

Original article

Evaluating triticale genotypes based on drought resistance indices

Hasan Basiri¹, Omid Alizadeh^{2*}, Foroud Bazrafshan³, Mahdi Zare⁴, Mohamad Yazdani³

1. Ph.D student, Department of Agronomy, Fir. C., Islamic Azad University, Firoozabad, Iran

2. Associate Professor, Department of Plant Protection, Shi. C., Islamic Azad University, Shiraz, Iran

3. Assistant Professor, Department of Agronomy, Fir. C., Islamic Azad University, Firoozabad, Iran

4. Associate Professor, Department of Agronomy, Fir. C., Islamic Azad University, Firoozabad, Iran

Received 10 May 2024; Accepted 5 October 2024

Extended abstract

Introduction

Triticale is a relatively new man-made cereal crop created by crossing wheat (*Triticum* spp.) and rye (*Secale cereale*) to combine the high grain quality and productivity of wheat with the stress tolerance and adaptability of rye. This crop has received attention worldwide due to its high protein content, tolerance to a wide range of environmental stresses, and its ability to thrive in marginal soils. Triticale genotypes are generally more resilient than wheat under drought, salinity, and other abiotic stresses. However, despite its potential, the large-scale cultivation of triticale in many countries, including Iran, remains limited, partly due to a lack of comprehensive knowledge regarding its performance under different environmental conditions. Since drought is one of the most critical limiting factors for cereal production in arid and semi-arid regions, identifying genotypes with enhanced drought tolerance is of paramount importance. The application of drought tolerance indices, which combine yield performance in stressed and non-stressed conditions, is a widely accepted approach to screen for stable and adaptable genotypes. Nevertheless, relying on a single index may be misleading, as each index captures only a specific dimension of tolerance. Therefore, integrative multivariate approaches such as principal component analysis (PCA), biplot, and heatmap clustering can offer a more comprehensive understanding and accurate discrimination of tolerant and high-yielding genotypes.

Materials and methods

To investigate the effect of different irrigation regimes and to identify triticale genotypes with superior drought tolerance, a two-year field experiment was conducted using a split-plot design in randomized complete blocks with three replications. The study involved four irrigation treatments: full irrigation (control), irrigation withholding at the flowering stage, at the milky stage, and at the doughy stage of grain development. Nine improved triticale genotypes, mostly derived from CIMMYT lines and recently developed in national breeding programs, were evaluated. Grain yield was measured for each plot and subsequently used to calculate a range of drought tolerance indices, including tolerance index (TOL), stress tolerance index (STI), geometric mean productivity (GMP), mean productivity (MP), yield index (YI), yield stability index (YSI), stress susceptibility index (SSI), and stress tolerance score (STS). Combined and simple analyses of variance (ANOVA) were performed using SAS software, while multivariate statistical methods such as PCA-based biplot and heatmap clustering were applied using R software to visualize genotype–index relationships and to classify genotypes into tolerant and susceptible groups.

* Corresponding author: Omid Alizadeh; E-Mail: Omid.alizadeh@iau.ac.ir

Results and discussion

The combined ANOVA across two years revealed significant effects of genotype, irrigation treatment, and their interaction, while year effects were not significant, confirming the consistency of results. Grain yield decreased significantly under water deficit treatments compared to full irrigation, with the strongest reduction observed when irrigation was withheld at the flowering and milky stages. Among the nine genotypes, Sanabad (G1), Paj (G2), and ET-85-04 (G4) consistently exhibited the highest mean yields across normal and stressed conditions, while ET-85-04 and ET-83-20 showed the lowest variability across environments, indicating strong stability. Biplot analysis demonstrated that combining multiple indices provided clearer separation of tolerant genotypes compared to individual indices. Notably, STI, GMP, and MP were strongly correlated with grain yield under both stressed and non-stressed conditions, confirming their reliability as selection criteria. Heatmap clustering further confirmed that genotypes ET-85-04, Sanabad, and Paj grouped together with favorable stress tolerance indices, suggesting their superior adaptability. In contrast, some genotypes, such as ET-92-18 and ET-92-15, showed weaker associations with tolerance indices and were classified as less suitable for drought-prone areas. The use of multivariate methods was proven to be a powerful approach, integrating diverse tolerance indices to provide a more holistic assessment. These findings highlight that genotypes with high yield potential and stable performance across environments are ideal candidates for breeding programs aimed at improving drought tolerance in triticale.

Conclusion

In conclusion, the results of this two-year field evaluation emphasize that relying on a single drought tolerance index is insufficient for accurate identification of tolerant genotypes. Instead, combining multiple indices through multivariate statistical methods such as PCA-based biplot and heatmap clustering offers a superior strategy to distinguish stable and drought-tolerant lines. Based on both yield performance and tolerance indices, ET-85-04 was identified as the most promising genotype under both stress and non-stress conditions. Alongside Sanabad and Paj, this genotype demonstrated a balanced combination of high productivity, drought tolerance, and stability, making it a strong candidate for release as a new triticale cultivar. These results suggest that triticale can be effectively incorporated into cropping systems in drought-prone regions, potentially offering a reliable alternative to wheat, particularly in areas where water resources are limited. The findings also provide valuable insights for future breeding programs, reinforcing the necessity of integrative statistical approaches in screening and selecting stress-tolerant genotypes.

Keywords: Abiotic Stress, Biplot, Heatmap, Stability, Stress Tolerance Indices

ارزیابی ژنوتیپ‌های تریتیکاله بر اساس شاخص‌های مقاومت به تنش خشکی

حسن بصیری^۱، امید علی زاده^{۲*}، فرود بذرافشان^۳، مهدی زارع^۴، محمد یزدانی^۲

۱. دانشجوی دکتری گروه زراعت، واحد فیروزآباد، دانشگاه آزاد اسلامی، فیروزآباد، ایران
۲. دانشیار گروه گیاهپزشکی، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران
۳. استادیار گروه زراعت، واحد فیروزآباد، دانشگاه آزاد اسلامی، فیروزآباد، ایران
۴. دانشیار گروه زراعت، واحد فیروزآباد، دانشگاه آزاد اسلامی، فیروزآباد، ایران

مشخصات مقاله	چکیده
واژه‌های کلیدی:	به‌منظور بررسی تأثیر تیمارهای مختلف آبیاری و تعیین مناسب‌ترین شاخص مقاومت به خشکی در ژنوتیپ‌های تریتیکاله، مطالعه‌ای با چهار سطح آبیاری و نه (۹) ژنوتیپ جدید تریتیکاله طی سال‌های زراعی ۱۳۹۸-۱۳۹۹ انجام شد. سطوح آبیاری شامل شاهد و قطع آبیاری در سه مرحله گلدهی، شیری و خمیری دانه بود. نتایج تحلیل واریانس مرکب نشان‌دهنده اثر معنی‌دار رقم، آبیاری به همراه اثر متقابل دوگانه آن‌ها بود، درحالی‌که اثر سال و اثرات متقابل سال در تیمارهای آزمایشی اکثراً معنی‌دار نگردیدند. علاوه بر استفاده از نتایج تحلیل واریانس و مقایسه میانگین، در این تحقیق از روش‌های چند متغیره شامل بای‌پلات بر اساس تجزیه به مؤلفه‌های اصلی و نقشه حرارتی است. بر اساس این روش‌ها، ژنوتیپ‌های شماره ۴ (ET-85-04)، ۱ (سناباد) و ۲ (پاژ) مناسب‌ترین ژنوتیپ‌ها برای تحمل شرایط تنش خشکی در مقایسه با سایر ژنوتیپ‌ها بودند. علاوه بر آن، نتایج تجزیه شاخص‌ها نشان داد که ژنوتیپ‌های ۸ (ET-85-04) و ۹ (ET-83-20) دارای کمترین همبستگی با شاخص‌های تنش و در نتیجه تنوع کم در پاسخ به تنش خشکی بودند. در نهایت، نتایج نشان داد که ژنوتیپ ET-85-04 می‌تواند جزء ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی و هم‌زمان پایدار باشد و جهت معرفی به‌عنوان یک رقم جدید مورد استفاده قرار گیرد. بر اساس نتایج همچنین مشخص گردید که برای انتخاب ژنوتیپ‌های متحمل در برنامه‌های اصلاحی، استفاده از شاخص‌های تحمل تنش با هم به‌صورت هم‌زمان بهترین راه برای استخراج اطلاعات از تمامی شاخص‌های تحمل است؛ بنابراین طبق نتایج این تحقیق پیشنهاد می‌شود که به‌جای استفاده از یک مدل و شاخص خاص به‌تنهایی، بهتر است از روش‌های تحمل تنش به‌صورت ترکیبی استفاده شود تا ژنوتیپ‌های پایدار و متحمل به‌درستی تشخیص داده شوند.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۲۱	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۷/۱۰	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۱۴	
تاریخ انتشار:	
زمستان ۱۴۰۴	
۶۰۴-۵۹۳ (۴): ۱۸	

مقدمه

بسیاری از کشورهای آسیایی و آفریقایی، بیش از ۸۰ درصد غذای مردم از غلات تأمین می‌گردد و تقریباً نیمی از کل نیاز غذایی در آسیا به‌طور مستقیم از غلات تأمین می‌گردد (Saed-Moucheshi et al., 2022).

یکی از جدیدترین گونه‌های گیاهی زیرمجموعه غلات که در حال حاضر در تعدادی از کشورهای پیشرفته در جهان اهمیت بسیاری پیدا کرده است تریتیکاله^۱ است. تریتیکاله حدود صدسال پیش به‌وسیله دو برابر شدن تعداد کروموزوم

در میان گیاهان زراعی، غلات از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند و بیش‌ترین تولید و سطح زیر کشت را در مقایسه با سایر گیاهان زراعی در دنیا دارا می‌باشند. عوامل مختلفی همچون سازگاری به شرایط آب و هوایی مختلف، سهولت حمل‌ونقل، نگهداری آسان و عملکرد نسبتاً مطلوب، غلات را به‌عنوان یک منبع غذایی عمده برای انسان تبدیل نموده است (Blum, A., 2006). نزدیک به ۷۰ درصد سطح زیر کشت حدود یک میلیارد هکتاری جهان به غلات اختصاص یافته است. در

¹ Triticosecale Wittmack

دنیا از جمله مناطق خشک و نیمه‌خشک محسوب می‌شود (Riasat et al., 2020; Saed-Moucheshi et al., 2019). استفاده از شاخص‌های تحمل که بر اساس عملکرد اقتصادی تنظیم گردیده است رایج‌ترین استراتژی به‌منظور ارزیابی و بهبود تحمل ارقام نسبت به شرایط تنش خشکی است (Riasat et al., 2019; Riasat et al., 2018; Saed-Moucheshi et al., 2014).

همان‌طور که بیان گردید تولید تجاری تریتیکاله در کشور ایران صورت نمی‌گیرد که یکی از دلایل عمده آن نبود اطلاعات کافی در دسترس تولیدکنندگان (گیاهی و دامی) بوده و تابه‌حال نوسانات زیادی را با کاهش و افزایش‌ها داشته است (Saed-Moucheshi et al., 2019). بررسی و ارزیابی عملکرد اقتصادی ارقام در شرایط تنش محیطی و بدون تنش جهت معرفی ارقام جدید و مناسب کاشت در شرایط پیش روی کشور لازم و ضروری به نظر می‌رسد. از طرفی با توجه کمبود آب برای آبیاری که سال‌های اخیر برجسته‌تر گردیده است کاشت غلاتی مانند ذرت برای مصرف دام به دلیل بالا بودن نیاز آبی آن منطقی به نظر نمی‌رسد. پژوهش پیش رو جهت بررسی ژنوتیپ‌های جدید تولیدشده در کشور و امکان‌سنجی معرفی ارقام جدید مقاوم به شرایط تنش کم‌آبی و همچنین بررسی شاخص‌های تحمل تنش در این غله انجام گردید.

مواد و روش‌ها

در این مطالعه نه (۹) ژنوتیپ برتر (از لحاظ عملکرد و کیفیت محصول) تریتیکاله با منشأ گرفته‌شده از CIMMYT که اخیراً توسط محققین مراکز تحقیقات کشاورزی داخل کشور تولید شده است طی دو فصل زراعی (۱۳۹۶-۱۳۹۷ و ۱۳۹۸-۱۳۹۷) بر اساس کرت‌های خردشده بر اساس طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار و تحت چهار رژیم مختلف آبیاری شامل توقف آبیاری در مرحله گلدهی، در مرحله شیرگی بذر و در مرحله خمیری بذر در کنار شرایط آبیاری نرمال به‌عنوان شاهد و بدون اعمال تنش در ایستگاه مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی زرقان واقع در استان فارس انجام گردید. در «جدول ۱ پیوست» مشخصات ژنوتیپ‌های تریتیکاله مورد استفاده در این پژوهش نوشته شده است.

F1 هیبرید بین گندم^۱ به‌عنوان والد ماده و چاودار^۲ به‌عنوان والد نر ایجاد شده است (O'mara, 1953). اگر در تلاقی بین گندم و چاودار از گندم تتراپلوئید استفاده گردد تریتیکاله حاصل هگزاپلوئید و اگر گندم هگزاپلوئید مورد استفاده قرار گیرد تریتیکاله حاصل اکتاپلوئید خواهد بود. تریتیکاله‌های اکتاپلوئیدی به سبب عقیمی نسبی ناشی از تعداد بالای کروموزوم و عدم تعادل لینکاژی و کروموزومی، چندان مطلوب نیستند، به همین دلیل محققین مطالعات خود را بر روی تریتیکاله‌های هگزاپلوئیدی که از عملکرد بیشتری برخوردار هستند متمرکز کرده‌اند (Flowers and Yeo, 1995). با این حال، تلاش و توسعه تریتیکاله به‌وسیله پژوهشگران علم به‌نژادی و در نتیجه معرفی ارقام جدید در سال‌های اخیر باعث شد که تریتیکاله از نظر بسیاری از صفات زراعی اصلاح‌شده و دارای صفات مطلوبی گردد. تریتیکاله‌های جدید دارای عملکرد بالا، مقاومت به خوابیدگی و ارگوت، بذر درشت پر شده هستند و دارای مقدار بالاتری از پروتئین لیزین نسبت به سایر غلات می‌باشند (Saed-Moucheshi and Safari, 2023b; Serna-Saldivar et al., 2004).

به‌عنوان موفق‌ترین غله ساخت بشر، هدف اولیه از ایجاد تریتیکاله نیز ترکیب صفات مطلوب دو گونه والدی که شامل قابلیت تولید و عملکرد بالا، سازگاری وسیع و تحمل به تنش‌های زنده و غیرزنده در کنار صفات کیفی مطلوب دانه بوده است (Saed-Moucheshi, 2018; Saed-Moucheshi and Safari, 2023b; Serna-Saldivar et al., 2004). ارقام جدید تریتیکاله در دست پژوهش نیز، در پژوهش‌های به‌نژادی داخل کشور ایران و خارج از کشور، دارای خصوصیات بهترین ارقام گندم نان هستند، در حالی که قابلیت بیشتری برای کاشت در انواع خاک‌ها را نسبت به بهترین ارقام گندم دارا هستند. طبق آمار فائو (Saed-Moucheshi et al., 2022)، از نظر سطح کشت بیشترین درصد زراعت تریتیکاله مربوط به اروپا (۸/۷ درصد) و بعد از آن آمریکای شمالی (۷ درصد) آفریقا (۶ درصد) آمریکای لاتین (۵ درصد) و استرالیا (۴ درصد) هستند. بر اساس این آمار بیشترین مقدار عملکرد دانه در کشورهای آسیایی مربوط به چین (۴۸۶۵۵ هکتار) است که قسمت اعظم کشت آسیا را شامل می‌شود.

تنش خشکی به‌عنوان مهم‌ترین عامل کاهش پایداری عملکرد و در نتیجه آن کاهش عملکرد در بسیاری از مناطق

² Secale spp

¹ Triticum spp

شاخص نمره تحمل تنش^۸

$$STS = MP + GMP + STI + YSI + YI - SSI - TOL \quad [۸]$$

داده های خام به دست آمده از این آزمایش ابتدا در اکسل وارد شده و سپس با استفاده از نرم افزار SAS 9.4 M6 تحلیل واریانس مرکب و مقایسه میانگین قرار گرفت. همچنین محاسبه شاخص های تحمل تنش بر اساس فرمول های ارائه شده به وسیله کدهای نرم افزار SAS نوشته شده توسط مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی محاسبه گردید. پس از محاسبه شاخص ها و میانگین عملکرد ژنوتیپ ها، از نرم افزار R 4.4.0 جهت تهیه شکل های مربوط به نقشه گرمایی استفاده گردید و این روش جدید می تواند بزرگی یا کوچکی مقدار همبستگی ها بر اساس رنگ و شدت و عمق رنگ مشخص کرده و به گروه بندی شاخص ها و ارقام کمک کند. نمودارهای پراکنش ساده نیز به وسیله بسته نرم افزاری اکسل ۲۰۲۴ تهیه گردید.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس مرکب دوساله بر اساس کرت های خرد شده در پایه طرح بلوک های کامل تصادفی در «جدول ۲ پیوست» آورده شده است. در این مطالعه اثر سال و اثرات متقابل سال در عامل های آزمایشی به صورت تصادفی و اثر ژنوتیپ و آبیاری به همراه اثر متقابل دوگانه آن ها به صورت ثابت در نظر گرفته شد و داده ها با استفاده از نرم افزار SAS 9.4 M6 مور تحلیل شدند. بر اساس نتایج تجزیه واریانس، اثر اصلی سال و همچنین اثر متقابل سال در هر دو عامل آبیاری و رقم معنی دار نیست ولی اثرات اصلی ژنوتیپ و آبیاری به همراه اثر متقابل دوگانه آن ها معنی دار گردید. این نتایج نشان دهنده مجاز بودن تحلیل های پسواریانس به هر دو صورت مرکب و ساده (جداگانه) است. جدول ۱. نشان دهنده مقایسه میانگین عامل های آزمایشی است که در آن آبیاری نرمال دارای بیشترین عملکرد دانه بوده است و سایر تیمارهای قطع آبیاری در مرحله های مختلف رشد نشان دهنده تفاوت معنی دار آن ها از لحاظ آماری است. از میان ژنوتیپ ها، ژنوتیپ شماره ۱، ۲ و ۴ به ترتیب دارای بیشترین میانگین عملکرد دانه با تفاوت معنی دار با هم بودند. ژنوتیپ های شماره

هر کرت آزمایشی شامل چهار ردیف ۲ متری با فاصله بین ردیف ۲۰ سانتی متری و سطح ۲ مترمربع (۱ متر × ۲ متر) بود که تراکمی معادل ۳۵۰ بوته در متر را فراهم آورد. فاصله کاشت روی هر ردیف حدود ۳ سانتی متر و عمق کاشت ۵ سانتی متر تعیین گردید. در نهایت در زمان برداشت عملکرد هر کرت اندازه گیری شده و به عنوان عملکرد دانه هر کرت در نظر گرفته شده و در نهایت به مقدار عملکرد در واحد سطح (عملکرد در ۲ مترمربع و عملکرد در هکتار) تبدیل گردید.

برای بررسی ژنوتیپ های مورد مطالعه از نظر حساسیت و تحمل به تنش خشکی بر مبنای عملکرد دانه، شاخص های تنش متنوعی بر اساس عملکرد ارقام تریتیکاله محاسبه شد (Aliakbari et al., 2013; Saed-Moucheshi et al., 2022). شاخص های مورد بررسی شامل شاخص تحمل TOL (Rosielle and Hamblin, 1981)، شاخص عملکرد YI، شاخص پایداری عملکرد YSI، میانگین بهره وری MP (Rosielle and Hamblin, 1981)، شاخص تحمل تنش STI (Fernandez, 1992)، شاخص SSI (Fischer and Maurer, 1978)، میانگین هندسی بهره وری GMP (Fernandez, 1992) و همچنین نمره تحمل تنش STS بود که نحوه محاسبه هر کدام در ادامه آورده شده است.

شاخص حساسیت به تنش^۱

$$SSI = \frac{1 - \frac{Y_s}{\bar{Y}_p}}{1 - \frac{Y_s}{Y_p}} \quad [۱]$$

شاخص تحمل^۲

$$TOL = Y_p - Y_s \quad [۲]$$

شاخص میانگین بهره وری^۳

$$MP = \frac{Y_s + Y_p}{2} \quad [۳]$$

شاخص عملکرد^۴

$$YI = \frac{Y_s}{\bar{Y}_s} \quad [۴]$$

شاخص پایداری عملکرد^۵

$$YSI = \frac{Y_s}{Y_p} \quad [۵]$$

شاخص تحمل تنش^۶

$$STI = \frac{Y_p \times Y_s}{\bar{Y}_p^2} \quad [۶]$$

شاخص میانگین هندسی بهره وری^۷

$$GMP = \sqrt{(Y_s \times Y_p)} \quad [۷]$$

^۵ Yield Stability Index (YSI)

^۶ Stress Tolerance Index (STI)

^۷ Geometric Mean Productivity (GMP)

^۸ Stress Tolerance Index (STS)

^۱ Stress Susceptibility Index (SSI)

^۲ Tolerance (TOL)

^۳ Mean Productivity (MP)

^۴ Yield Index (YI)

شرایط تنش S1 و S2 تا حدود بسیار زیادی مشابه است. توزیع ژنوتیپ‌ها در شرایط S3 تا حدودی با دو سطح تنش دیگر تفاوت دارد.

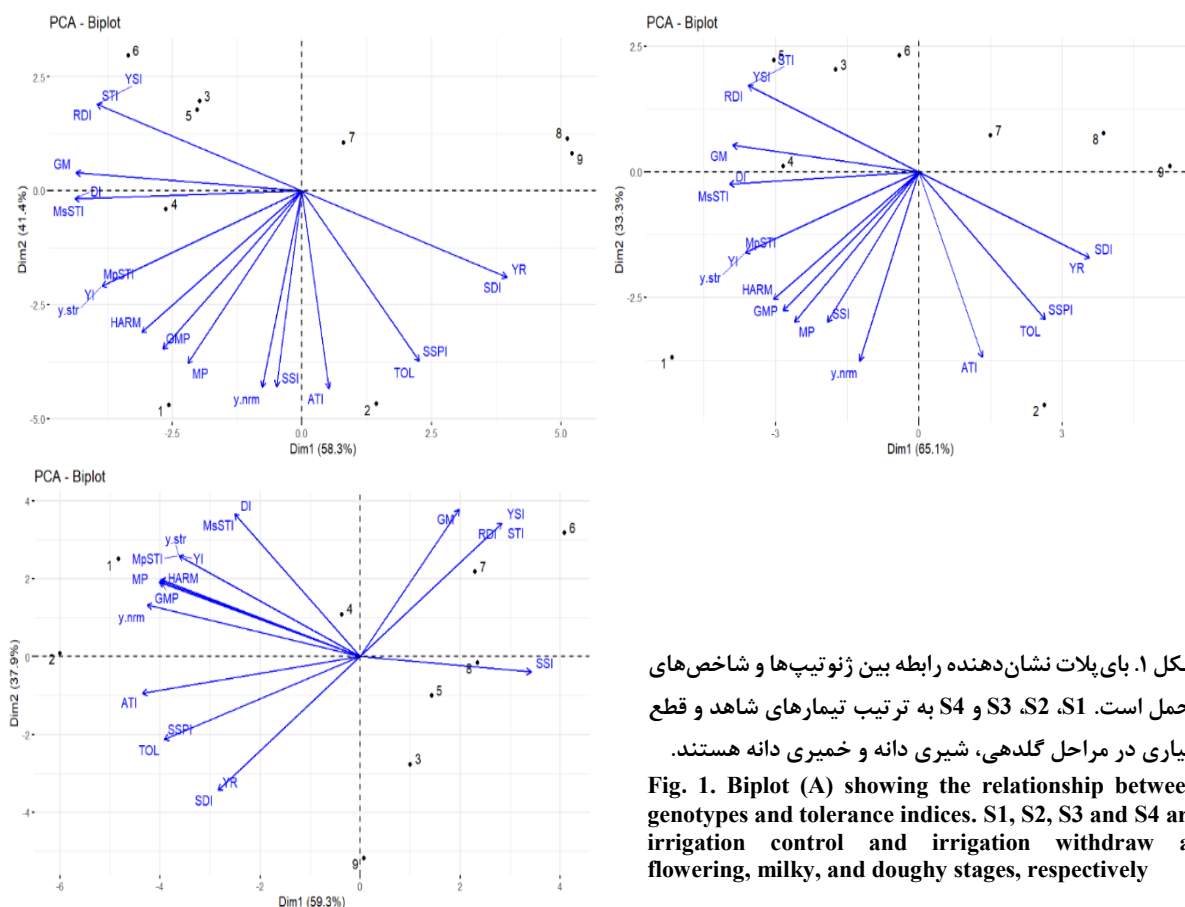
بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از قطع آبیاری در مرحله S1 و S2، ژنوتیپ شماره ۱ بسیار به شاخص‌های مقاومت تنش و همچنین عملکرد در شرایط نرمال نزدیک هستند. ژنوتیپ شماره ۴ نیز دارای فاصله‌ی مناسبی با شاخص‌های تحمل تنش و همچنین عملکرد در شرایط تنش است.

در شرایط قطع آبیاری در مرحله S3 عملکرد شرایط نرمال و تنش در حدود زیادی به هم نزدیک بوده و همبستگی بالایی را با هم نشان دادند که نشان‌دهنده‌ی تأثیر ناچیز تنش خشکی در این مرحله روی گیاهان تریتیکاله است. باین‌حال ژنوتیپ شماره ۱، ۴ و ۲ به ترتیب جزء نزدیک‌ترین ژنوتیپ‌ها به شاخص‌ها مقاومت و همچنین عملکرد دانه هستند.

در «شکل ۱ پیوست» نیز نقشه گرمایشی شاخص‌ها و ژنوتیپ‌ها به همراه کلاسترینگ آن‌ها آورده شده است.

۸ و ۹ نیز کمترین عملکرد دانه را نشان دادند که تفاوت آن‌ها با هم معنی‌دار نبود. در ادامه نتایج مقایسه میانگین ژنوتیپ در آبیاری در سال نیز در **جدول ۲** آورده شده است. ژنوتیپ‌های شماره ۱ و ۲ در این تحلیل نیز دارای بیشترین میانگین در هر دو سال آزمایش و تقریباً در سطوح مختلف آبیاری هستند.

به دلیل معنی‌دار نبودن اثر متقابل سال در ژنوتیپ و آبیاری، محاسبه شاخص‌های تحمل تنش روی داده‌های مرکب هر دو سال و به‌صورت جدا برای سه مرحله قطع آبیاری نسبت به آبیاری نرمال انجام گردید. **جدول ۲** تعدادی از مهم‌ترین شاخص‌های تنش محاسبه‌شده در این مطالعه را نشان می‌دهد. به دلیل زیاد بودن تعداد شاخص‌های محاسبه‌شده، از تحلیل مؤلفه‌های اصلی استفاده گردید. پس از انجام این تحلیل، دو مؤلفه اول که در هر شرایط بیشتر ۹۰ درصد تغییرات را توجیه می‌کردند جهت استخراج بای‌پلات استفاده گردید. **شکل ۱** نشان‌دهنده بای‌پلات مستخرج از دو مؤلفه اصلی اول و دوم برای هر سه شرایط تیمار تنش آبی است. بر اساس این نتایج، تغییرات و توزیع ژنوتیپ‌ها در



شکل ۱. بای‌پلات نشان‌دهنده رابطه بین ژنوتیپ‌ها و شاخص‌های تحمل است. S1، S2، S3 و S4 به ترتیب تیمارهای شاهد و قطع آبیاری در مراحل گلدهی، شیری دانه و خمیری دانه هستند.

Fig. 1. Biplot (A) showing the relationship between genotypes and tolerance indices. S1, S2, S3 and S4 are irrigation control and irrigation withdraw at flowering, milky, and doughy stages, respectively

جدول ۱. میانگین عملکرد دانه ژنوتیپ‌های تریتیکاله در شرایط آبیاری متفاوت در هر دو سال زراعی

Table 1. Average grain yield of triticale genotypes under different irrigation conditions in both crop years

سطح‌های تیمار آبیاری Irrigation Treatments' level									
شماره ژنوتیپ Genotype number	سال اول First Year				سال دوم Second Year				میانگین ژنوتیپ‌ها Genotype Mean
	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	
	1	7341	9673	11032	12691	7561	9963	11473	13136
2	6415	7525	10596	12591	6607	7751	11019	13031	9441.9 B
3	6246	7589	8354	9742	6434	7816	8688	10083	9035.1 C
4	6757	8345	9598	10832	6960	8595	9982	11211	8310.8 D
5	6287	7930	8640	9828	6476	8168	8986	10172	8118.9 D
6	6378	7119	8820	9410	6569	7333	9173	9739	8067.4 D
7	5773	6873	9115	9952	5946	7080	9480	10300	8064.9 D
8	4778	6115	8584	9594	4921	6299	8928	9930	7393.6 E
9	4802	5804	8039	9749	4947	5978	8360	10090	7221.1 E
Mean Irrigation Levels					میانگین سطوح تنش				
10671.1 9381.5 7553.1 6177.6					A B C D				
Mean Year					میانگین سال				
8303.2A					8588.4A				

عدد LSD در سطح ۵ درصد جهت مقایسه میانگین‌ها برابر ۷۴۲/۹۵ است.

S1, S2, S3 و S4 به ترتیب تیمارهای شاهد و قطع آبیاری در مراحل گلدهی، شیری دانه و خمیری دانه هستند.

The LSD number at the 5% level to compare the averages is equal to 742.95.

S1, S2, S3 and S4 are irrigation control and irrigation withdraw at flowering, milky, and doughy stages, respectively.

شده است. بر این اساس، ارتباط بالایی بین شاخص‌های مقاومت و تحمل تنش بر اساس داده‌های جمع‌آوری شده از ژنوتیپ‌های تریتیکاله قابل مشاهده است. عملکرد دانه در شرایط نرمال ضرایب همبستگی مثبت تقریباً کامل (۰/۹۹) با SSI و ATI نشان داد، درحالی‌که با عملکرد دانه در شرایط تنش همبستگی معنی‌داری نشان نداد. همبستگی MpSTI و YI با عملکرد دانه در شرایط تنش کامل بود (۰/۹۹). نتایج مشابهی برای همبستگی بین YR با هر یک از شاخص‌های STI، YSI و SDI به دست آمد. شاخص TOL با SSPI همبستگی مثبت و کامل داشت.

YSI و SDI ضریب همبستگی کامل (۰/۹۹) را با STI نشان دادند. همبستگی MpSTI با YI و همبستگی MsSTI با GM و DI مثبت و کامل بود. YSI و SDI، YSI و RDI، DI و GM و همچنین SDI و RDI همبستگی بالایی با یکدیگر نشان دادند. ژنوتیپ‌های ۳ (جوانیلو)، ۵ (ET-92-15) و ۶ (ET-92-18) نزدیک شاخص‌های YSI، RDI و STI قرار گرفتند درحالی‌که ژنوتیپ‌های ۱ (سناباد) و ۲ (پاژ) نیز در نزدیکی عملکرد در شرایط نرمال قرار داشتند. نتایج گروه‌بندی شاخص تحمل تنش بر اساس ژنوتیپ‌های موردبررسی در نقشه گرمایی در «شکل ۲ پیوست» قابل

این نتیجه نشان می‌دهد که ژنوتیپ شماره ۱ نسبت به سایر ژنوتیپ‌ها دارای همبستگی بیشتری با شاخص GMP به عنوان یک شاخص نشان‌دهنده مقاومت به تنش است. همچنین ژنوتیپ شماره ۲ دارای همبستگی مناسبی با شاخص‌ها مقاومت به تنش و به‌ویژه GMP را در هر سه شرایط تنش است. ژنوتیپ شماره ۴ نیز در شرایط قطع آبیاری در مرحله S1 و S3 دارای همبستگی مناسبی با شاخص‌های مقاومت تنش است. نتایج این روش نیز تأییدکننده نتایج مربوط به بای‌پلات است که در آن ژنوتیپ‌ها شماره ۱، ۲ و ۴ دارای مقاومت مناسبی نسبت تنش خشکی بودند و از میان آن‌ها نیز ژنوتیپ شماره ۱ بیشترین مقاومت را نشان داد. همچنین، شکل ۲. نمودارهای سه‌بعدی را برای عملکرد ژنوتیپ‌های تریتیکاله در شرایط نرمال و تنش به همراه یکی از شاخص‌های مهم تنش حاوی STI و GMP نشان می‌دهد. تقریباً بر اساس تمامی شاخص‌های تحمل به تنش، ژنوتیپ‌های ۱، ۲ و ۴ از بهترین ژنوتیپ‌ها بودند که تحمل و عملکرد بالاتری نسبت به سایر ژنوتیپ‌ها داشتند.

جهت بررسی نحوه ارتباط بین شاخص‌های تحمل تنش، همبستگی بین این شاخص‌ها برای هر سه شرایط تنش قطع آبیاری انجام گردید که نتایج آن در «شکل ۲ پیوست» آورده

ژنوتیپ‌هایی با عملکرد زیاد در هر دو شرایط محیطی برای اهداف اصلاحی مناسب می‌باشند. همواره هدف از تهیه ارقام متحمل به خشکی، معرفی ارقامی بوده که به‌طور نسبی در مقایسه با سایر ژنوتیپ‌ها تنش را بهتر تحمل کرده و در شرایط یکسان افت عملکرد کمتری داشته باشند (Ghasemi et al., 2019). استفاده از شاخص‌های تحمل به خشکی و بررسی همبستگی آن‌ها با عملکرد برای معرفی لاین‌هایی که در شرایط تنش خشکی، عملکرد بالایی دارند بکار گرفته شده است (Rosielle and Hamblin, 1981). با توجه به نتایج پژوهش پیش رو، از میان شاخص‌های تحمل محاسبه شده برخی دارای همبستگی کامل (مثبت یا منفی) و یا همبستگی بالاتر از ۰/۸ با یکدیگر بودند که نشان‌دهنده شباهت بالای این شاخص‌ها جهت استفاده برای انتخاب ارقام و ژنوتیپ‌های مناسب و متحمل است و نتیجه نهایی آن توانایی استفاده از

مشاهده است. بر این اساس شاخص‌های تحمل تنش نیز به چهار گروه اصلی تقسیم شدند که شاخص‌های SSI و ATI به همراه عملکرد در شرایط نرمال در یک گروه و شاخص‌های MP, HARM, GMP, MpSTI و YI عملکرد در شرایط تنش نیز در یک گروه قرار گرفتند.

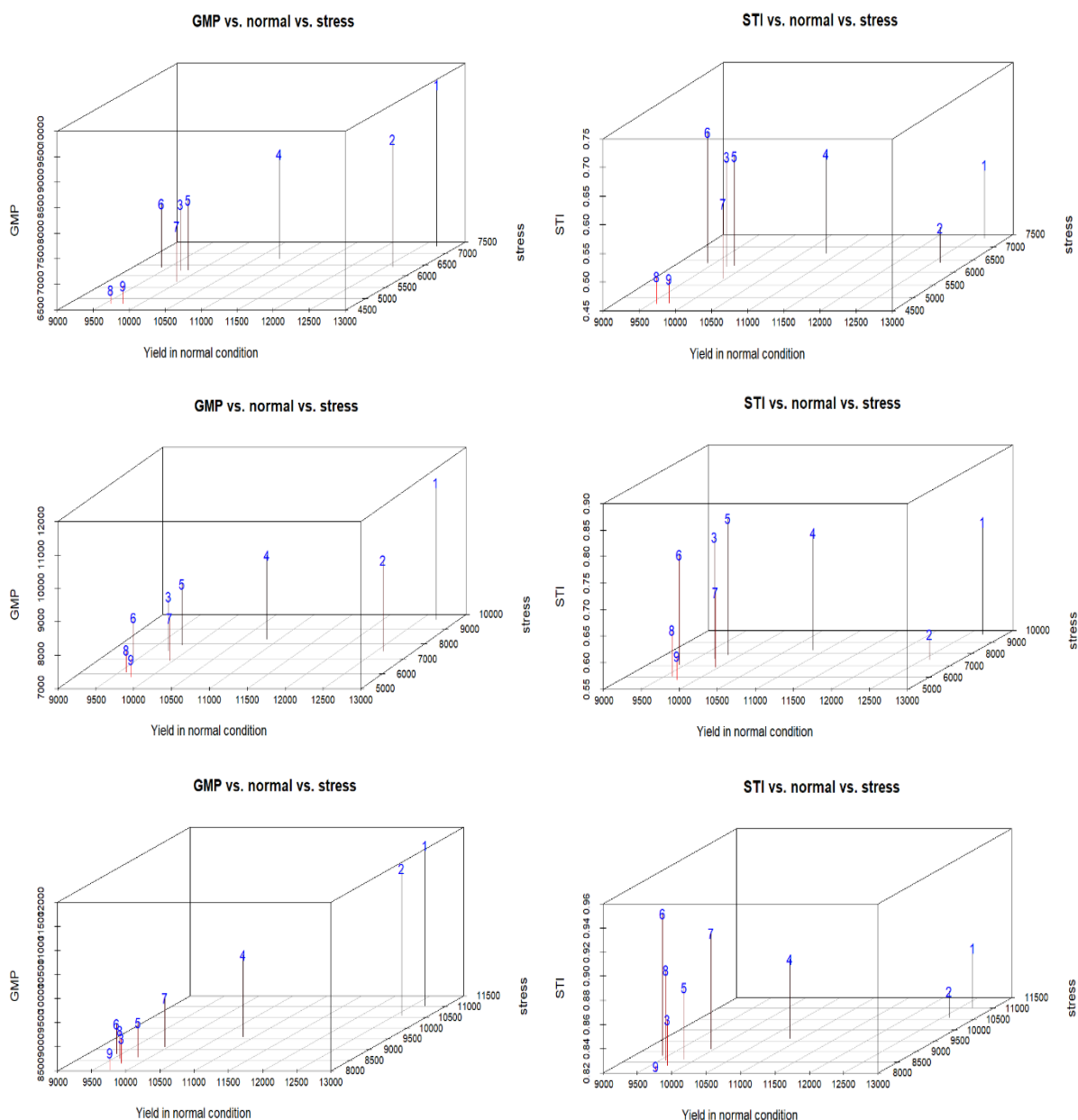
در بررسی کارایی شاخص‌های تحمل تنش، فرناندز با بررسی عملکرد ژنوتیپ‌ها در دو محیط نرمال و تنش، ژنوتیپ‌ها را از نظر واکنش به این دو شرایط به چهار گروه تقسیم کرد: ۱- ژنوتیپ‌هایی که در هر دو شرایط محیطی نرمال و تنش، عملکرد بالایی دارند (گروه A). ۲- ژنوتیپ‌هایی که فقط در شرایط نرمال عملکرد بالایی دارند (گروه B). ۳- ژنوتیپ‌هایی که فقط در شرایط تنش عملکرد بالایی دارند (گروه C) و ۴- ژنوتیپ‌هایی که در هر دو شرایط محیطی نرمال و تنش عملکرد کمی دارند (گروه D).

جدول ۲. شاخص‌های تنش محاسبه شده برای ژنوتیپ‌های تریتیکاله در رژیم‌های مختلف آبیاری بر اساس داده‌های دو سال آزمایش
Table 2. Calculated stress indices for triticale genotypes in different irrigation regimes based on the data of two years of testing.

ژنوتیپ Genotype	عملکرد نرمال Yield normal	عملکرد تنش Yield Stress	YR	SSI	TOL	STI	MP	GMP	HARM	GM
	kg h ⁻¹	kg h ⁻¹								
	S1									
1	12691	11032	0.13	-2.52	1659	0.87	11862	11833	11804	84389
2	12591	10596	0.16	-15.3	1995	0.84	11593	11550	11507	66865
3	9742	8354	0.14	0.7	1387	0.86	9048	9021	8995	58657
4	10832	9598	0.11	1.34	1234	0.89	10215	10196	10178	84219
5	9828	8640	0.12	0.69	1188	0.88	9234	9215	9196	71476
6	9410	8820	0.06	0.39	589	0.94	9115	9110	9105	140783
7	9952	9115	0.08	0.64	836	0.92	9534	9525	9515	108453
8	9594	8584	0.11	0.58	1010	0.89	9089	9075	9061	81558
9	9749	8039	0.18	0.75	1710	0.82	8894	8853	8812	45830
	S2									
1	12691	9673	0.24	3.06	3019	0.76	11182	11080	10978	40670
2	12591	7525	0.4	1.42	5066	0.6	10058	9734	9420	18704
3	9742	7589	0.22	0.8	2153	0.78	8665	8598	8531	34338
4	10832	8345	0.23	1.12	2487	0.77	9589	9508	9427	36347
5	9828	7930	0.19	0.79	1898	0.81	8879	8828	8777	41055
6	9410	7119	0.24	0.76	2290	0.76	8264	8185	8106	29246
7	9952	6873	0.31	0.9	3079	0.69	8413	8271	8131	22220
8	9594	6115	0.36	0.87	3479	0.64	7855	7660	7470	16867
9	9749	5804	0.4	0.91	3945	0.6	7776	7522	7276	14342
	S3									
1	12691	11032	0.13	-2.52	1659	0.87	11862	11833	11804	84389
2	12591	10596	0.16	-15.39	1995	0.84	11593	11550	11507	66865
3	9742	8354	0.14	0.7	1387	0.86	9048	9021	8995	58657
4	10832	9598	0.11	1.34	1234	0.89	10215	10196	10178	84219
5	9828	8640	0.12	0.69	1188	0.88	9234	9215	9196	71476
6	9410	8820	0.06	0.39	589	0.94	9115	9110	9105	140783
7	9952	9115	0.08	0.64	836	0.92	9534	9525	9515	108453
8	9594	8584	0.11	0.58	1010	0.89	9089	9075	9061	81558
9	9749	8039	0.18	0.75	1710	0.82	8894	8853	8812	45830

S1: تنش در مرحله شیری دانه، S2: تنش در مرحله خمیری دانه، S3: تنش در مرحله سخت دانه.

S1: Stress in milky seed stage, S2: Stress in doughy seed Stage, S3: Stress in seed hardening



شکل ۲. نمودارهای سه‌بعدی بر اساس عملکرد در شرایط تنش و شرایط نرمال در مقابل شاخص‌های GMP و STI محاسبه شده. S2، S1، S3 و S4 به ترتیب تیمارهای شاهد و قطع آبیاری در مراحل گلدهی، شیری دانه و خمیری دانه هستند.

Fig. 2. Three-dimensional graphs based on performance in stress conditions and normal conditions against GMP and STI indicators. S1, S2, S3 and S4 are irrigation control and irrigation withdraw at flowering, milky, and doughy stages, respectively.

گیرد. از نظر فرناندز (Fernandez, 1992)، بهترین معیار برای انتخاب در شرایط تنش خشکی شاخصی است که بتواند ژنوتیپ‌های دارای عملکرد مطلوب را برای هر دو شرایط تنش و بدون تنش از سایر ژنوتیپ‌ها و گروه‌ها جدا کند. بر اساس نظر این پژوهشگر، همچنین بهترین شاخص‌ها آن‌هایی هستند که در هر دو شرایط تنش و غیر تنش همبستگی بالایی با عملکرد گیاه داشته باشند. بر این اساس می‌توان عنوان نمود که شاخص‌های تحمل موردبررسی، شاخص‌های

آن‌ها به جای یکدیگر است. از طرفی توجه به این نکته حائز اهمیت است که رابطه و مقادیر ضرایب همبستگی بین شاخص‌ها در مطالعات مختلف برای گونه‌های دیگر و حتی برای مجموعه ژنوتیپ‌های متنوع دیگر نیز ممکن است متفاوت باشد. در نتیجه، توصیه می‌شود که برای هر مطالعه و هر مجموعه ژنوتیپ، همبستگی بین شاخص‌ها جداگانه تخمین زده شده و سپس بر اساس این ارتباط یک یا چند شاخص جهت بررسی تحمل ژنوتیپ‌ها مورداستفاده قرار

شاخص‌ها با هم و گروه‌بندی ژنوتیپ‌ها بر اساس آن‌ها باشد ضروری به نظر می‌رسد. چنین روشی باید دارای قدرت تفکیک ژنوتیپ‌ها از هم بر اساس تک‌تک شاخص‌ها و همچنین بر اساس نتایج همه شاخص‌های مورد استفاده باشد. در پژوهش حاضر از روش گرافیکی نقشه حرارتی که به‌ندرت برای تشخیص ارقام متحمل و حساس استفاده شده، استفاده گردید. از طرفی، پژوهشگران مختلفی از این روش جهت گروه‌بندی تیمارها و یا صفات‌های اندازه‌گیری شده در آزمایش‌های خود استفاده کرده‌اند (Aliakbari et al., 2013; Ghasemi Soloklui et al., 2019; Riasat et al., 2019; Saed-Moucheshi et al., 2019; Zareei et al., 2022). بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از روش گرافیکی نقشه حرارتی، ژنوتیپ ET-85-04 به همراه ارقام سناباد و پاژ در یک گروه قرار گرفتند. از طرفی نتایج حاصل از روش نمودارهای سه‌بعدی و بای‌پلات بر اساس عملکرد در شرایط نرمال و تنش نیز این نتیجه را تأیید کرد؛ بنابراین، از نظر شاخص‌های تحمل تنش که با روش‌های تک و چند متغیره بررسی گردیدند، ژنوتیپ و ارقام نامبرده به‌احتمال زیاد برای هر دو شرایط نرمال و تنش به‌صورت نسبی مطلوب هستند.

نتیجه‌گیری نهایی

نتایج کلی این پژوهش نشان داد که جهت افزایش کارایی انتخاب ژنوتیپ‌های متحمل به تنش در برنامه‌های اصلاحی بهتر است که همه شاخص‌های تحمل تنش به‌صورت چندگانه و هماهنگ مورد بررسی قرار گیرد. همچنین مشخص گردید که ازجمله راه‌های مناسب جهت استخراج اطلاعات از تمامی شاخص‌های تحمل، استفاده از روش‌های چند متغیره شامل بای‌پلات بر اساس تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA) و همچنین نقشه حرارتی (Heatmap) است. بر اساس این روش‌ها، ژنوتیپ‌های شماره ۴ (ET-85-04)، ۱ (سناباد) و ۲ (پاژ) مناسب‌ترین ژنوتیپ‌ها برای تحمل شرایط تنش خشکی در مقایسه با سایر ژنوتیپ‌ها بودند. درنهایت، از آنجایی‌که ET-85-04 در ژنوتیپ‌های متحمل و تقریباً مقاوم و پایدار وجود داشت، می‌توان آن را به‌عنوان یک رقم جدید معرفی کرد و از آن برای اجرای برنامه‌های اصلاحی دیگر جهت افزایش عملکرد تریتیکاله در مناطق زیر کشت و تحت تنش خشکی استفاده نمود.

STI، GMP و SSI ازجمله شاخص‌هایی بودند که هم در شرایط تنش و هم در شرایط نرمال با عملکرد دانه ژنوتیپ‌های تریتیکاله در پژوهش حاضر همبستگی مثبت و بالایی داشتند که در مطابقت با نتایج فرناندز (Fernandez, 1992) است که در آن شاخص‌های فوق به‌عنوان بهترین شاخص برای غربالگری ژنوتیپ‌های مناسب در هر دو شرایط نرمال و تنش انتخاب شدند؛ بنابراین از این شاخص‌ها برای به تصویر کشیدن ژنوتیپ‌ها جهت بررسی مناسب‌تر آن‌ها در نمودارهای سه‌بعدی استفاده شد. رامیرز والجو و کلی (Ramirez-Vallejo and Kelly, 1998) اظهار داشتند که برای به‌نژادگران و پژوهشگرانی که عملکرد نسبی در هر دو شرایط برای آن‌ها مورد پسند است، GM مناسب‌ترین شاخص است. در مطالعه نقوی و همکاران (Naghavi et al., 2013)، STI، MP، GMP، YI، HM و DI بهترین شاخص‌ها برای شناسایی ژنوتیپ‌های مطلوب برای هر دو شرایط بودند. همچنین تحقیقات دیگری (Aliakbari et al., 2013; Bano et al., 2021; Naghavi et al., 2013; Nargeseh et al., 2020) وجود دارد که شاخص‌های متفاوتی را جهت بررسی مجموعه ژنوتیپ‌های خود معرفی کرده‌اند و نتایج آن‌ها با یکدیگر و همچنین با نتایج پژوهش حاضر تا حدودی متفاوت است.

طبق مطالعات قبلی عنوان شده و همچنین تعدادی دیگر از پژوهش‌ها (Aliakbari et al., 2013; Garbrecht et al., 2019; Patel et al., 2014)، STI، SSI و TOL و GMP شاخص‌های هستند که بیشترین استفاده را داشته‌اند. مقادیر این شاخص‌ها به همین دلیل برای ژنوتیپ‌های تریتیکاله در پژوهش حاضر با استفاده از نمودارهای سه‌بعدی مورد بررسی قرار گرفت. در مطالعه حاضر، ژنوتیپ‌های تریتیکاله ازجمله ژنوتیپ‌های شماره ۱، ۲ و ۴ جزء ژنوتیپ‌های بر اساس نمودارهای سه‌بعدی مناسب شرایط تنش رطوبتی و مناطق کم باران هستند. همچنین شانز و همکاران (Sánchez-Reinoso et al., 2020) از نمودار سه‌بعدی برای عملکرد دانه گندم و لوبیا در شرایط تنش رطوبتی و نرمال در مقابل STI، SSI و TOL برای شناسایی ژنوتیپ‌های مناسب این گیاهان استفاده کردند.

همان‌طور که ذکر شد، مجموعه داده‌های به‌دست‌آمده از آزمایش‌های مختلف نتایج متفاوتی را در ارتباط با برتری نسبی استفاده از شاخص‌های تحمل تنش نشان داده است. از این‌رو استفاده از روشی که قادر به ادغام نتایج تمام

منابع

- Aliakbari, M., Saed-Moucheshi, A., Hashemi Nasab, H., Pirasteh-Anosheh, H., Asad, M.T., Emam, Y., 2013. Suitable stress indices for screening resistant wheat genotypes under water deficit conditions. *International Journal of Agronomy Plant Production* 4, 2665-2672. <https://doi.org/2665-2672>, 2013
- Bano, H., Athar, H.u.R., Zafar, Z.U., Kalaji, H.M., Ashraf, M., 2021. Linking changes in chlorophyll a fluorescence with drought stress susceptibility in mung bean (*Vigna radiata* L. Wilczek). *Physiologia Plantarum* 172, 1244-1254. <https://doi.org/10.1111/ppl.13327>
- Blum, A., 2006. Drought adaptation in cereal crops: a prologue. *Drought Adaptation in Cereals*, 4, 3-15. <https://doi.org/10.1201/9781003578338>
- Fernandez, G.C., 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. <https://doi.org/10.1023/A:1018353200015>
- Flowers, T., Yeo, A., 1995. Breeding for salinity resistance in crop plants: where next? *Functional Plant Biology* 22, 875-884. <https://doi.org/10.22126/cbb.2023.8680.1033>
- Garbrecht, J.D., Zhang, X.C., Steiner, J.L., 2014. Climate change and observed climate trends in the fort cobb experimental watershed. *Journal of Environmental Quality* 43, 1319-27. <https://doi.org/10.2134/jeq2013.07.0286>
- Ghasemi Soloklui, A.A., Gharaghani, A., Oraguzie, N., Saed-Moucheshi, A., Vazifeshenas, M., 2019. Genetic diversity, heritability and inter-relationships of fruit quality and taste attributes among Iranian pomegranate (*Punica granatum* L.) cultivars using multivariate statistical analysis. *The International Journal of Tropical and Subtropical Horticulture* 74, 303-318. <https://doi.org/10.17660/th2019/74.6.5>
- Naghavi, M.R., Aboughadareh, A.P., Khalili, M., 2013. Evaluation of drought tolerance indices for screening some of corn (*Zea mays* L.) cultivars under environmental conditions. *Notulae Scientia Biologicae* 5, 388-393. <https://doi.org/10.15835/nsb539049>
- Nargeseh, H.E., Aghaalkhani, M., Rad, A.H.S., Mokhtassi-Bidgoli, A., Sanavy, S.A.M.M., 2020. Comparison of 17 rapeseed cultivars under terminal water deficit conditions using drought tolerance indices. *Journal of Agricultural Science and Technology* 22, 489-503. <http://dorl.net/dor/20.1001.1.16807073.2020.2.2.10.8>
- O'mara, J.G., 1953. The cytogenetics of Triticale. *The Botanical Review* 19, 587-605.
- Patel, A.R., Patel, M.L., Patel, R.K., Mote, B.M., 2019. Effect of different sowing date on phenology, growth and yield of rice—a review. *Plant Archives* 19, 12-16. <https://doi.org/10.1023/A:123455623>
- Ramirez-Vallejo, P., Kelly, J.D., 1998. Traits related to drought resistance in common bean. *Euphytica* 99, 127-136. <https://doi.org/10.1023/A:1018353200015>
- Riasat, M., Kiani, S., Saed-Moucheshi, A., Pessarakli, M., 2019. Oxidant related biochemical traits are significant indices in triticale grain yield under drought stress condition. *Journal of Plant Nutrition* 42, 111-126. <https://doi.org/10.1080/01904167.2018.1549675>
- Riasat, M., Pessarakli, M., Ahmadi Niaz, A., Saed-Moucheshi, A., 2018. Assessment of different wheat genotypes with altered genetic background in response to different salinity levels. *Journal of Plant Nutrition* 41, 1821-1833. <https://doi.org/10.1080/01904167.2018.1462383>
- Riasat, M., Saed-Moucheshi, A., Jafari, A.A., 2020. Effect of drought stress levels on seedling morpho-physiological traits of alfalfa (*Medicago sativa*) populations grown in glasshouse. *Journal of Rangeland Science* 10, 86-97. <https://doi.org/10.22126/cbb.2023.8680.1033>
- Rosielle, A., Hamblin, J., 1981. Theoretical aspects of selection for yield in stress and non-stress environment. *Crop Science* 21, 943-946. <https://doi.org/10.22126/cbb.2023.8680.1033>
- Saed-Moocheshi, A., Shekoofa, A., Sadeghi, H., Pessarakli, M., 2014. Drought and salt stress mitigation by seed priming with KNO₃ and urea in various maize hybrids: An experimental approach based on enhancing antioxidant responses. *Journal of Plant Nutrition* 37, 674-689.

- <https://doi.org/10.1080/01904167.2013.868477>
- Saed-Moucheshi, A. 2018. Evaluation of morphological, physiological, and molecular characteristics of triticale genotypes under drought stress condition, Shiraz University, Shiraz 17, 240-256. [In Persian]. <https://doi.org/10.1080/01904167.2013.868477>
- Saed-Moucheshi, A., Heidari, B., Zarei, M., Emam, Y., Pessarakli, M., 2013. Changes in antioxidant enzymes activity and physiological traits of wheat cultivars in response to arbuscular mycorrhizal symbiosis in different water regimes. Iran Agricultural Research 31, 35-50. [In Persian]. <https://doi.org/10.1094/CCHEM.2004.81.2.220>
- Saed-Moucheshi, A., Mozafari, A.A., Pessarakli, M., Rezaei Mirghaied, E., Sohrabi, F., Zaheri, S., Barzegar Marvasti, F., Baniasadi, F., 2022. Improved strategy of screening tolerant genotypes in drought stress based on a new program in R-language: a practical triticale breeding program. Journal of Plant Nutrition 2023, 1-18. <https://doi.org/10.1080/01904167.2022.2096467>
- Saed-Moucheshi, A., Pessarakli, M., Mozafari, A.A., Sohrabi, F., Moradi, M., Barzegar Marvasti, F., 2021a. Screening barley varieties tolerant to drought stress based on tolerant indices. Journal of Plant Nutrition, 42, 1-12. <https://doi.org/10.1080/01904167.2021.1963773>
- Saed-Moucheshi, A., Razi, H., Dadkhodaie, A., Ghodsi, M., Dastfal, M., 2019. Association of biochemical traits with grain yield in triticale genotypes under normal irrigation and drought stress conditions. Australian Journal of Crop Science 13, 272. <https://doi.org/10.22126/cbb.2023.8680.1033>
- Saed-Moucheshi, A., Safari, H., 2023a. Investigation of regulatory elements related to superoxide dismutase enzyme genes in wheat. Cereal Biotechnology and Biochemistry 2, 64-73. [In Persian]. <https://doi.org/10.22126/cbb.2023.8692.1034>
- Saed-Moucheshi, A., Safari, H., 2023b. Superoxide dismutase enzyme expression in root and shoot of triticale seedlings under drought stress conditions. Cereal Biochemistry and Biotechnology 2, 581-595. [In Persian]. <https://doi.org/10.22126/cbb.2023.8680.1033>
- Saed-Moucheshi, A., Sohrabi, F., Fasihfar, E., Baniasadi, F., Riasat, M., Mozafari, A.A., 2021b. Superoxide dismutase (SOD) as a selection criterion for triticale grain yield under drought stress: a comprehensive study on genomics and expression profiling, bioinformatics, heritability, and phenotypic variability. BMC Plant Biology 21, 1-19. <https://doi.org/10.1186/s12870-021-02919-5>
- Sánchez-Reinoso, A.D., Ligarreto-Moreno, G.A., Restrepo-Díaz, H., 2020. Evaluation of drought indices to identify tolerant genotypes in common bean bush (*Phaseolus vulgaris* L.). Journal of Integrative Agriculture 19, 99-107. [https://doi.org/10.1016/S2095/3119\(19\)62620-1](https://doi.org/10.1016/S2095/3119(19)62620-1)
- Serna-Saldivar, S.O., Guajardo-Flores, S., Viesca-Rios, R., 2004. Potential of triticale as a substitute for wheat in flour tortilla production. Cereal Chemistry. 81, 220-225. <https://doi.org/10.1094/CCHEM.2004.81.2.220>
- Zareei, E., Karami, F., Aryal, R., Saed-Moucheshi, A., 2022. Genotypic by phenotypic interaction affects the heritability and relationship among quantity and quality traits of strawberry (*Fragaria*×*Ananassa*). New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science 23, 1-20. <https://doi.org/10.1080/01140671.2022.2039725>