



University of Guilan
Faculty of Agricultural Sciences

Cereal Research

Vol. 14, No. 1, Spring 2024 (61-82)

doi: 10.22124/CR.2024.26439.1807

pISSN: 2252-0163 eISSN: 2538-6115



RESEARCH PAPER

OPEN ACCESS

Evaluation of tolerance to drought stress in bread wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars and landraces using tolerance indices

Maryam Hoseinpour Berenj-Abad¹, Morad Jafari² and Hadi Alipour^{3*}

1. Ph.D. Student, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran
 2. Associate Professor, Department of Plant Production and Genetics, Urmia University, Urmia, Iran
 3. Associate Professor, Department of Plant Production and Genetics, Urmia University, Urmia, Iran
- (* Corresponding author: ha.alipour@urmia.ac.ir)

Comprehensive abstract

Introduction

Drought is one of the most destructive stresses affecting the growth and development of plants. The increase in global population and wheat demand as well as drought period has increased the importance of breeding for drought tolerance in bread wheat. The use of selection indices for drought tolerance is an effective strategy to screen and identify wheat tolerant genotypes in wheat breeding programs. The objective of the current study was to investigate the relationships between tolerance indices, to determine the efficiency of indices in separating genotypes, and finally to select drought tolerant genotypes in bread wheat cultivars and landraces.

Materials and methods

To investigate the effect of drought stress on grain yield of bread wheat, an experiment was conducted in a simple alpha lattice design under normal irrigation and drought stress conditions in the research field of Dryland Agricultural Research Institute, Maragheh, Iran, in two consecutive years, 2017-2018 and 2018-2019. The plant materials were 300 bread wheat genotypes, including 210 landraces and 90 commercial cultivars (15 dryland and 75 irrigated cultivars; 64 spring, 15 winter, and 11 facultative cultivars). To evaluate sensitivity or tolerance of genotypes to drought stress and identify drought-tolerant genotypes, various indices such as tolerance index (TOL), mean productivity (MP), stress sensitivity index (SSI), stress tolerance index (STI), geometric mean productivity (GMP), harmonic mean (HM), drought tolerance index (DI), abiotic tolerance index (ATI), and modified stress tolerance index (MSTI) were calculated using grain yield under normal and stress conditions for all genotypes. Also, to increase the selection efficiency and screen drought tolerant genotypes, the SIIG index was calculated based on the integration of 12 studied indices. The analysis of variance was performed using Agricolae package, heirarchical clustering of bread wheat genotypes using heatmap3, RColorBrewer, dendextend, gplots and colorspace packages, bi-plot diagrams using factoextra package, and heatmap diagram of correlation among grain yield under normal irrigation and drought stress conditions and stress tolerance indices using corrplot package in R4.2.2 software.

Research findings

The results of analysis of variance for grain yield showed that the environment, genotype, and genotype×environment interaction effects were significant ($P < 0.001$). The significance of the effect of genotype indicates the appropriate diversity among the genotypes, and the significance of the interaction between genotype and environment indicates different responses of genotypes to changes in environmental conditions. Cluster analysis based on the data of each year and the average of two years classified the genotypes into three clusters. The results of principal component analysis (PCA)



showed that cultivars Shanghai, Naz, Falat, Bam and landraces 626358, 623109 and 621908 in the first year, as well as cultivars Shanghai, Koohdasht, Karim, Pishgam, and landraces 628189, 627460, and 627616 in the second year were drought tolerant genotypes, while based on the average data of two years, cultivars Koohdasht, Karim, Pishgam, Adl, Naz, and landraces 628189, 627460, 624944, and 627299 were identified as drought tolerant genotypes. The estimation of correlation coefficients showed that grain yield had a negative and significant correlation with SSI and TOL indices and a positive and significant correlation with other indices, especially MP, GMP, HM, STI and K₂STI.

Conclusion

The results of drought tolerance indices as well as the SIIG index, the old spring and irrigated cultivars Adl, Naz, and Shanghai and the new spring and dryland cultivars Karim and Koohdasht, as well as the landraces 626358 (originating from Isfahan) and 621908 (originating from Arak) were drought tolerant and high performance under two normal and drought stress conditions. The results obtained from this study provided valuable information on the selection of drought tolerant genotypes, which can be used to produce new cultivars with high yield potential in wheat breeding programs. The tolerant genotypes identified in this experiment can also be used as parents for genetic analysis, gene mapping, and improvement of drought stress tolerance in wheat.

Keywords: Drought stress, Grain yield, Ideal genotype selection index, Tolerant cultivars

Received: December 11, 2023

Accepted: March 8, 2024

Cite this article:

Hoseinpour Berenj-Abad, M., Jafari, M., & Alipour, H. (2024). Evaluation of tolerance to drought stress in bread wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars and landraces using tolerance indices. *Cereal Research*, 14(1), 61-82. doi: [10.22124/CR.2024.26439.1807](https://doi.org/10.22124/CR.2024.26439.1807).



ارزیابی تحمل به تنش خشکی در ارقام و توده‌های بومی گندم نان (*Triticum aestivum* L.) با استفاده از شاخص‌های تحمل

مریم حسین پور برنج‌آباد^۱، مراد جعفری^۲ و هادی علی پور^{۳*}

۱- دانشجوی دکتری، گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

۲- دانشیار، گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

۳- دانشیار، گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران (* نویسنده مسئول)

ha.alipour@urmia.ac.ir

چکیده جامع

مقدمه: تنش خشکی یکی از مخرب‌ترین تنش‌های غیرزیستی موثر بر رشد و نمو گیاهان است. افزایش جمعیت جهانی، افزایش میزان تقاضای گندم و همچنین دوره‌های خشک‌سالی، باعث افزایش اهمیت به‌نژادی برای تحمل به تنش خشکی در گندم نان شده است. کاربرد شاخص‌های گزینش برای تحمل به تنش خشکی، راه‌کار موثری جهت غربال و شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل گندم در راستای برنامه‌های به‌نژادی این محصول است. هدف از مطالعه حاضر، بررسی روابط بین شاخص‌های تحمل، تعیین کارایی شاخص‌ها در تفکیک ژنوتیپ‌ها و در نهایت گزینش ژنوتیپ‌های متحمل به تنش خشکی در رقم‌ها و توده‌های بومی گندم نان بود.

مواد و روش‌ها: به‌منظور بررسی تأثیر تنش خشکی بر عملکرد دانه گندم نان، آزمایشی در قالب طرح آلفا لاتیس ساده تحت دو شرایط آبیاری نرمال و شرایط تنش خشکی طی دو سال زراعی ۹۷-۱۳۹۶ و ۹۸-۱۳۹۷ در مزرعه تحقیقاتی موسسه تحقیقات کشاورزی دیم کشور- مراغه انجام شد. مواد گیاهی آزمایش، ۳۰۰ ژنوتیپ گندم نان شامل ۲۱۰ توده بومی و ۹۰ رقم تجاری گندم (۱۵ رقم دیم و ۷۵ رقم آبی، و از نظر تیپ رشدی ۶۴ رقم بهاره، ۱۵ رقم پاییزه و ۱۱ رقم بینابین) بود. برای ارزیابی میزان حساسیت یا تحمل ژنوتیپ‌ها به تنش خشکی و شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل به تنش، شاخص تحمل (TOL)، میانگین بهره‌وری (MP)، شاخص حساسیت به تنش (SSI)، شاخص تحمل به تنش (STI)، میانگین هندسی (GMP)، میانگین هارمونیک (HM)، شاخص تحمل به خشکی (DI)، شاخص تحمل به تنش غیرزیستی (ATI) و شاخص تغییر یافته تحمل به تنش (MSTI) با استفاده از عملکرد دانه در شرایط نرمال و تنش برای کلیه ژنوتیپ‌ها محاسبه شد. همچنین برای افزایش کارایی انتخابی و غربال ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی، شاخص SIIG بر مبنای ادغام ۱۲ شاخص مورد بررسی محاسبه شد. تجزیه واریانس داده‌ها با استفاده از پکیج agricolae، خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی ژنوتیپ‌های گندم نان با استفاده از پکیج‌های heatmap3، RColorBrewer، dendextend، gplots و colorspace، نمودارهای بای‌پلات با استفاده از پکیج factoextra و نمودار همبستگی بین عملکرد دانه تحت شرایط نرمال و تنش با شاخص‌های تحمل به تنش با استفاده از پکیج corrplot در نرم‌افزار R4.2.2 ترسیم شدند.

یافته‌های تحقیق: نتایج تجزیه واریانس عملکرد دانه نشان داد که اثر محیط، ژنوتیپ و برهمکنش ژنوتیپ×محیط بسیار معنی‌دار ($P < 0.001$) بود. معنی‌دار شدن اثر ژنوتیپ نشان دهنده تنوع مطلوب در بین ژنوتیپ‌ها و معنی‌دار شدن برهمکنش بین ژنوتیپ و محیط نشان دهنده واکنش متفاوت ژنوتیپ‌ها به تغییر شرایط محیطی است. تجزیه خوشه‌ای بر اساس داده‌های هر یک از سال‌های ارزیابی شده و نیز میانگین داده‌های دو سال، ژنوتیپ‌ها را در سه خوشه دسته‌بندی کرد. بر مبنای نتایج تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA)، رقم‌های زراعی Naz, Shanghai, Falat, Bam و توده‌های بومی ۶۲۶۳۵۸، ۶۲۳۱۰۹ و ۶۲۷۴۶۰ در سال اول و رقم‌های زراعی Pishgam, Karim, Koohdasht, Shanghai و توده‌های بومی ۶۲۸۱۸۹، ۶۲۷۴۶۰ و ۶۲۷۶۱۶ در سال دوم، ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی بودند، در حالی که بر اساس میانگین داده‌های دو سال، رقم‌های Naz, Adl, Pishgam, Karim, Koohdasht و توده‌های ۶۲۸۱۸۹، ۶۲۷۴۶۰، ۶۲۴۹۴۴ و ۶۲۷۲۹۹ به‌عنوان ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی شناسایی شدند. برآورد ضرایب همبستگی نشان داد که عملکرد دانه با شاخص‌های SSI و TOL همبستگی منفی و معنی‌دار و با سایر شاخص‌ها به‌ویژه شاخص‌های MP، GMP، HM، STI و K_2STI همبستگی مثبت و معنی‌دار داشت.

نتیجه‌گیری: نتایج به‌دست آمده از شاخص‌های تحمل به تنش و همچنین شاخص SIIG نشان داد که رقم‌های بهاره و آبی Naz, Adl و Shanghai از رقم‌های قدیمی گندم کشور و رقم‌های بهاره و دیم Karim و Koohdasht از رقم‌های جدید گندم کشور و همچنین توده‌های بومی ۶۲۶۳۵۸ (با منشأ اصفهان) و ۶۲۱۹۰۸ (با منشأ اراک) متحمل به خشکی و دارای عملکرد بالایی در هر دو شرایط نرمال و تنش خشکی بودند. نتایج به‌دست آمده از این مطالعه، اطلاعات ارزش‌مندی در زمینه‌های گزینش ژنوتیپ‌های متحمل ارائه داد که می‌توان از این اطلاعات برای تولید رقم‌های جدید با پتانسیل عملکرد بالا در برنامه‌های به‌نژادی گندم بهره برد. همچنین از ژنوتیپ‌های متحمل می‌توان به‌عنوان والدین برای تجزیه و تحلیل ژنتیکی، نقشه‌برداری ژنی و بهبود تحمل به خشکی در گندم استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: ارقام متحمل، تنش آبی، شاخص انتخاب ژنوتیپ ایده‌آل، عملکرد دانه

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۱۸

نحوه استناد به این مقاله:

حسین‌پور برنج‌آباد، مریم، جعفری، مراد، و علی‌پور، هادی. (۱۴۰۳). ارزیابی تحمل به تنش خشکی در ارقام و توده‌های بومی گندم نان (*Triticum aestivum* L.) با استفاده از شاخص‌های تحمل. تحقیقات غلات، ۱۴(۱)، ۸۲-۶۱
doi: [10.22124/CR.2024.26439.1807](https://doi.org/10.22124/CR.2024.26439.1807)

مقدمه

گندم (*Triticum aestivum* L.) یکی از غلات مهم و بخشی جدایی‌ناپذیر از رژیم غذایی روزانه در مناطق مختلف جغرافیایی جهان است (Ullah *et al.*, 2021). پیش‌بینی شده است با افزایش جمعیت جهانی از هفت میلیارد سال آینده تا سال ۲۰۵۰ میزان تقاضا برای گندم به میزان ۶۰ درصد افزایش یابد. میزان تولید سالانه گندم در سراسر جهان ۷۹۴ میلیون تن است، ولی طی سال‌های اخیر تقاضا برای محصولات کشاورزی و نیاز به افزایش تولید به‌طور چشم‌گیری رو به افزایش بوده است (FAO, 2022). افزایش جمعیت انسانی و تغییرات آب و هوا که منجر به دوره‌های خشک‌سالی مکرر شده است، تهدیدی جدی برای امنیت غذایی جهانی است و شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی پرمحصول، رویکردی کارآمد برای مقابله با این چالش‌ها است. گیاهان زراعی در معرض تنش‌های محیطی متعددی قرار می‌گیرند که همگی بر رشد و نمو گیاه تأثیر می‌گذارند و بهره‌وری گیاهان زراعی را مختل می‌کنند (Seki *et al.*, 2003). خشکی یکی از مخرب‌ترین تنش‌های محیطی در نظر گرفته می‌شود که بهره‌وری محصول را بیش از هر تنش محیطی دیگری کاهش می‌دهد (Lambers *et al.*, 2008). عملکرد و کیفیت گندم به شدت تحت تأثیر عوامل متعددی از جمله انواع رقم و تنش‌های زیستی و غیرزیستی مانند دمای بالا، تنش خشکی و غیره قرار می‌گیرد (Chen *et al.*, 2014; Khan *et al.*, 2022; Salam *et al.*, 2022). خشکی تا حدودی بر عملکرد گندم در طول فصل رشد تأثیر می‌گذارد، اما کاهش عملکرد بیش‌تر در مراحل زایشی و پر شدن دانه اتفاق می‌افتد (Cappelli & Cini, 2021).

آگاهی از تنوع ژنتیکی و مدیریت منابع ژنتیکی به‌عنوان اجزای مهم برنامه‌های به‌نژادی گیاهی تلقی می‌شود (Zhang *et al.*, 2006). توده‌های بومی و ارقام محلی گندم عموماً سازگاری بیش‌تری به شرایط محیطی خود دارند و در مقایسه با ارقام به‌نژادشده تنوع ژنتیکی بیش‌تری را نشان می‌دهند (Rauf *et al.*, 2010). این توده‌ها به‌دلیل سازگاری به شرایط مختلف آب و هوایی، تنش‌های محیطی و اعمال معیارهای مختلف گزینشی توسط کشاورزان در طول زمان، دارای پایه ژنتیکی متنوع و وسیعی

هستند (Bektas *et al.*, 2016). همچنین، توده‌های بومی حاوی ژن‌های مفید تحمل به تنش‌های مختلف مانند خشکی، شوری، سرما، آفات و بیماری‌ها هستند که می‌تواند در برنامه‌های به‌نژادی به‌منظور گسترش پایه ژنتیکی و افزایش عملکرد و تولید ارقام جدیدتر مورد استفاده قرار گیرد (Mir *et al.*, 2020). با توجه اینکه تحمل به خشکی یک صفت پیچیده است و عوامل مختلفی در آن دخالت دارند، بنابراین تصمیم‌گیری در مورد ژنوتیپ‌ها از نظر این صفت، پیچیده و گاهی اوقات با نتایج متناقض همراه است (Eivazi *et al.*, 2006). فرناندز (Fernandez *et al.*, 1992) عملکرد گیاهان تحت تنش خشکی (Y_s) و بدون تنش یا نرمال (Y_p) را به چهار گروه دسته‌بندی کرد که عبارت‌اند از: گروه A، ژنوتیپ‌هایی که در هر دو شرایط تنش و بدون تنش عملکرد بالایی دارند؛ گروه B، ژنوتیپ‌هایی که فقط در شرایط نرمال عملکرد خوبی دارند؛ گروه C، ژنوتیپ‌هایی که در شرایط تنش عملکرد نسبتاً بالاتری دارند؛ گروه D، ژنوتیپ‌هایی که در شرایط نرمال و بدون تنش عملکرد ضعیفی دارند. از آنجایی که به‌نژادگران به‌دنبال رقم‌هایی هستند که به طیف وسیعی از محیط‌های دارای تنش، سازگار باشند، از این‌رو، گزینش ژنوتیپ‌ها از نظر تحمل و یا حساسیت به تنش عموماً بر اساس معیارهایی صورت می‌گیرد که مبتنی بر عملکرد در هر دو شرایط نرمال و تنش هستند (Sio-Se Mardeh, *et al.*, 2006).

مطالعات صورت‌گرفته نشان می‌دهند که عملکرد گندم را می‌توان از طریق توسعه ارقام مقاوم به تنش‌های زیستی و غیرزیستی تا ۲۵ درصد افزایش داد (Afzal *et al.*, 2018, 2019; Amanuel *et al.*, 2018; Nehe *et al.*, 2019; Ali *et al.*, 2022). گزینش ژنوتیپ‌ها در شرایط تنش خشکی یکی از اصلی‌ترین وظایف به‌نژادگران برای شناسایی، استفاده از تنوع ژنتیکی و معرفی ارقام مقاوم به تنش است. امیری و همکاران (Amiri *et al.*, 2014) برای غربال ژنوتیپ‌های متحمل با پتانسیل عملکرد بالا در ژنوتیپ‌های گندم نان، شاخص‌های MP، GMP، STI و HM را بهترین شاخص‌ها معرفی کردند. کامرانی و همکاران (Kamrani *et al.*, 2016) سه شاخص MP، GMP و STI را به‌عنوان بهترین شاخص‌های تحمل به خشکی جهت تفکیک ژنوتیپ‌های حساس و مقاوم در گندم دوروم عنوان کردند.

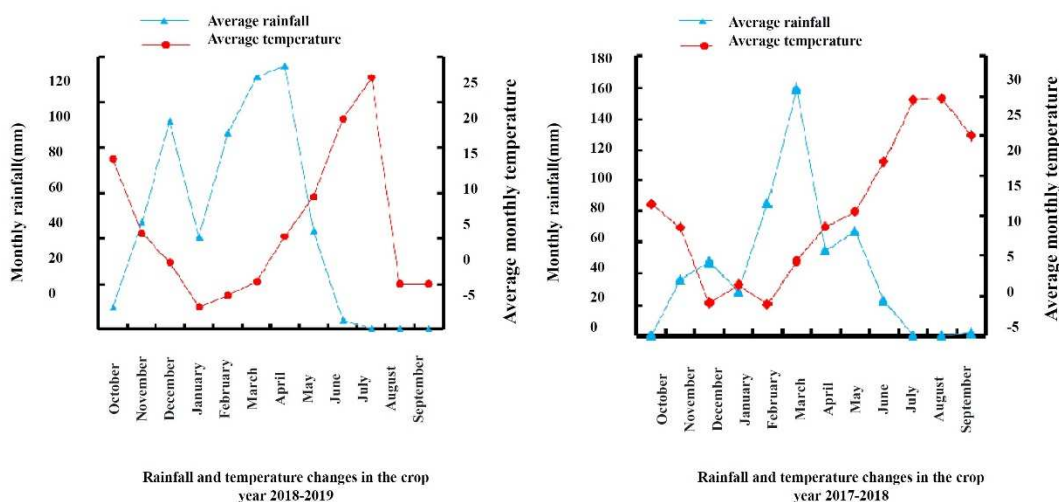
ژنوتیپ‌های متحمل به تنش خشکی در ارقام و توده‌های بومی گندم نان بود.

مواد و روش‌ها

مواد گیاهی این پژوهش، ۳۰۰ ژنوتیپ گندم نان شامل ۲۱۰ توده بومی جمع‌آوری شده از مناطق مختلف ایران و ۹۰ رقم تجاری معرفی شده طی یک قرن اخیر (جدول‌های تکمیلی ۱ و ۲) بود که به منظور شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل به تنش خشکی در قالب طرح آلفا لاتیس ساده با دو تکرار تحت دو شرایط آبیاری نرمال و تنش خشکی در موسسه تحقیقات کشاورزی دیم کشور- مراغه طی دو سال زرا عی ۱۳۹۶-۹۷ و ۱۳۹۷-۹۸ ارزیابی شدند. کشت به صورت دستی و در اوایل آبان انجام شد. بافت خاک مزرعه، لومی و لومی‌رسی و هر کرت آزمایشی شامل پنج خط ۱/۲ متری با فاصله بین خطوط ۲۰ سانتی‌متر بود. موسسه دیم مراغه در عرض جغرافیایی $37^{\circ}16'12''$ شمالی و طول جغرافیایی $46^{\circ}27'36''$ شرقی با ارتفاع ۱۷۳۰ متر از سطح دریای آزاد قرار دارد و از یک اقلیم نیمه‌خشک سرد هم‌مرز با فراسرد برخوردار است. میزان بارندگی بلندمدت آن $350/78$ میلی‌متر، مجموع روزهای زیر صفر بلندمدت ۱۳۱ روز و تعداد روزهای زیر صفر در بهار ۱۱ روز می‌باشد. داده‌های هواشناسی شامل متوسط بارندگی و دمای ماهیانه در دو سال اجرای آزمایش در شکل ۱ ارائه شده است.

شاخص‌های تحمل تنش خشکی DI ، YSI ، YI و $SNPI$ را می‌توان به عنوان معیارهای گزینش ژنوتیپ‌ها برای افزایش عملکرد دانه در شرایط تنش و MP ، HM ، GMP و STI را در هر دو شرایط تنش و بدون تنش در برنامه‌های به‌نژادی مورد استفاده قرار داد. (Aktaş, 2016).

استفاده از یک شاخص برای انتخاب بهترین ژنوتیپ‌ها ممکن است به تنهایی مطلوب نباشد، ولی اگر بتوان ارزیابی ژنوتیپ‌ها را با استفاده از صفات مختلف انجام داد، احتمال انتخاب ژنوتیپ ایده‌آل افزایش می‌یابد. بر این اساس، شاخص انتخاب ژنوتیپ ایده‌آل ($SIIG$; Selection index of ideal genotype) برای ادغام صفات مختلف و شناسایی ژنوتیپ برتر معرفی شد (Zali et al., 2015). از جمله مزیت‌های این شاخص امکان استفاده از صفاتی با معیارهای سنجشی متفاوت و دارای طبیعت مثبت و منفی می‌باشد و هیچ‌گونه محدودیتی ندارد (Zali et al., 2017). شاخص $SIIG$ یک مدل گزینش‌گر است و جهت انتخاب ایده‌آل‌ترین رقم‌ها و لاین‌ها از بین ژنوتیپ‌های مورد بررسی به کار می‌رود. از آنجایی که در مطالعات پیشین، بیش‌تر رقم‌های به‌نژادی شده ارزیابی شده‌اند و توده‌های بومی که دارای تنوع بالاتری نسبت به این ارقام هستند، کم‌تر مورد توجه به‌نژادگران قرار گرفته‌اند، بنابراین مطالعه حاضر اجرا شد که هدف از آن، بررسی روابط بین شاخص‌های تحمل، تعیین کارایی شاخص‌ها در تفکیک ژنوتیپ‌ها و در نهایت گزینش



شکل ۱- متوسط بارندگی و دمای ماهیانه در دو سال اجرای آزمایش (۹۸-۱۳۹۶)

Figure 1. Average monthly rainfall and temperature during two experimental years (2018-2020)

شاخص تغییر یافته تحمل تنش (Modified MSTI; Stress Tolerance Index یا K_iSTI) (Farshadfar & Stuka, 2002):

$$K_2STI = \frac{Y_s^2}{\bar{Y}_s^2}, \quad K_1STI \cdot K_1S = \frac{Y_p^2}{\bar{Y}_p^2} \quad (9)$$

در این روابط، Y_p و Y_s به ترتیب عملکرد در شرایط نرمال و تنش خشکی و \bar{Y}_p و \bar{Y}_s به ترتیب میانگین عملکرد در شرایط نرمال و تنش خشکی هستند. تجزیه داده‌ها با استفاده از پکیج *Agricolae* در نرم‌افزار R انجام شد. خوشه‌بندی سلسله مراتبی ژنوتیپ‌های گندم نان بر اساس شاخص‌های تحمل تنش بر اساس فاصله اقلیدسی و به روش وارد (Ward) با استفاده از پکیج‌های *heatmap3*، *colorspace*، *gplots*، *dendextend*، *RColorBrewer* و نمودارهای بای‌پلات با استفاده از پکیج *factoextra* و نمودار همبستگی بین صفات و شاخص‌ها با استفاده از پکیج *PerformanceAnalytics* و *RColorBrewer*، *corrplot* در نرم‌افزار R4.2.2 ترسیم شدند (<http://www.R-project.org>). همچنین، با استفاده از نرم‌افزار Excel با ادغام ۱۲ شاخص شامل Y_s ، Y_p ، TOL ، MP ، GMP ، STI ، ATI ، SSI ، DI ، HM ، K_1S ، K_1STI و K_2STI در یک شاخص واحد، شاخص انتخاب ژنوتیپ ایده‌آل (SIIG) محاسبه شد. برای محاسبه این شاخص ابتدا ماتریس داده‌های مربوط به شاخص‌های تحمل به تنش برای ژنوتیپ‌های مورد بررسی تشکیل و پس از نرمال‌سازی داده‌ها در ماتریس جدید برای هر صفت، فاصله هر ژنوتیپ از لاین ایده‌آل (d_i^+) و لاین ضعیف (d_i^-) به ترتیب با روابط (۱۰) و (۱۱) محاسبه شد:

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m (r_{ij} - r_j^+)^2} \quad i = 1, \dots, n \quad (10)$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (r_{ij} - r_j^-)^2} \quad i = 1, \dots, n \quad (11)$$

در این روابط، r_{ij} مقدار نرمال شده شاخص i ام ($i = 1, 2, \dots, n$) در لاین j ام ($j = 1, 2, \dots, n$) و r_j^+ و r_j^- به ترتیب مقدار نرمال شده لاین ایده‌آل و لاین ضعیف برای شاخص i ام ($i = 1, 2, \dots, n$) است (Zali et al., 2015). سپس شاخص انتخاب ژنوتیپ ایده‌آل (SIIG) با استفاده از رابطه (۱۲) محاسبه شد:

$$SIIG = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad \text{و} \quad 0 \leq SIIG \leq 1 \quad (12)$$

جهت بررسی میزان تحمل به خشکی ژنوتیپ‌های مورد مطالعه، شاخص‌های مختلف تحمل و حساسیت به تنش از قبیل شاخص تحمل (TOL)، میانگین بهره‌وری (MP)، شاخص حساسیت به تنش (SSI)، شاخص تحمل به تنش فرناندز (STI)، میانگین هندسی (GMP)، میانگین هارمونیک (HM)، شاخص تحمل به خشکی (DI)، شاخص تحمل تنش غیر زیستی (ATI) و شاخص تغییر یافته تحمل تنش (K_iSTI) بر اساس عملکرد دانه تحت شرایط نرمال و تنش با استفاده از روابط (۱) تا (۹) محاسبه شدند:

شاخص تحمل (TOL; Tolerance Index) (Rosielle & Hamblin, 1981):

$$TOL = Y_p - Y_s \quad (1)$$

میانگین بهره‌وری (MP; Mean Productivity) (Rosielle & Hamblin, 1981):

$$MP = \frac{Y_s + Y_p}{2} \quad (2)$$

شاخص حساسیت به تنش (SSI; Stress Susceptibility Index) (Fischer & Maurer, 1978):

$$SSI = \frac{1 - \frac{Y_s}{Y_p}}{1 - \frac{\bar{Y}_s}{\bar{Y}_p}} \quad (3)$$

شاخص تحمل تنش (STI; Stress Tolerance Index) (Fernandez, 1992):

$$STI = \frac{Y_p \times Y_s}{(\bar{Y}_p)^2} \quad (4)$$

میانگین هندسی بهره‌وری (GMP; Geometric Mean Productivity) (Fernandez, 1992):

$$GMP = \sqrt{Y_p \times Y_s} \quad (5)$$

میانگین هارمونیک (HM; Harmonic Mean) (Schneider et al., 1997):

$$HM = \frac{2(Y_p \times Y_s)}{Y_p + Y_s} \quad (6)$$

شاخص پاسخ به خشکی (DI; Drought Response Index) (Lan, 1998):

$$DI = \frac{Y_s^2}{\bar{Y}_p \times \bar{Y}_s} \quad (7)$$

شاخص تحمل تنش غیر زیستی (ATI; Abiotic Tolerance Index) (Moosavi et al., 2008):

$$ATI = \frac{Y_p - Y_s}{\bar{Y}_p} \times \sqrt{Y_p \times Y_s} \quad (8)$$

زراعی در مقایسه با توده‌های بومی بیش‌تر بود. در شرایط نرمال آبیاری، رقم‌های دیم عملکرد کم‌تر از رقم‌های آبی داشتند، ولی در شرایط تنش عملکرد رقم‌های دیم بیش‌تر بود. برای سایر شاخص‌ها نیز رقم‌های دیم نسبت به آبی، مقادیر بیش‌تر شاخص‌های K_1STI ، DI ، STI ، GMP ، MP ، Y_s و SSI ، ATI ، TOL ، Y_p و K_1STI ، K_1S را داشتند که نشان‌دهنده تحمل بیش‌تر و حساسیت کم‌تر رقم‌های دیم نسبت به آبی بود.

نتایج تجزیه خوشه‌ای بر اساس این شاخص‌ها نشان داد که در هر دو سال و همچنین میانگین دو سال، ژنوتیپ‌ها در سه خوشه دسته‌بندی شدند. در سال اول اجرای آزمایش (شکل ۲)، خوشه اول شامل ۶۱ ژنوتیپ (۲۰/۵ درصد کل ژنوتیپ‌ها) بود که ۱۹ درصد آن توده‌های بومی و ۲۴/۵ درصد رقم‌های زراعی بودند. در بین رقم‌های زراعی، ۲۳ درصد رقم‌های آبی و ۲۳ درصد رقم‌های دیم و از نظر تیپ ر شدی، ۲۲ درصد بهاره، ۲۷ درصد بینابین و ۳۳ درصد پاییزه بودند. خوشه دوم، ۷۵ ژنوتیپ (۲۵ درصد ژنوتیپ‌ها) داشت که ۱۷ درصد توده‌های بومی و ۴۲ درصد رقم‌های زراعی بودند. رقم‌های زراعی خود شامل ۴۳ درصد آبی و ۴۰ درصد دیم و از نظر تیپ ر شدی، ۴۵ درصد بهاره، ۲۷ درصد بینابین و ۴۰ درصد پاییزه بودند. خوشه سوم نیز شامل ۱۶۲ ژنوتیپ (۵۴/۵ درصد ژنوتیپ‌ها) بود که ۶۳ درصد آن توده‌های بومی و ۳۳/۵ درصد رقم‌های زراعی بودند. همچنین، ۳۴ درصد از رقم‌های زراعی، آبی و ۲۷ درصد دیم و از نظر تیپ رشدی نیز ۳۳، درصد بهاره، ۴۶ درصد بینابین و ۲۷ درصد پاییزه بودند.

مقدار SIIG بین صفر تا یک تغییر می‌کند و هر چه گزینه مورد نظر به لاین ایده‌آل نزدیک‌تر باشد مقدار SIIG آن به عدد یک نزدیک‌تر خواهد بود. بر اساس این روش، بهترین لاین، نزدیک‌ترین لاین به لاین (های) ایده‌آل و دورترین از لاین (های) ضعیف است (Zali *et al.*, 2015). در نهایت نمودار سه بعدی توسط نرم افزار Statgraphics نسخه ۱۶ رسم شد.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۱) نشان داد که اثر محیط، ژنوتیپ و برهمکنش ژنوتیپ \times محیط برای صفت عملکرد دانه معنی‌دار ($p < 0.001$) بود. این نتیجه نشان می‌دهد که در بین توده‌های بومی و ارقام زراعی گندم نان ایرانی تنوع مطلوبی برای عملکرد دانه وجود دارد. چنین نتیجه‌ای پیش از این برای نمونه‌های گندم با منشأ ایران گزارش شده است (Alipour *et al.*, 2021; Shabannejad *et al.*, 2022). تنش خشکی عملکرد دانه را در تمامی ژنوتیپ‌ها کاهش داد. میانگین عملکرد دانه در شرایط نرمال و تنش در سال اول به ترتیب برابر با ۱/۷۰۷ و ۰/۹۳ گرم در بوته و در سال دوم به ترتیب برابر با ۱/۷۰۳ و ۰/۹۳۴ گرم در بوته بود. بنابراین، میانگین عملکرد دانه تحت شرایط تنش خشکی در سال اول ۵۴/۴۸ درصد و در سال دوم ۵۴/۸۴ درصد کم‌تر از شرایط آبیاری نرمال بود. این کاهش پاسخ‌های قابل انتظار گیاهان زراعی به تنش خشکی است (Dietz *et al.*, 2021)، و پیش از این در گندم نان گزارش شده است (Eftekhari *et al.*, 2020; Chowdhury *et al.*, 2021; Abou-Elwafa & Shehzad, 2021; Rabieyan *et al.*, 2022).

مقایسه میانگین شاخص‌های مختلف تنش (جدول ۲) مطابق انتظار نشان داد که عملکرد در شرایط نرمال بیش‌تر از شرایط تنش و همچنین عملکرد رقم‌های

جدول ۱- تجزیه واریانس ۲۹۸ ژنوتیپ گندم نان برای عملکرد دانه

Table 1. Analysis of variance of 298 bread wheat genotypes for grain yield

Sources of variation	df	Mean square
Environment	3	118.8520641***
Replication / Environment	4	0.0110137
Genotype	297	0.5435181***
Environment \times Genotype	891	0.0682458***
Error	1188	

*** Significant at 0.1% probability level.

جدول ۲- مقایسه میانگین شاخص‌های مختلف تنش در هر یک از سال‌های آزمایش

Table 2. Comparison of means of different stress indices in each experimental year

Wheat	Year	Yp	Ys	TOL	MP	GMP	STI	ATI	SSI	DI	HM	KiSTI.K1S	K ₂ STI
Landrace	First year	1.624	0.889	0.735	1.257	1.194	0.508	1.645	0.976	0.549	1.136	0.944	0.963
	Second year	1.632	0.889	0.743	1.261	1.197	0.512	1.667	0.985	0.545	1.138	0.956	0.963
	Average two years	1.628	0.889	0.739	1.259	1.196	0.510	1.656	0.983	0.544	1.138	0.948	0.961
Cultivar	First year	1.901	1.036	0.865	1.469	1.396	0.688	2.241	0.989	0.632	1.328	1.279	1.295
	Second year	1.879	1.038	0.842	1.458	1.388	0.680	2.162	0.971	0.643	1.322	1.251	1.295
	Average of 2 years	1.890	1.037	0.853	1.464	1.393	0.684	2.201	0.983	0.634	1.327	1.262	1.291
Dryland	First year	1.894	1.088	0.806	1.491	1.427	0.723	2.064	0.947	0.700	1.367	1.251	1.459
	Second year	1.888	1.084	0.804	1.486	1.424	0.722	2.098	0.942	0.691	1.365	1.257	1.433
	Average two years	1.891	1.086	0.805	1.488	1.427	0.723	2.080	0.948	0.691	1.368	1.251	1.443
Wateriness	First year	1.903	1.026	0.877	1.464	1.390	0.682	2.277	0.997	0.618	1.320	1.285	1.262
	Second year	1.877	1.028	0.849	1.453	1.381	0.672	2.175	0.977	0.634	1.314	1.249	1.267
	Average two years	1.890	1.027	0.863	1.459	1.386	0.677	2.225	0.990	0.623	1.318	1.264	1.261
Spring	First year	1.913	1.052	0.861	1.483	1.412	0.705	2.268	0.977	0.646	1.345	1.300	1.335
	Second year	1.888	1.061	0.827	1.474	1.407	0.701	2.172	0.946	0.668	1.344	1.269	1.351
	Average two years	1.901	1.057	0.844	1.479	1.411	0.703	2.220	0.965	0.653	1.347	1.282	1.339
Facultative	First year	1.869	1.046	0.823	1.458	1.389	0.675	2.088	0.953	0.661	1.326	1.222	1.312
	Second year	1.807	1.014	0.793	1.410	1.343	0.630	1.911	0.952	0.649	1.280	1.136	1.242
	Average two years	1.838	1.030	0.808	1.434	1.367	0.652	1.995	0.954	0.653	1.304	1.176	1.274
Winter	First year	1.874	0.960	0.914	1.417	1.334	0.626	2.239	1.067	0.551	1.257	1.234	1.114
	Second year	1.894	0.954	0.940	1.424	1.338	0.629	2.305	1.093	0.534	1.259	1.255	1.091
	Average two years	1.884	0.957	0.927	1.421	1.336	0.627	2.271	1.081	0.541	1.259	1.242	1.099

Yp, grain yield under normal conditions; Ys, grain yield under drought stress conditions; TOL, tolerance index; MP, mean productivity; GMP, geometric mean productivity; STI, stress tolerance index; ATI, abiotic tolerance index; SSI, stress susceptibility index; DI, drought response index; HM, harmonic mean; KiSTI.K1S and K₂STI, modified stress tolerance index.

بودند (شکل ۳). ژنوتیپ‌های خوشه اول که عمدتاً شامل توده‌های بومی بودند، ژنوتیپ‌های حساس و ژنوتیپ‌های خوشه دوم، ژنوتیپ‌های نیمه‌متحمل به خشکی بودند. در مقابل، خوشه سوم تعداد رقم‌های زراعی و رقم‌های دیم و همچنین رقم‌های با تیپ رشد بهاره بیش‌تری را به‌خود اختصاص داد. ژنوتیپ‌های موجود در این خوشه، بالاترین عملکرد دانه را در هر دو شرایط نرمال و تنش خشکی داشتند. این گروه ضمن داشتن مقادیر بالا برای بیش‌تر شاخص‌ها، مقادیر پایینی برای شاخص‌های TOL و SSI داشتند و متحمل‌ترین ژنوتیپ‌ها به تنش خشکی بودند.

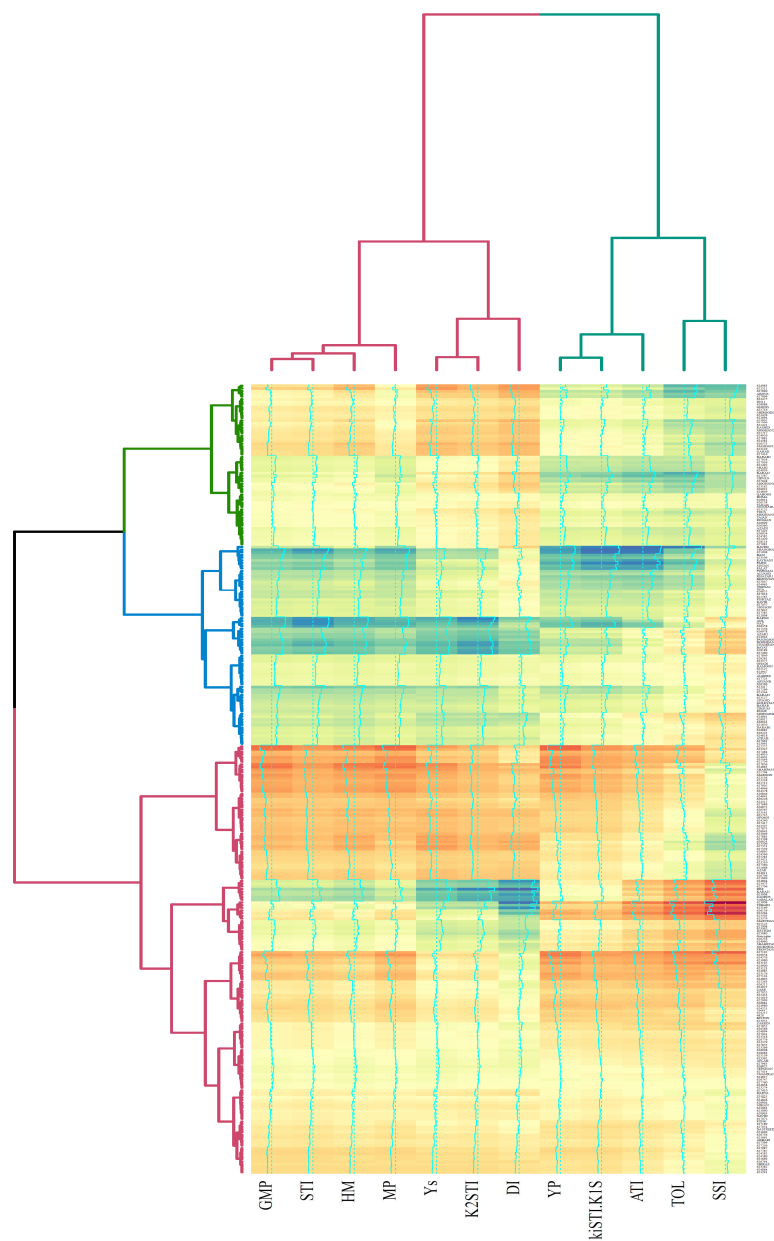
تجزیه خوشه‌ای بر مبنای میانگین عملکرد دانه دو سال نیز همانند هر یک از سال‌ها، ژنوتیپ‌های گندم را به سه گروه تفکیک کرد (شکل ۴). خوشه اول، ۱۰۶ ژنوتیپ (۳۶ درصد کل ژنوتیپ‌ها) را به‌خود اختصاص داد که ۲۸ درصد آن توده‌های بومی و ۵۵ درصد آن رقم‌های زراعی بودند. ۵۵ درصد از ارقام زراعی، ارقام آبی و ۵۴ درصد دیم، و همچنین ۵۸ درصد دارای تیپ رشد بهاره، ۴۶ درصد بی‌نابین و ۴۷ درصد پاییزه بودند. در خوشه دوم، ۶۰ ژنوتیپ (۲۰ درصد کل ژنوتیپ‌ها) گروه بندی شد که ۱۹ درصد بومی و ۲۲ درصد رقم‌های زراعی بودند. از بین رقم‌های زراعی، ۲۰ درصد آبی و ۳۳ درصد دیم و همچنین ۱۹ درصد دارای تیپ رشد بهاره، ۲۷ درصد بی‌نابین و ۳۳ درصد پاییزه بودند. خوشه سوم نیز شامل ۱۳۲ ژنوتیپ (۴۴ درصد کل ژنوتیپ‌ها) بود که ۵۳ درصد آن توده‌های بومی و ۲۳ درصد آن رقم‌های زراعی بودند. همچنین، ۲۵ درصد از رقم‌های زراعی، آبی و ۱۳ درصد دیم و ۲۳ درصد دارای تیپ رشد بهاره، ۲۷ درصد بی‌نابین و ۲۰ درصد پاییزه بودند. در این شرایط، ژنوتیپ‌های گروه اول که شامل تعداد زیادی از رقم‌های زراعی به‌نژادی شده بودند، مطلوب‌ترین ژنوتیپ‌ها بودند. این نتیجه قابل پیش‌بینی بود، زیرا در فرآیند معرفی رقم‌های زراعی، گزینش‌های متعددی برای عملکرد دانه صورت می‌گیرد. تأثیر فرآیندهای به‌نژادی بر بهبود عملکرد دانه گندم‌های ایرانی و پایداری آن‌ها پیش از این نیز تأیید شده است (Alipour et al., 2019).

ژنوتیپ‌های موجود در خوشه دوم که اغلب حاوی رقم‌های زراعی بودند و بیش‌تر شامل رقم‌های دیم و نیز رقم‌های با تیپ رشدی بهاره و پاییزه بودند، از نظر بیش‌تر شاخص‌ها به‌جز SSI، TOL، ATI و K_1STI مقادیر بالایی داشتند و متحمل‌ترین ژنوتیپ‌ها به تنش خشکی بودند. از نظر شاخص‌های TOL و SSI نیز ژنوتیپ‌های این گروه مقادیر پایینی برای این دو شاخص داشتند و از این‌رو تحمل آن‌ها به تنش خشکی بیش‌تر بود. از طرف دیگر، بر اساس شاخص‌های K_2STI ، Y_s ، STI، HM، GMP، MP و DI ژنوتیپ‌هایی متحمل محسوب می‌شوند که مقادیر بیش‌تری برای این شاخص‌ها داشته باشند. بر این اساس، ژنوتیپ‌های گروه اول نیمه‌متحمل و گروه سوم شامل حساس‌ترین ژنوتیپ‌ها به خشکی بودند. از سوی دیگر، شاخص‌های مورد مطالعه در سال اول به دو گروه تفکیک شدند. شاخص‌های ATI، TOL و SSI در یک گروه و سایر شاخص‌ها به همراه عملکرد دانه در هر دو محیط در گروه دیگر قرار گرفتند.

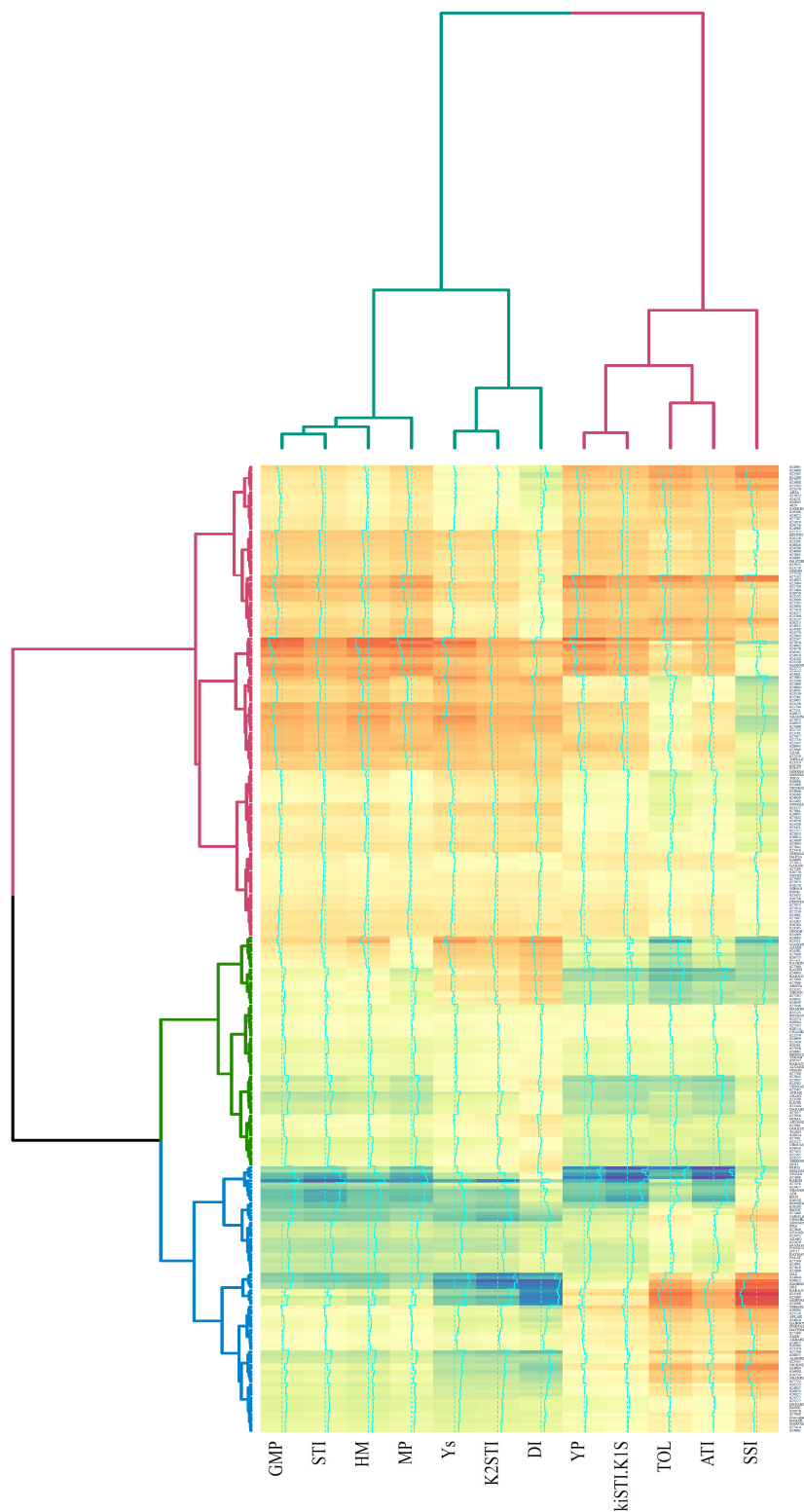
مطابق با سال اول، در سال دوم اجرای آزمایش نیز ژنوتیپ‌ها بر مبنای شاخص‌های مورد مطالعه در سه خوشه گروه‌بندی شدند (شکل ۳). خوشه اول، ۱۴۵ ژنوتیپ (۴۹ درصد کل ژنوتیپ‌ها) را به‌خود اختصاص داد که ۵۹ درصد توده‌های بومی و ۲۵/۵ درصد رقم‌های زراعی بودند و از بین ارقام زراعی، ۲۷ درصد آبی و ۲۰ درصد دیم بودند. همچنین، ۴۴ درصد از ارقام زراعی از تیپ رشد بهاره، ۵۵ درصد بی‌نابین و ۵۳ درصد پاییزه بودند. در خوشه دوم، ۷۱ ژنوتیپ (۲۴ درصد کل ژنوتیپ‌ها) قرار گرفت که ۲۱ درصد توده‌های بومی و ۳۰ درصد رقم‌های زراعی بودند. از بین ارقام زراعی نیز ۲۹ درصد آبی و ۳۳ درصد دیم، و همچنین، ۲۵ درصد دارای تیپ رشد بهاره، ۳۶ درصد بی‌نابین و ۹ درصد پاییزه بودند. خوشه سوم دارای ۸۲ ژنوتیپ (۲۷ درصد کل ژنوتیپ‌ها) بود که ۲۰ درصد آن را توده‌های بومی و ۴۴/۵ درصد آن را رقم‌های زراعی تشکیل دادند. از رقم‌های زراعی نیز ۴۴ درصد آبی و ۴۷ درصد دیم و همچنین از نظر تیپ رشدی، ۵۳ درصد بهاره، ۲۰ درصد بی‌نابین و ۲۷ درصد پاییزه

پتانسیل استفاده از این ژنوتیپ‌ها را در برنامه‌های به‌نژادی به‌دلیل وجود آلل‌های مطلوب نشان می‌دهد. ارزیابی دقیق ارقام محلی تحت شرایط خشکی یکی از روش‌های کارآمد برای مقابله با پیامدهای زیان‌بار تنش‌ها می‌باشد (Anwaar *et al.*, 2020). تحمل بالای برخی از توده‌های بومی به تنش خشکی قبلاً نیز گزارش شده است (Rabieyan *et al.*, 2023).

نتایج نشان داد که تعدادی از رقم‌های زراعی به‌نژادی شده در گروه نمونه‌های حساس به تنش خشکی گروه‌بندی شدند که لازم است در کارهای به‌نژادی و تولید رقم‌های جدید که وسعت مناطق تحت تنش خشکی روز به روز در حال افزایش است، مد نظر قرار گیرد. از طرف دیگر، وجود برخی از توده‌های بومی در گروه متحمل به تنش خشکی

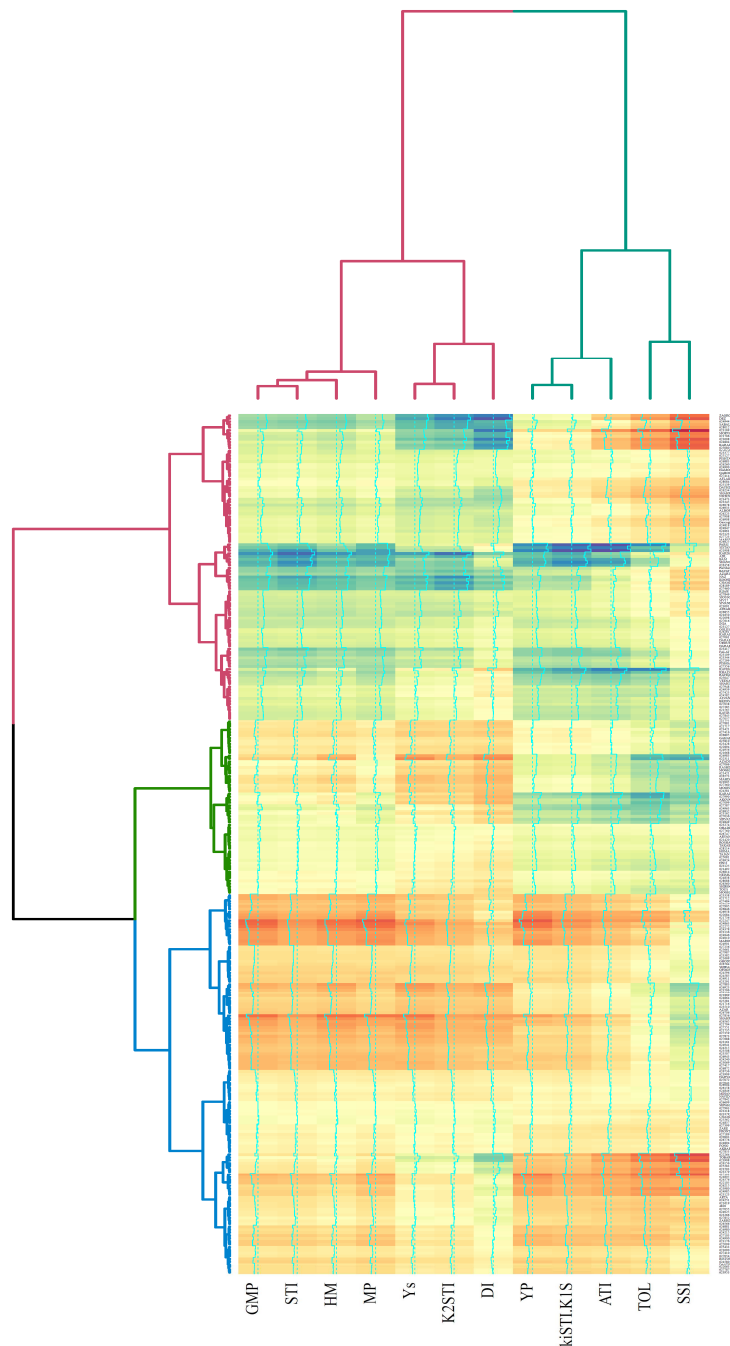


شکل ۲- تجزیه خوشه‌ای ژنوتیپ‌های گندم بر مبنای عملکرد در شرایط نرمال و تنش خشکی و شاخص‌های تحمل تنش در سال اول (۹۷-۱۳۹۶)
Figure 2. Cluster analysis of wheat genotypes based on grain yield in normal and drought stress conditions and stress tolerance indices in the first year (2017-18)



شکل ۳- تجزیه خوشه‌ای ژنوتیپ‌های گندم بر مبنای عملکرد در شرایط نرمال و تنش خشکی و شاخص‌های تحمل تنش در سال دوم (۱۳۹۷-۹۸)

Figure 3. Cluster analysis of wheat genotypes based on grain yield in normal and drought stress conditions and stress tolerance indices in the second year (2018-19)



شکل ۴- تجزیه خوشه‌ای ژنوتیپ‌های گندم بر مبنای عملکرد در شرایط نرمال و تنش خشکی و شاخص‌های تحمل تنش بر اساس میانگین دو سال اجرای آزمایش

Figure 4. Cluster analysis of wheat genotypes based on grain yield in normal and drought stress conditions and stress tolerance indices using average two years

مناسب‌ترین معیارها برای گزینش ارقام متحمل گندم معرفی کردند. افتخاری و همکاران (Eftekhari *et al.*, 2020) شاخص‌های STS, YI, GMP و MP, STI, HM را بهترین شاخص‌های تحمل به تنش برای غربال ژنوتیپ‌های گندم

تا کنون در تحقیقات متعددی از شاخص‌های تحمل به تنش برای گزینش ژنوتیپ‌های گندم متحمل به خشکی استفاده شده است. در یک مطالعه، شیبانی راد و همکاران (Shibani Rad *et al.*, 2018) دو شاخص STI و MP را به‌عنوان

ATI بود، در حالی که سایر شاخص‌ها به همراه عملکرد دانه در شرایط آبیاری نرمال و تنش خشکی از نظر مؤلفه اول مقادیر بیش‌تری داشتند. اگر در شکل ۵ نمودارهای A، C و E را به ترتیب روی نمودارهای B، D و F تصور کنیم، آن‌گاه، طبق شاخص‌های مربوطه می‌توان نتیجه‌گیری کرد که در سال اول رقم‌های زراعی بهاره Naz، Shanghai، Falat، Bam به همراه توده‌های بومی ۶۲۶۳۵۸، ۶۲۳۱۰۹ و ۶۲۱۹۰۸، در سال دوم دو رقم زراعی بهاره Shanghai و پاییزه پیشگام، رقم‌های دیم کوه‌دشت و کریم به همراه توده‌های بومی ۶۲۸۱۸۹، ۶۲۷۴۶۰ و ۶۲۷۶۱۶ و در میانگین دو سال، رقم‌های دیم کوه‌دشت و کریم، رقم پاییزه پیشگام، رقم‌های بهاره عدل و ناز و توده‌های بومی ۶۲۷۴۶۰، ۶۲۸۱۸۹، ۶۲۴۹۴۴ و ۶۲۷۲۹۹ ژنوتیپ‌های متحمل به تنش خشکی بودند، زیرا این ژنوتیپ‌ها پراکنش مشابهی با شاخص‌های تحمل به تنش داشتند.

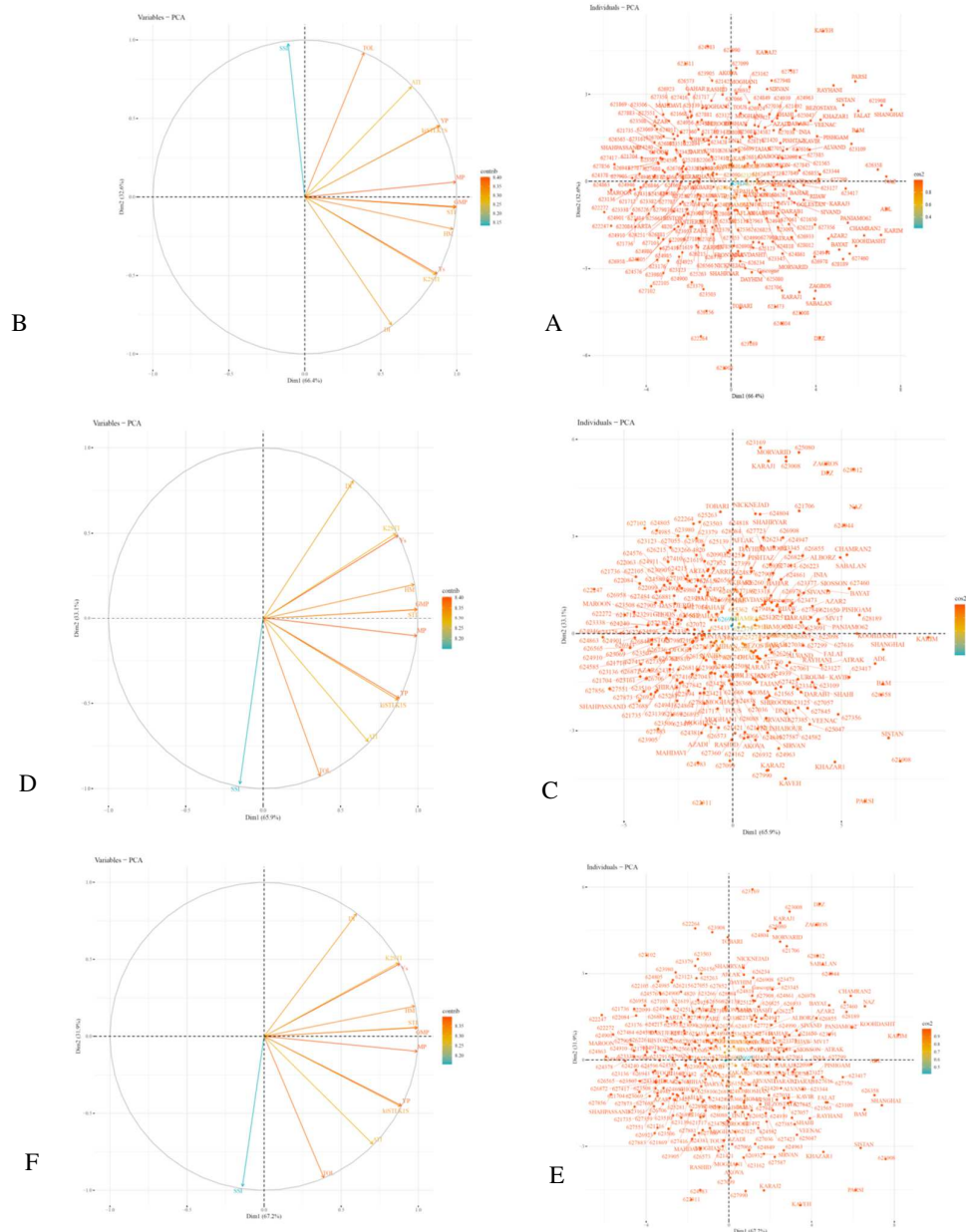
الگوی زاویه بین بردار شاخص‌ها به تفکیک دو سال اجزای آزمایش و همچنین میانگین دو سال، تشابه بالایی با یکدیگر داشتند، به طوری که شاخص‌های SSI، TOL و ATI زاویه برداری بیش‌تری با سایرین داشتند. در تجزیه خوشه‌ای نیز شاهد آن بودیم که این شاخص‌ها در یک گروه قرار گرفتند. در طرف مقابل، شاخص‌های MP، GMP، HM، STI، DI و K₂STI که زاویه برداری کم‌تری نسبت به هم دارند، دارای همبستگی بیش‌تری هستند و در نتیجه این شاخص‌ها در گزینش ژنوتیپ‌های مطلوب تا حد زیادی مشابه هم عمل خواهند کرد. کارایی تجزیه به مولفه‌های اصلی در ارزیابی تحمل به تنش خشکی با استفاده از شاخص‌های مختلف قبلاً به اثبات رسیده است (Dorostkar et al., 2015; Naghavi et al., 2023). در مجموع، نتایج این مطالعه نشان داد که می‌توان ژنوتیپ‌های برتر را بر اساس مقادیر بالای MP، GMP، HM، STI و K₂STI و مقادیر کم‌تر SSI و TOL انتخاب کرد. از این‌رو، بر اساس شاخص‌های MP، GMP، STI، HM، DI و K₂STI ژنوتیپ‌های Adl، Naz، Pishgam، Bam، Shanghai، Naz، Shanghai، Falat، Bam به همراه توده‌های بومی ۶۲۳۴۱۷ و ۶۲۶۳۵۸، ۶۲۱۹۰۸ ژنوتیپ‌های Maroon، Ofogh، Shahpasand، ۶۲۴۳۷۸ و ۶۲۷۸۵۶ دارای کم‌ترین مقدار بودند. از طرف دیگر، بر اساس شاخص SSI ژنوتیپ‌های Navid، Mihan، Ofogh، ۶۲۷۸۵۳، ۶۲۳۵۰۷ و ۶۲۳۹۰۹ کم‌ترین مقدار و ژنوتیپ‌های ۶۲۲۳۱۱، ۶۲۴۹۸۳، Mahdavi، ۶۲۷۳۶۰

دانستند و بر اساس آن‌ها رقم‌های مهدوی، کویر و روشن را به عنوان رقم‌های متحمل به خشکی گزینش کردند. در یک تحلیل شبکه عصبی مصنوعی مشخص شد که به ترتیب شاخص‌های MP و YI بیش‌ترین اهمیت نسبی را در غربال ژنوتیپ‌های گندم متحمل به خشکی داشتند و انتخاب بر اساس شاخص DI منجر به گزینش ژنوتیپ‌های مطلوب بر اساس صفات زراعی و فیزیولوژیک شد (Rahimi et al., 2019). این محققین، در بررسی شاخص‌های تحمل به خشکی بر اساس عملکرد دانه و سایر صفات در رقم‌های زراعی و توده‌های بومی گندم نان گزارش کردند که شاخص‌های SSI، ATI و TOL در یک گروه متمایز از سایر شاخص‌ها قرار گرفتند و ژنوتیپ‌ها بر اساس این شاخص‌ها به چهار گروه تفکیک شدند و ژنوتیپ‌های پرمحصول و مقاوم به خشکی در یک گروه قرار گرفتند (Rabieyan et al., 2023). بالستا و همکاران (Ballesta et al., 2020) از تجزیه ارتباطی برای شاخص‌های SSI، STI، TOL و YSI جهت شناسایی مکان‌های ژنی درگیر در تحمل به خشکی در گندم استفاده کردند. رقم‌های گندم کوه‌دشت، کریم، پیشگام و بام که در دو سال اجرای آزمایش ژنوتیپ‌های متحملی بودند، بعد از سال ۲۰۰۰ میلادی معرفی شده‌اند و از رقم‌های جدید محسوب می‌شوند. این موضوع ثابت می‌کند که تحمل به خشکی در معرفی رقم‌های جدید مورد توجه به‌نژادگران بوده است. با این وجود برخی از رقم‌های متحمل دیگر نظیر ناز، عدل و فلات که در یکی از سال‌ها متحمل به خشکی بود، در سال‌های خیلی دور معرفی شده‌اند.

نتایج تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA) نشان داد که مؤلفه‌های اول و دوم به ترتیب در سال اول اجرای آزمایش ۶۶/۴ و ۳۲/۶ درصد، در سال دوم ۶۵/۹ و ۳۳/۱ درصد و بر اساس میانگین داده‌های دو سال ۶۷/۲ و ۳۱/۹ درصد از تغییرات موجود در داده‌ها را توجیه کردند (شکل ۵). با توجه به همبستگی بالای بین شاخص‌های تحمل به تنش خشکی، دو مؤلفه اول درصد بیش‌تری از تغییرات را توجیه کردند (Eslami et al., 2021). بنابراین می‌توان با ترسیم بای‌پلات بر اساس این دو مؤلفه، دید بهتری نسبت به تنوع ژنوتیپ‌ها در پاسخ به تنش خشکی داشت. بیش‌ترین مقادیر مؤلفه دوم مربوط به شاخص‌های SSI، TOL و

همکاران (Amiri *et al.*, 2014) نیز به نتایج مشابهی با نتایج پژوهش حاضر دست یافتند و برخی از توده‌های بومی گندم متحمل به تنش خشکی را شناسایی کردند.

Rashid و Azadi بیش‌ترین مقدار را در بین همه ژنوتیپ‌ها به‌خود اختصاص دادند. شیبانی راد و همکاران (Shibani Rad *et al.*, 2018) و همچنین امیری و



شکل ۵- تجزیه به مؤلفه‌های اصلی بر اساس عملکرد دانه تحت شرایط آبیاری نرمال و تنش خشکی و شاخص‌های تنش در سال اول (A) و (B)، سال دوم (C) و (D) و میانگین دو سال (E) و (F)

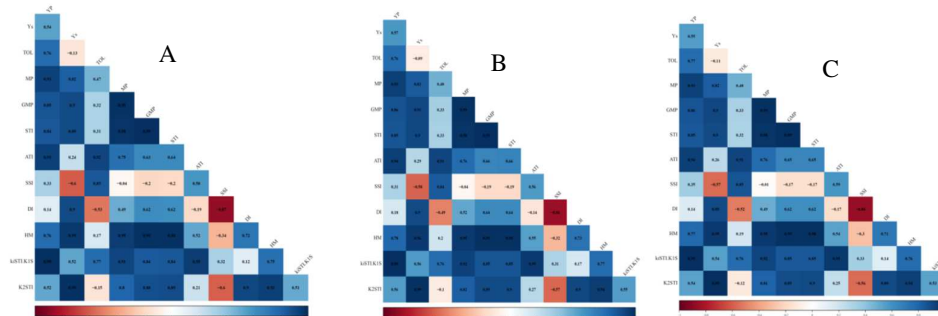
Figure 5. Principal component analysis based on grain yield under normal irrigation and drought stress conditions and stress indices in the first (A and B), second (C and D), and average two years (E and F)

به‌عنوان مهم‌ترین صفت با شاخص‌های SSI و TOL و همبستگی منفی و با سایر شاخص‌ها به‌ویژه MP، GMP، HM، STI و K_2STI همبستگی مثبت داشت (شکل ۶).

برآورد ضرایب همبستگی بین شاخص‌ها (شکل ۶) نشان داد که شاخص‌های SSI، ATI و TOL رابطه ضعیف و معکوسی با سایر شاخص‌ها داشتند. عملکرد دانه

خشکی (DI) و شاخص حساسیت به تنش (SSI) همبستگی منفی و با میانگین بهره‌وری (MP) و میانگین هندسی بهره‌وری (GMP) در شرایط تنش خشکی همبستگی مثبت نشان داد. در تحقیقی دیگر، گزارش شد که عملکرد دانه با شاخص‌های تحمل به تنش MP، STI و GMP همبستگی مثبت و معنی‌داری داشت، در حالی‌که با شاخص‌های SSI و TOL در شرایط تنش همبستگی منفی نشان داد (Dorostkar *et al.*, 2015). رحمتی و همکاران (Rahmati *et al.*, 2020) نیز در ارزیابی تحمل به خشکی در ژنوتیپ‌های گندم دوروم گزارش کردند که شاخص‌های MP، GMP، HM و STI دارای همبستگی و معنی‌داری با عملکرد دانه تحت شرایط تنش و بدون تنش بودند. در تحلیل همبستگی عملکرد دانه ارقام گندم بهاره نیز مشخص شد که شاخص‌های MP، GMP، STI و HM مناسب‌ترین شاخص‌ها برای انتخاب ارقام متحمل به تنش خشکی بودند (Naghavi *et al.*, 2016).

از آنجایی که شاخص‌های مختلف نتایج متفاوتی را در رابطه با گزینش لاین‌های متحمل به‌دست دادند، بنابراین مطابق با نظر بلام (Blum, 1988) و فرناندز (Fernandez, 1992) جهت یافتن بهترین شاخص‌ها از تجزیه همبستگی استفاده شد. بر اساس این نظریه، بهترین شاخص‌ها همبستگی بالایی با عملکرد دانه در هر دو شرایط نرمال و تنش دارند و قادر هستند ژنوتیپ‌هایی را که عملکرد بهینه و مشابهی در هر دو شرایط نرمال و تنش دارند، از ژنوتیپ‌های موجود در سایر گروه‌ها تفکیک کنند. هم‌راستا با نتایج پژوهش حاضر، در مطالعه دیگری گزارش شد که شاخص‌های GMP، STI، MP، HM و K₂STI بیش‌ترین همبستگی مثبت را با عملکرد دانه در شرایط نرمال و تنش خشکی داشتند و گزینش ژنوتیپ‌های مطلوب گندم بایستی بر اساس آن‌ها صورت گیرد (Bahraini Vijuyeh *et al.*, 2019). در مطالعه مشابه دیگری، انوار و همکاران (Anwaar *et al.*, 2020) بیان داشتند که عملکرد دانه با شاخص تحمل (TOL)، شاخص



شکل ۶- همبستگی بین عملکرد دانه و شاخص‌های تحمل به تنش تحت شرایط آبیاری نرمال و تنش خشکی در سال اول (A)، سال دوم (B) و میانگین دو سال (C)

Figure 6. Correlation between grain yield and stress tolerance indices under normal irrigation and drought stress conditions in the first (A), second (B), and average two years (C)

سال اول به ترتیب ژنوتیپ‌های Naz، Adl، Shanghai، Karim ۶۲۶۳۵۸ و Karim ۶۲۱۹۰۸، در سال دوم ژنوتیپ‌های Karim، Adl، Naz، Shanghai، ۶۲۶۳۵۸ و Chamran2 و بر مبنای میانگین دو سال نیز ژنوتیپ‌های Karim، Adl، Naz، Shanghai، ۶۲۶۳۵۸ و Chamran2 دارای بیش‌ترین مقادیر SIIG بودند که نشان‌دهنده تحمل بیش‌تر آن‌ها به تنش خشکی نسبت به سایر ژنوتیپ‌های مورد بررسی است. همچنین برای انتخاب بهترین لاین‌ها از نمودار سه بعدی (شکل ۷) بر مبنای عملکرد در شرایط بدون تنش (Y_p)، و تنش (Y_s) و

به‌منظور شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی و افزایش کارایی تصمیم‌گیری برای انتخاب ژنوتیپ‌های متحمل، تمامی شاخص‌های مطالعه شده به‌طور هم‌زمان ادغام و شاخص انتخاب ژنوتیپ ایده‌آل (SIIG) به تفکیک برای هر یک از سال‌های اجرای آزمایش و نیز میانگین دو سال تهیه شد (جدول ۳). میزان تغییرات این شاخص بین صفر و یک می‌باشد و هر چه مقدار SIIG به یک نزدیک‌تر باشد، آن ژنوتیپ تحمل بیش‌تری به تنش دارد و برعکس مقادیر نزدیک به صفر نشان‌دهنده حساسیت بیش‌تر ژنوتیپ مربوطه به تنش است. بر اساس شاخص SIIG در

شاخص SIIG استفاده شد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، ژنوتیپ‌های Naz, Adl, S-94-12, Shanghai, ۶۲۶۳۵۸ و Chamran2 علاوه بر عملکرد بالا در هر دو سال، دارای بیش‌ترین مقدار شاخص SIIG نیز بودند که نشان دهنده تحمل بالای آن‌ها به تنش خشکی است. شاخص SIIG در گیاهان مختلفی از جمله گندم و جو برای انتخاب ژنوتیپ‌های متحمل به تنش‌های غیر زیستی استفاده شده است (Zali *et al.*, 2015, 2017). طهماسبی و همکاران (Tahmasebi *et al.*, 2018) گزارش کردند که شاخص SIIG کارایی بالایی در انتخاب ژنوتیپ‌های متحمل به تنش دارد و با استفاده از آن می‌توان ژنوتیپ‌های گندم متحمل به تنش خشکی را انتخاب کرد. استفاده از شاخص SIIG در مطالعه آن‌ها نشان داد که ژنوتیپ‌های مهرگان، S-94-12، سازنگ و برات با بالاترین مقدار این شاخص در دو محیط شوری ملایم و شدید، بیش‌ترین تحمل به شوری را در بین ژنوتیپ‌های مورد بررسی دارا بودند.

جدول ۳- شاخص انتخاب ژنوتیپ ایده‌آل (SIIG) و رتبه ده درصد ژنوتیپ‌های برتر گندم نان بر مبنای عملکرد دانه

Table 2. Ideal genotype selection index (SIIG) and ranking 10% of the best bread wheat genotypes based on grain yield

First year (2017-18)				Second year (2018-19)				Average two years			
Genotype	SIIG	Grain yield	Yield rank	Genotype	SIIG	Grain yield	Yield rank	Genotype	SIIG	Grain yield	Yield rank
Naz	0.63256	1.965	3	Karim	0.73687	2.092	1	Karim	0.73687	2.01	1
Adl	0.62958	1.955	4	Adl	0.69257	1.907	8	Adl	0.69257	1.931	5
626358	0.62723	1.935	5	Naz	0.69093	1.780	14	Naz	0.69093	1.872	9
Shanghai	0.62687	2.005	1	Shanghai	0.67460	1.932	6	Shanghai	0.67460	1.969	3
Karim	0.62166	1.927	6	626358	0.66995	1.940	5	626358	0.66995	1.937	4
621908	0.61942	1.970	2	Chamran2	0.66690	1.765	15	Chamran2	0.66690	1.814	11
Chamran2	0.61084	1.862	10	Koohdasht	0.66248	1.830	10	Koohdasht	0.66248	1.829	10
Bam	0.60491	1.867	9	628189	0.65628	1.832	9	628189	0.65628	1.802	13
Koohdasht	0.60258	1.827	12	627460	0.65496	1.785	13	627460	0.65496	1.792	14
623109	0.60164	1.842	11	Bam	0.64393	1.942	4	Bam	0.64393	1.905	6
Falat	0.60141	1.880	7	621908	0.64043	2.032	2	621908	0.64043	2.001	2
Panjamo62	0.59920	1.802	15	624944	0.63289	1.745	17	624944	0.63290	1.727	20
623417	0.59907	1.805	14	Bayat	0.62361	1.702	19	Bayat	0.62361	1.731	18
627460	0.59590	1.800	16	623417	0.62263	1.815	11	623417	0.62263	1.810	12
Parsi	0.58950	1.880	8	Sabalan	0.61907	1.740	18	Sabalan	0.61907	1.691	22
628189	0.58936	1.772	18	Dez	0.61621	1.662	23	Dez	0.61621	1.657	26
Bayat	0.58738	1.760	19	Panjamo62	0.61393	1.680	20	Panjamo62	0.61393	1.741	17
Sistan	0.58358	1.825	13	Sistan	0.61220	1.982	3	Sistan	0.61220	1.904	7
Azar2	0.57756	1.720	21	Zagros	0.61090	1.650	25	Zagros	0.61089	1.650	27
624944	0.57482	1.710	22	628012	0.61050	1.762	16	628012	0.61050	1.666	25
623344	0.56594	1.707	23	Azar2	0.59298	1.647	26	Azar2	0.59298	1.684	23
Rayhani	0.56590	1.795	17	627356	0.57988	1.787	12	627356	0.57988	1.729	19
627299	0.56436	1.700	24	Parsi	0.57957	1.922	7	Parsi	0.579568	1.901	8
627356	0.56194	1.670	25	623109	0.57777	1.675	21	623109	0.57777	1.759	15
626978	0.56073	1.657	26	Falat	0.57453	1.625	27	Falat	0.57453	1.752	16
Zagros	0.55931	1.650	28	623008	0.57150	1.487	29	623008	0.57150	1.534	29
Dez	0.55778	1.652	27	627299	0.56223	1.660	24	627299	0.56223	1.680	24
Sabalan	0.55750	1.642	29	Pishgam	0.56006	1.675	22	Pishgam	0.56006	1.692	21
Khazar1	0.55701	1.730	20	621706	0.55845	1.560	28	621706	0.55845	1.535	28
Pishgam	0.55551	1.710	30	Karaj1	0.55414	1.412	30	Karaj1	0.55414	1.497	30

نتیجه‌گیری کلی

نتایج این مطالعه نشان داد که تنوع بالایی بین رقم‌های زراعی و توده‌های بومی گندم نان با منشأ ایران از نظر تحمل به تنش خشکی وجود داشت. همچنین، شاخص‌های MP, GMP, STI, HM, DI و K₂STI به دلیل همبستگی بالا با عملکرد دانه تحت هر دو شرایط محیطی، برای گزینش ژنوتیپ‌های گندم متحمل به خشکی مناسب بودند. مقایسه ژنوتیپ‌های مطالعه شده در این آزمایش نیز نشان داد که رقم‌های بهاره Shanghai, Adl و Naz و رقم‌های دیم Karim و Koohdasht از تحمل بالایی در مقابله با تنش خشکی در هر دو سال اجرای آزمایش برخوردار بودند. رقم‌های بهاره Naz و Adl از جمله رقم‌هایی هستند که در سال‌های خیلی دور معرفی شده و دو رقم زراعی دیم Karim و Koohdasht نیز بعد از سال ۲۰۰۰ میلادی معرفی شده‌اند و از ارقام جدید گندم نان داخل کشور محسوب می‌شوند. همچنین، در بین توده‌های بومی بررسی شده در این آزمایش نیز توده بومی ۶۲۶۳۵۸ با منشأ استان اصفهان و توده بومی ۶۲۱۹۰۸ با منشأ اراک به‌عنوان توده‌های متحمل به خشکی و دارای عملکرد بالا در دو شرایط محیطی و در هر دو سال آزمایش، شناسایی و انتخاب شدند. از این‌رو، این ژنوتیپ‌ها می‌توانند در برنامه‌های به‌نژادی آینده برای تحمل به تنش خشکی در گندم نان مورد توجه و استفاده قرار گیرند.

سپاسگزاری

بدین وسیله از مساعدت‌های مرحوم جناب آقای دکتر رحمت محمدی در ارزیابی‌های فنوتیپی این آزمایش تشکر و قدردانی می‌شود.

تضاد منافع

نویسندگان تایید می‌کنند که این تحقیق در غیاب هرگونه روابط تجاری یا مالی می‌تواند به عنوان تضاد منافع بالقوه تعبیر شود، انجام شده است.

رعایت اخلاق در نشر

نویسندگان اعلام می‌کنند که در نگارش این مقاله به‌طور کامل از اخلاق نشر از جمله سرقت ادبی، سوء رفتار، جعل داده‌ها و انتشار دوگانه، پیروی کرده‌اند. همچنین این مقاله حاصل یک کار تحقیقاتی اصیل بوده و تاکنون به‌طور کامل به هیچ زبانی و در هیچ نشریه یا همایشی چاپ و منتشر نشده است و هیچ اقدامی نیز برای انتشار آن در هیچ نشریه یا همایشی صورت نگرفته و نخواهد گرفت.

اجازه انتشار مقاله

نویسندگان با چاپ این مقاله به‌صورت دسترسی باز موافقت کرده و کلیه حقوق استفاده از محتوا، جدول‌ها، شکل‌ها، تصویرها و غیره را به ناشر واگذار می‌کنند.

References

- Abou-Elwafa, S. F., & Shehzad, T. (2021). Genetic diversity, GWAS and prediction for drought and terminal heat stress tolerance in bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *Genetic Resources & Crop Evolution*, 68, 711-728. doi: [10.1007/s10722-020-01018-y](https://doi.org/10.1007/s10722-020-01018-y).
- Afzal, F., Ali, A., Ullah, Z., Sher, H., Gul, A., Mujeeb-Kazi, A., & Arshad, M. (2018). Terminal drought stress adaptability in synthetic derived bread wheat is explained by alleles of major adaptability genes and superior phenology. *International Journal of Agriculture & Biology*, 20, 1623-1631. doi: [10.17957/IJAB/15.0680](https://doi.org/10.17957/IJAB/15.0680).
- Afzal, F., Li, H., Gul, A., Subhani, A., Ali, A., Mujeeb-Kazi, A., Ogbonnaya, F., Trethowan, R., Xia, X., & He, Z. (2019). Genome-wide analyses reveal footprints of divergent selection and drought adaptive traits in synthetic-derived wheats. *G3 Genes, Genomes, Genetics*, 9(6), 1957-1973. doi: [10.1534/g3.119.400010](https://doi.org/10.1534/g3.119.400010).
- Aktaş, H. (2016). Drought tolerance indices of selected landraces and bread wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes derived from synthetic wheats. *Applied Ecology & Environmental Research*, 14(4), 177-189. doi: [10.15666/aeer/1404_177189](https://doi.org/10.15666/aeer/1404_177189).
- Ali, I., Khan, A., Ali, A., Ullah, Z., Dai, D. Q., Khan, N., Khan, A., Al-Tawaha, A. R., & Sher, H. (2022). Iron and zinc micronutrients and soil inoculation of *Trichoderma harzianum* enhance wheat grain quality and yield. *Frontiers in Plant Science*, 13, 960948. doi: [10.3389/fpls.2022.960948](https://doi.org/10.3389/fpls.2022.960948).
- Alipour, H., Abdi, H., Rahimi, Y., & Bihamta, M. R. (2019). Investigating grain yield and yield stability of wheat cultivars introduced in Iran over the last half century. *Cereal Research*, 9(2), 157-167. doi: [10.22124/C.2019.13311.1492](https://doi.org/10.22124/C.2019.13311.1492).

- Alipour, H., Abdi, H., Rahimi, Y., & Bihamta, M. R. (2021). Dissection of the genetic basis of genotype-by-environment interactions for grain yield and main agronomic traits in Iranian bread wheat landraces and cultivars. *Scientific Reports*, 11(1), 17742. doi: [10.1038/s41598-021-96576-1](https://doi.org/10.1038/s41598-021-96576-1).
- Amanuel, M., Gebre, D., & Debele, T. (2018). Performance of bread wheat genotypes under different environment in lowland irrigated areas of Afar region Ethiopia. *African Journal of Agricultural Research*, 13(17), 927-933. doi: [10.5897/AJAR2017.12669](https://doi.org/10.5897/AJAR2017.12669).
- Amiri, R., Minhas, N. M., Farrakh, A. G., Farrakh, S., Ali, A., Bux, H., & Kazi, M. (2014). Phenotypic and genotypic characterization of wheat landraces of Pakistan. *Emirates Journal of Food & Agriculture*, 26(2), 157-163. doi: [10.9755/ejfa.v26i2.17008](https://doi.org/10.9755/ejfa.v26i2.17008).
- Anwaar, H. A., Perveen, R., Mansha, M. Z., Abid, M., Sarwar, Z. M., Aatif, H. M., Umar, U. U., Sajid, M., Aslam, H. M. U., Alam, M. M., & Rizwan, M. (2020). Assessment of grain yield indices in response to drought stress in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Saudi Journal of Biological Sciences*, 27(7), 1818-1823. doi: [10.1016/j.sjbs.2019.12.009](https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2019.12.009).
- Bahraini Vijuyeh, V., Dadashi, M. R., & Nazeri, S. M. (2019). Assessment of tolerance to drought stress at reproductive phase in some wheat genotypes (*Triticum aestivum* L.) using drought tolerance and susceptibility indices. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 17(1), 111-121. [In Persian]. doi: [10.22067/GSC.V17I1.69690](https://doi.org/10.22067/GSC.V17I1.69690).
- Ballesta, P., Mora, F., & Del Pozo, A. (2020). Association mapping of drought tolerance indices in wheat: QTL-rich regions on chromosome 4A. *Scientia Agricola*, 77(2), e20180153. doi: [10.1590/1678-992X-2018-0153](https://doi.org/10.1590/1678-992X-2018-0153).
- Bektas, H., Hohn, C. E., & Waines, J. G. (2016). Root and shoot traits of bread wheat (*Triticum aestivum* L.) landraces and cultivars. *Euphytica*, 212, 297-311. doi: [10.1007/s10681-016-1770-7](https://doi.org/10.1007/s10681-016-1770-7).
- Blum, A. (1988). Plant Breeding for Stress Environment. CRC Press, Boca Raton, FL. pp. 38-78. doi: [10.1201/9781351075718](https://doi.org/10.1201/9781351075718).
- Cappelli, A., & Cini, E. (2021). Challenges and opportunities in wheat flour, pasta, bread, and bakery product production chains: A systematic review of innovations and improvement strategies to increase sustainability, productivity, and product quality. *Sustainability*, 13(5), 2608. doi: [10.3390/su13052608](https://doi.org/10.3390/su13052608).
- Chen, D., Neumann, K., Friedel, S., Kilian, B., Chen, M., Altmann, T., & Klukas, C. (2014). Dissecting the phenotypic components of crop plant growth and drought responses based on high-throughput image analysis. *The Plant Cell*, 26(12), 4636-4655. doi: [10.1105/tpc.114.129601](https://doi.org/10.1105/tpc.114.129601).
- Chowdhury, M. K., Hasan, M. A., Bahadur, M. M., Islam, M. R., Hakim, M. A., Iqbal, M. A., Javed, T., Raza, A., Shabbir, R., Sorour, S., & Elsanafawy, N. E. (2021). Evaluation of drought tolerance of some wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes through phenology, growth, and physiological indices. *Agronomy*, 11(9), 1792. doi: [10.3390/agronomy11091792](https://doi.org/10.3390/agronomy11091792).
- Dietz, K. J., Zörb, C., & Geilfus, C. M. (2021). Drought and crop yield. *Plant Biology*, 23(6), 881-893. doi: [10.1111/plb.13304](https://doi.org/10.1111/plb.13304).
- Dorostkar, S., Dadkhodaie, A., & Heidari, B. (2015). Evaluation of grain yield indices in hexaploid wheat genotypes in response to drought stress. *Archives of Agronomy & Soil Science*, 61(3), 397-413. doi: [10.1080/03650340.2014.936855](https://doi.org/10.1080/03650340.2014.936855).
- Eftekhari, A., Baghizadeh, A., Abdoshahi, R., & Yaghoubi, M. M. (2020). Evaluation of grain yield, agronomical traits and drought tolerance indices in some bread wheat cultivars. *Journal of Crop Breeding*, 11(32), 11-21. [In Persian]. doi: [10.29252/jcb.11.32.11](https://doi.org/10.29252/jcb.11.32.11).
- Eivazi, A., Abdollahi, S., Salekdeh, G. H., Majidi, I., Mohamadi, A., & Pirayeshfar, B. (2006). Effect of drought and salinity stress on quality related traits in wheat (*Triticum aestivum* L.) varieties. *Iranian Journal of Crop Science*, 7(3), 252-267. [In Persian]. doi: [20.1001.1.15625540.1384.7.3.6.2](https://doi.org/10.1001.1.15625540.1384.7.3.6.2).
- Eslami, P., Bernousi, I., Aharizad, S., & Jafarzadeh, J. (2021). Evaluation of drought stress tolerance in barley lines using tolerance indices. *Journal of Crop Breeding*, 13(38), 71-83. [In Persian]. doi: [10.52547/jcb.13.38.71](https://doi.org/10.52547/jcb.13.38.71).
- FAO. (2022). FAO Statistical Databases. Food & Agriculture Organization of the United Nations. Retrieved 3 March 2023, from <http://www.fao.org/faostat>.
- Farshadfar, E., & Sutka, J. (2002). Screening drought tolerance criteria in maize. *Acta Agronomica Hungarica*, 50(4), 411-416. doi: [10.1556/AAgr.50.2002.4.3](https://doi.org/10.1556/AAgr.50.2002.4.3).

- Farshadfar, E., Poursiahbidi, M. M., & Safavi, S. M. (2013). Assessment of drought tolerance in land races of bread wheat based on resistance/tolerance indices. *International Journal of Advanced Biological & Biomedical Research*, 1(2), 143-158.
- Fernandez, G. C. J. (1992). Effective selection criteria for assessing stress tolerance. Proceedings of the International Symposium on Adaptation of Vegetables and Other Food Crops in Temperature and Water Stress. Aug. 13-18, Taiwan. pp. 257-270. doi: [10.22001/wvc.72511](https://doi.org/10.22001/wvc.72511).
- Fischer, R. A., & Maurer, R. (1978). Drought resistance in spring wheat cultivars. I: Grain yield response. *Australian Journal of Agricultural Research*, 29(5), 897-912. doi: [10.1071/AR9780897](https://doi.org/10.1071/AR9780897).
- Khan, A., Ali, A., Ullah, Z., Ali, I., Kaushik, P., Alyemeni, M. N., Rasheed, A., & Sher, H. (2022). Exploiting the drought tolerance of wild *Elymus* species for bread wheat improvement. *Frontiers in Plant Science*, 13, 982844. doi: [10.3389/fpls.2022.982844](https://doi.org/10.3389/fpls.2022.982844).
- Lambers, H., Chapin, F. S., & Pons, T. L. (2008). *Plant Physiological Ecology*. 2nd Ed. Springer. doi: [10.2307/176572](https://doi.org/10.2307/176572).
- Lan, J. (1998). Comparison of evaluating methods for agronomic drought resistance in crops. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 7, 85-87.
- Mir, R. A., Sharma, A., & Mahajan, R. (2020). Crop Landraces: Present Threats and Opportunities for Conservation. In: Salgotra, R., & Zargar, S. (Eds.). *Rediscovery of Genetic and Genomic Resources for Future Food Security*. Springer. pp. 335-349. doi: [10.1007/978-981-15-0156-2_13](https://doi.org/10.1007/978-981-15-0156-2_13).
- Moosavi, S. S., Yazdi Samadi, B., Naghavi, M. R., Zali, A. A., Dashti, H., & Pourshahbazi, A. (2008). Introduction of new indices to identify relative drought tolerance and resistance in wheat genotypes. *Desert*, 12(2), 165-178. doi: [10.22059/JDESERT.2008.27115](https://doi.org/10.22059/JDESERT.2008.27115).
- Naghavi, M. R., Moghaddam, M., Toorchi, M., & Shakiba, M. R. (2016). Evaluation of spring wheat cultivars based on drought resistance indices. *Journal of Crop Breeding*, 8(17), 197-207. [In Persian]. doi: [10.18869/acadpub.jcb.8.17.207](https://doi.org/10.18869/acadpub.jcb.8.17.207).
- Nehe, A., Akin, B., Sanal, T., Evlice, A. K., Unsal, R., Dinçer, N., Demir, L., Geren, H., Sevim, I., & Orhan, S. (2019). Genotype × environment interaction and genetic gain for grain yield and grain quality traits in Turkish spring wheat released between 1964 and 2010. *Plos One*, 14, e0219432. doi: [10.1371/journal.pone.0219432](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0219432).
- Rabieyan, E., Bihamta, M. R., Esmailzadeh Moghaddam, M., Mohammadi, V., & Alipour, H. (2022). Genome-wide association mapping and genomic prediction of agronomical traits and breeding values in Iranian wheat under rain-fed and well-watered conditions. *BMC Genomics*, 23(1), 1-25. doi: [10.1186/s12864-022-08968-w](https://doi.org/10.1186/s12864-022-08968-w).
- Rabieyan, E., Bihamta, M. R., Esmailzadeh Moghaddam, M., Alipour, H., Mohammadi, V., Azizyan, K., & Javid, S. (2023). Analysis of genetic diversity and genome-wide association study for drought tolerance related traits in Iranian bread wheat. *BMC Plant Biology*, 23(1), 431. doi: [10.1186/s12870-023-04416-3](https://doi.org/10.1186/s12870-023-04416-3).
- Rahimi, Y., Bihamta, M. R., Taleei, A., Alipour, H., & Ingvarsson, P. K. (2019). Applying an artificial neural network approach for drought tolerance screening among Iranian wheat landraces and cultivars grown under well-watered and rain-fed conditions. *Acta Physiologiae Plantarum*, 41, 156. doi: [10.1007/s11738-019-2946-2](https://doi.org/10.1007/s11738-019-2946-2).
- Rahmati, H., Nakhzari Moghadam, A., Rahemi Karizaki, A., & Evarsaji, Z. (2020). Evaluation of drought tolerance in durum wheat genotypes using drought tolerance indices. *Journal of Crop Breeding*, 12(33), 174-183. [In Persian]. doi: [10.29252/jcb.12.33.174](https://doi.org/10.29252/jcb.12.33.174).
- Rauf, S., Teixeira-da-Silva, J. A., Khan, A. A., & Naveed, A. (2010). Consequences of plant breeding on genetic diversity. *International Journal of Plant Breeding*, 4(1), 1-21.
- Rosielle, A. A., & Hamblin, J. (1981). Theoretical aspects of selection for yield in stress and non-stress environments. *Crop Science*, 21(6), 943-946. doi: [10.2135/cropsci1981.0011183X002100060033x](https://doi.org/10.2135/cropsci1981.0011183X002100060033x).
- Salam, A., Ali, A., Afridi, M. S., Ali, S., & Ullah, Z. (2022). Agrobiodiversity: Effect of drought stress on the eco-physiology and morphology of wheat. In: Öztürk, M., Khan, S. M., Altay, V., Efe, R., Egamberdieva, D., & Khassanov, F. O. (Eds.). *Biodiversity, Conservation and Sustainability in Asia*. Springer, Cham, Switzerland. pp. 597-618. doi: [10.1007/978-3-030-73943-0_33](https://doi.org/10.1007/978-3-030-73943-0_33).
- Schneider, K. A., Rosales-Serna, R., Ibarra-Perez, F., Cazares-Enriquez, B., Acosta-Gallegos, J. A., Ramirez-Vallejo, P., Wassimi, N., & Kelly, J. D. (1997). Improving common bean performance under drought stress. *Crop Science*, 37(1), 43-50. doi: [10.2135/cropsci1997.0011183X003700010007x](https://doi.org/10.2135/cropsci1997.0011183X003700010007x).

- Seki, M., Kameiy, A., Yamaguchi-Shinozaki, K., & Shinozaki, K. (2003). Molecular responses to drought, salinity and frost: Common and different paths for plant protection. *Current Opinion in Biotechnology*, 14(2), 194-199. doi: [10.1016/s0958-1669\(03\)00030-2](https://doi.org/10.1016/s0958-1669(03)00030-2).
- Shabannejad, M., Bihamta, M. R., Majidi-Hervan, E., Alipour, H., & Ebrahimi, A. (2022). Assessment of genetic diversity of some Iran bread wheat (*Triticum aestivum* L.) landraces using multivariate statistical analysis. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 15(1), 1-17. [In Persian]. doi: [10.22077/escs.2020.3713.1893](https://doi.org/10.22077/escs.2020.3713.1893).
- Shibani Rad, A., Farshadfar, E., & Najajfi, A. (2018). Evaluation of drought tolerance in some bread wheat genotypes using drought resistance. *Journal of Plant Ecophysiology*, 9(31), 1-14. [In Persian].
- 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. doi: [10.1016/j.fcr.2006.02.001](https://doi.org/10.1016/j.fcr.2006.02.001).
- Tahmasebi, S., Dastfal, M., Zali, H., & Rajaei, M. (2018). Drought tolerance evaluation of bread wheat cultivars and promising lines in warm and dry climate of the south. *Cereal Research*, 8(2), 209-225. doi: [10.22124/C.2018.10434.1398](https://doi.org/10.22124/C.2018.10434.1398).
- Ullah, M. I., Mahpara, S., Bibi, R., Shah, R. U., Ullah, R., Abbas, S., Ullah, M. I., Hassan, A. M., El-Shehawi, A. M., Brestic, M., & Zivcak, M. (2021). Grain yield and correlated traits of bread wheat lines: Implications for yield improvement. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 28(10), 5714-5719. doi: [10.1016/j.sjbs.2021.06.006](https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.06.006).
- Zali, H., Sofalian, O., Hasanloo, T., Asghari, A., & Hoseini, S. M. (2015). Appraising of drought tolerance relying on stability analysis indices in canola genotypes simultaneously, using selection index of ideal genotype (SIIG) technique: Introduction of new method. doi: [10.2135/cropsci1984.0011183X002400050026x](https://doi.org/10.2135/cropsci1984.0011183X002400050026x).
- Zali, H., Hasanloo, T., Sofalian, O., Asghari, A., & Zeinalabedini, M. (2017). Appropriate strategies for selection of drought tolerant genotypes in canola. *Journal of Crop Breeding*, 8(20), 77-90. [In Persian]. doi: <https://doi.org/20.1001.1.22286128.1395.8.20.7.4>.
- Zhang, P., Dreisigacker, S., Buerkert, A., Alkhanjari, S., Melchinger, A. E., & Warburton, M. L. (2006). Genetic diversity and relationships of wheat landraces from Oman investigated with SSR markers. *Genetic Resources & Crop Evolution*, 53(7), 1351-1360. doi: [10.1007/s10722-005-4675-1](https://doi.org/10.1007/s10722-005-4675-1).