of the first two principal components under terminal drought stress conditions**

## تجزیه کلاستر بر اساس مقادیر شاخص‌های تحمل به تنش

دندروگرام حاصل از تجزیه کلاستر، ژنوتیپ‌ها را بر اساس شاخص‌های تحمل به تنش خشکی گروه‌بندی کرد (شکل ۴). بر این اساس ژنوتیپ‌ها به سه خوشهٔ اصلی تقسیم شدند و تا حد زیادی با نتایج نمودارهای سه‌بعدی ژنوتیپ‌ها هماهنگ بودند. خوشهٔ اول شامل ژنوتیپ‌های ۲۰، ۱۷، ۱۱، ۱۹، ۱۸ و ۹ بودند. همگی این شش ژنوتیپ در نمودارهای سه‌بعدی در گروه A قرار گرفته بودند و جزو متحمل‌ترین ژنوتیپ‌ها بودند. خوشهٔ دوم شامل ژنوتیپ‌های ۱۵، ۲۹، ۲۶، ۲۴، ۱۳، ۲۸، ۲۱، ۱۴، ۱۰، ۴، ۵، ۷، ۳، ۱۶، ۲۲ و ۲ بود. بیشتر ژنوتیپ‌های این خوشه، در نمودارهای سه‌بعدی در گروه C قرار گرفتند و در شرایط تنش عملکرد مطلوبی داشتند. سایر ژنوتیپ‌ها شامل ۲۳، ۲۵، ۲۷، ۱۲، ۶، ۳۰، ۸ و ۱ در خوشهٔ سوم قرار گرفتند که در نمودارهای سه‌بعدی در گروه D قرار داشتند و در هر دو شرایط تنش و بدون تنش عملکرد کمتری نسبت به سایر ژنوتیپ‌ها داشتند.

تجزیه خوشه‌ای ژنوتیپ‌ها بر اساس شاخص‌های تحمل به خشکی در گندم نان (Naghavi *et al.*, 2016) و گندم دوروم (Saeidi and Abdoli, 2020) نیز مورد استفاده قرار گرفته است. در مطالعهٔ دیگری با بررسی ۱۲۲ لاین‌های پاکوتاه گندم تحت تنش‌های خشکی و گرمای انتهای فصل، بر اساس نتایج تجزیه خوشه‌ای و تجزیه به مؤلفه‌های اصلی گزارش شده است که ژنوتیپ TS49، متحمل‌ترین ژنوتیپ به هر دو شرایط تنش خشکی و شوری است (Gaikwad *et al.*, 2025).




**شکل ٤- دندروگرم حاصل از تجزیه خوشه‌ای ۳۰ ژنوتیپ گندم نان بر اساس شاخص‌های تحمل به تنش**

**Fog 4. Dendrogram resulting from cluster analysis of 30 braed wheat genotypes based on drought tolerance indices**

## نتیجه‌گیری

به‌طور کلی نتایج این پژوهش نشان داد که شاخص‌های STI، GMP، MP و HM بالاترین همبستگی را با عملکرد دانه در هر دو شرایط بدون تنش و تنش خشکی انتهای فصل داشتند. بر اساس تحلیل نمودارهای سه‌بعدی شاخص‌های تحمل به تنش، تجزیه به مؤلفه‌های اصلی و تحلیل خوشه‌ای، ژنوتیپ‌های شماره ۱۱، ۱۹، ۲۰، ۱۷، ۱۸ و ۹ به‌عنوان متحمل‌ترین و ژنوتیپ‌های شماره ۲۳، ۶، ۲۵، ۱۲، ۱، ۸، ۳۰ و ۲۷ به‌عنوان حساس‌ترین ژنوتیپ‌ها نسبت به تنش خشکی شناسایی شدند. با توجه به این که ژنوتیپ‌های متحمل شناسایی شده همگی لاین‌های امیدبخش هستند، انتظار می‌رود که از میان آن‌ها، برخی لاین‌ها با در نظر گرفتن سایر عوامل محدودکنندهٔ عملکرد در استان گلستان مانند بیماری‌هایی نظیر زنگ زرد، زنگ قهوه‌ای و فوزاریوم سنبله، برای شرایط تنش خشکی انتهای فصل معرفی و در اختیار کشاورزان قرار گیرد.

## سپاس‌گزاری

این مقاله حاصل پروژه مصوب مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر با کد ۰-۰۳-۰۳-۱۱۱-۰۱۰۷۶۹ می‌باشد. بدین‌وسیله از کلیه همکاران پروژه غلات در مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان گلستان، به جهت همکاری صمیمانه در اجرای این پژوهش، تقدیر و تشکر به عمل می‌آید.

**References**

Arab, S. A., Mohamed, M. M., & El-Shal, M. H. (2021). Identifying wheat stress tolerant genotypes among some bread wheat accessions using different drought tolerance indices. *Journal of Plant Production*, 12(7), 813-818. https://doi.org/10.21608/jpp.2021.84334.1043

Asadi A .A., Amini, A., Babaie, T., Eivazi, A. R., & Qudsi, M. (2024). Identification of genotypes tolerant to drought stress in wheat using quantitative indices in different regions of iran's cold climate. *Journal of Crop Breeding*, 16(1), 17-31. https://doi.org/10.61186/jcb.16.49.17 [In Persian].

Basafa, M., & Taherian, M. (2010). Evaluation of drought tolerance in Alfalfa (*Medicago sativa*) ecotypes using drought tolerance indices. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 3, 69-81. https://doi.org/10.22077/ESCS.2010.84 [In Persian].

Bidinger, F. R., V. Mahalakshmi, G., & Rao, D. (1987). Assessment of drought resistance in pearl millet (*Pennisetum americanum* L. Leeke). Estimation of genotype response to stress. *Australian Journal of Agricultural Research*, 38, 49-59. https://doi.org/10.1071/AR9870049

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

Farayedy, Y. (2004). Evaluation of drought tolerance in Kabuli chickpea genotypes. *Iranian Journal of Agriculture*, 6, 27-38. https://journals.ut.ac.ir/article15668.html [In Persian].

Farooq, M., Hussain, M., & Siddique, K. H. (2014). Drought stress in wheat during flowering and grain-filling periods. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 33, 331-349. https://doi.org/10.1080/07352689.2014.875291

Farshadfar. E., & Amiri, R. (2017). Assessment of drought resistance in different bread wheat lines using agro-physiological traits and integrated selection index. *Environmental Stresses in Crop Science*, 11, 79-91. https://doi.org/10.22077/escs.2017.189.1046 [In Persian].

Fernandez, G. C. J. (1992). Effective selection criteria for assessing plant stress tolerance. In C. G. Kuo [ed.], Adaptation of Food Crops to Temperature and Water Stress, pp 257-270. https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/19951607124

Fischer, R. A., & 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

Fischer, R. A., & Wood, T. (1979). Drought resistance in spring wheat cultivars III. Yield association with morphological traits. *Australian Journal of Agricultural Research*, 30, 1001-1020. https://doi.org/10.1071/AR9791001

Gaikwad, K. B., Mazumder, A. K., Kumar, M., Singh, A., Ansari, R., Saifi, N., Joshi, M.A., Babu, P., Vikas, V. K., Singh, S.K., & Yadav, R. (2025). Evaluating heat and drought resilience in ancient Indian Dwarf wheat *Triticum sphaerococcum* Percival using stress tolerance indices. *Scientific Reports*, 15(1), 1-22. https://doi.org/10.1038/s41598-025-02502-0

Gavuzzi, P., Rizza, F., Palumbo, M. R., Campaline, G., Ricciardi, G. L., & Borghi, B. (1997). Evaluation of field and laboratory predictors of drought and heat tolerance in winter cereals. *Canadian Journal of Plant Science*, 77, 523-531. https://doi.org/10.4141/P96-130

Ghaffari, A. & Jalal Kamali, M. R. (2013). Wheat Productivity in Islamic Republic of Iran: Constraints and opportunities. In: Paroda R. (eds.) Proceedings of the Regional Consultation on Improving Wheat Productivity in Asia. Bangkok, Thailand. pp 98-11.

Golabadi, M., Arzani, A., & Mirmohammadi Maibody, S. M. (2006). Assessment of drought tolerance in segregation population in drum wheat. *African Journal of Agricultural Research*, 1, 162-171. https://doi.org/10.5897/AJAR.9000070

Jalilifar, M., Rahnama, A. & Abdolshahi, R. (2025). Responses of morphological, phenological and yield traits of wheat cultivars and early maturing near-isogenic lines to irrigation cut-off at reproductive growth stages. *Cereal Research*, 15(4), 351-367. https://doi.org/10.22124/cr.2025.31509.1878

Kargar, S. M. A., Ghannadha, M. R., Bozorgi-Pour, R., Atari, A. A., & Babaei, H. R. (2004). Investigation of drought tolerance indices in some soybean genotypes under restricted irrigation condition. *Iranian Journal of Agricultural Science*, 35, 97-111. https://jijas.ut.ac.ir/article_17581.html [In Persian].

Khojamli, R., Zaynali Nezhad, K., Nasrollahnejad Ghomi, A. A. & Bagherikia, S. (2021). Evaluation of bread wheat genotypes under drought stress conditions in seedling stage using drought indices. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 14(4), 887-899. https://doi.org/10.22077/escs.2020.3202.1820 [In Persian].

Kianpour, S., Rahnama, A., Monsefi, A., & Abdolshahi, R. (2024). Evaluating morpho-phenological and yield traits of bread wheat cultivars and near-isogenic lines in response to terminal heat stress in Ahvaz, Iran. *Cereal Research*, 13(4), 331-349. https://doi.org/10.22124/CR.2024.26382.1804 [In Persian].

Lal, K., Jatoi, W. A., Memon, S., Jatoi, I. A., Rind, S. N., Rajput, L., Khan, N. M., Khaskhali, I. A., Depar, M. S., Lund, M. I., Kaleri, M. H., & Sarwar, M. K. S. (2024). Wheat (*Triticum aestivum* L.) Drought tolerance indices under water stress conditions. *SABRAO Journal of Breeding and Genetics*, 56, 232-245. http://doi.org/10.54910/sabrao2024.56.1.21

Mahdavi, Z., Rashidi, V., Yarnia, M., Aharizad, S., & Roustaii, M. (2023). Evaluation of yield traits and tolerance indices of different wheat genotypes under drought stress conditions. *Cereal Research Communications*, 51(3), 659-669. https://doi.org/10.1007/s42976-022-00322-w

Mohammadi, R. (2018). Breeding for increased drought tolerance in wheat: a review. *Crop and Pasture Science*, 69(3), 223-241. https://doi.org/10.1071/CP17387

Moshattati, A., Siadat, S., Alami-Saeid, K., Bakhshandeh, A., & Jalal-Kamali, M. (2013). Comparison of wheat cultivars using indices of tolerance and susceptibility to terminal heat stress in Ahvaz. *Plant Productions*, 36(2), 61-73. https://plantproduction.scu.ac.ir/article_10153.html [In Persian].

Murri, S., Emam, Y., & Surshojani, H. (2013). Evaluation of terminal drought tolerance in wheat using yield, yield components and quantitative indices of drought tolerance. *Environmental Stress in Crop Science*. 5, 19-32. https://doi.org/10.22077/escs.2012.111 [In Persian].

Naghavi, M. R., Moghadam, M., Toorchi, M., & Shakiba, M. R. (2016). Evaluation of spring wheat cultivars based on drought resistance indices. *Journal of Crop Breeding*, 8, 192-207. http://dx.doi.org/10.18869/acadpub.jcb.8.17.207 [In Persian].

Omidi, M., Siahpoosh, M., Mamghani, R., & Modarresi, M. (2015). Heat tolerance evaluating of wheat cultivars using physiological characteristics and stress tolerance indices in Ahvaz climatic conditions. *Plant Productions*, 38(1), 103-113. https://doi.org/10.22055/ppd.2015.11135 [In Persian].

Pour-Aboughadareh, A., Yousefian, M., Moradkhani, H., Moghaddam Vahed, M., Poczai, P., & Siddique, K. H. (2019). IPASTIC: An online toolkit to estimate plant abiotic stress indices. *Applications in plant sciences*. 7, p.e11278. https://doi.org/10.1002/aps3.11278

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

Saba, J., Moghaddam, M., Ghassemi, M., & Nishabouri, M. R. (2001). Genetic properties of drought resistance indices. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 3, 43-49 https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.16807073.2001.3.1.5.8

Saeidi, M., & Abdoli, M. (2020). Genetic diversity evaluation for drought stress tolerance in bread and durum wheat genotypes using common and new drought tolerance indices. *Journal of Plant Molecular Breeding*, 8(1), 19-30.

Sallam, A. tolerance, Alqudah, A. M., Dawood, M. F., Baenziger, P. S., & Börner, A. (2019). Drought stress in wheat and barley: advances in physiology, breeding and genetics research. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(13), 3137. https://doi.org/10.3390/ijms20133137

Sio-Se Mardeh, A., Ahmadi, A., Poustini, K., & Mohammadi, V. (2006). Evaluation of drought resistance indices under various environmental conditions. *Field Crops Research*, 98(2-3), 222-229. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2006.02.001

Srivastava, J.P., Acevedo, E., & Varma, S. (1987). Drought Tolerance in Winter Cereal. 2ed. John Wiley Pub, USA, pp 678.

Sundari, T., Tohari, S., & Mangoendidjojo, W. (2005). Yield performance and tolerance of mungbean genotypes to shading. *Journal Pertanian*, 12, 12-19.

Taghian, A.S., & Abo-Elwafa, A. (2003). Multivariate and rapid analysis of drought tolerance in spring wheat. *Assiut Journal of Agricultural Science*, 34, 1-25. https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/20043093520

Talebi, R., Fayaz, F., & Naji, A. M. (2009). Effective selection criteria for assessing drought stress tolerance in durum wheat (*Triticum durum* Desf.). *General and Applied Plant Physiology*, 35: 64-74. http://www.bio21.bas.bg/ipp/gapbfiles/v-35/GAPP_v35_1-2_64-74.pdf

Zebarjadi, A., Asgar, S., Najafi, A., & Rezaiezad, A. (2016). Evaluation of drought tolerance of rapeseed genotypes using drought resistance indices. *Environmental Stresses in Crop Science*, 8, 345-348. https://doi.org/10.22077/escs.2016.248 [In Persian].