

ارزیابی ژنوتیپ‌های گندم نان (*Triticum aestivum* L.) و گندم دوروم (*Triticum turgidum* L.) در شرایط تنش خشکی انتهایی فصل با استفاده از شاخص‌های تحمل خشکی
Evaluation of bread wheat (*Triticum aestivum* L.) and durum wheat (*Triticum turgidum* L.) genotypes under terminal drought stress conditions using drought tolerance indices

سارا سنجانی^۱، محمد مهدی نخجوانی مقدم^۲، توحید نجفی میرک^۳، فریبا نقی‌پور^۴،
امیر محمد عابدی^۵

چکیده

سنجانی، س.، م.م. نخجوانی مقدم، ت. نجفی میرک، ف. نقی‌پور، ا.م. عابدی. ۱۴۰۴. ارزیابی ژنوتیپ‌های گندم نان (*Triticum aestivum* L.) و گندم دوروم (*Triticum turgidum* L.) در شرایط تنش خشکی انتهایی فصل با استفاده از شاخص‌های تحمل خشکی. نشریه علوم زراعی ایران. ۲۷ (۳): ۲۳۰-۲۱۱.

گندم یکی از مهم‌ترین گیاهان غلاتی و تامین کننده بخش عمده‌ای از نیاز غذایی انسان‌های جهان است که پایداری تولید آن تحت تاثیر عوامل محیطی بویژه تنش خشکی قرار می‌گیرد. این آزمایش به منظور بررسی تحمل به تنش خشکی انتهایی فصل در هفت ژنوتیپ گندم نان (لاین M-99-9، ارقام محلولی، افروز، امین، فرین، آراز و تکتاز) و سه ژنوتیپ گندم دوروم (لاین‌های D-400-14، D-400-18 و رقم ماهان) در دو سال زراعی ۱۴۰۲-۰۳ و ۱۴۰۳-۰۴ در مزرعه آزمایشی مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر در کرج انجام شد. آزمایش در شرایط بدون تنش (آبیاری کامل) و تنش خشکی انتهایی فصل (قطع آبیاری از مرحله گرده‌افشانی تا انتهای مرحله رسیدگی) در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. نتایج تجزیه واریانس مرکب نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار بین ژنوتیپ‌های گندم و برهمکنش سال و ژنوتیپ بود. به منظور شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل برخی از شاخص‌های تحمل و حساسیت به خشکی بر اساس عملکرد دانه محاسبه شدند. نتایج نشان داد که همبستگی مثبت و معنی‌داری بین شاخص‌های تحمل به تنش خشکی (STI)، میانگین هندسی بهره‌وری (GMP)، میانگین بهره‌وری (MP) و میانگین هارمونیک (HM) با عملکرد دانه در شرایط بدون تنش و تنش خشکی وجود داشت. بر اساس نتایج بدست آمده از غربال ژنوتیپ‌های ارزیابی شده با استفاده از شاخص‌های گزینشی MGIDI، FAI-BLUP و Smith-Hazel، ارقام گندم نان افروز و فرین علاوه بر دارا بودن بیشترین مقدار عملکرد دانه، به عنوان ژنوتیپ‌های متحمل به تنش خشکی شناخته شدند که برای استفاده در برنامه‌های به‌نژادی قابل استفاده هستند.

واژه‌های کلیدی: گندم نان، گندم دوروم، تغییرات اقلیمی، قطع آبیاری و عملکرد دانه

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۳۰ این مقاله مستخرج از پروژه تحقیقاتی به شماره ۰۴۰۲۸۶-۰۱۱-۰۳-۰۱ مصوب مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر می‌باشد

۱- استادیار مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران (مکاتبه کننده، sanjani20_s@yahoo.com)

۲- استادیار مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران

۳- استاد مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران

۴- استادیار مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران

۵- دانشجوی دکتری دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس



2025© The Authors. This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0), which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source.



Evaluation of bread wheat (*Triticum aestivum* L.) and durum wheat (*Triticum turgidum* L.) genotypes under terminal drought stress conditions using drought tolerance indices

Sanjani, S.¹ , Nakhjavani Moghaddam, M.M.² , Najafi Mirak, T.³ ,
Naghipour, F.⁴ and Abedi, A.M.⁵

ABSTRACT

Sanjani, S., Nakhjavani Moghaddam, M. M., Najafi Mirak, T., Naghipour, F. and Abedi, A. M. 2025. Evaluation of bread wheat (*Triticum aestivum* L.) and durum wheat (*Triticum turgidum* L.) genotypes under terminal drought stress conditions using drought tolerance indices. *Iranian Journal of Crop Sciences*. 27(3): 211-230. (In Persian).

Introduction: Wheat is one of the most important crops worldwide, providing approximately 20% of the calories and protein required for human nutrition. Recent studies have shown that drought stress has significant economic impacts on agricultural production worldwide, and the magnitude of these effects varies depending on regional conditions and the level of development of countries. Therefore, in view of the water scarcity crisis, the increasing frequency of droughts and the limitations of national water resources in Iran, evaluation of drought stress tolerance of wheat genotypes appears to be necessary. The objective of the present study was to identify the superior drought-tolerant bread and durum wheat genotypes using grain yield and several yield-based stress tolerance and susceptibility indices by applying various multivariate analysis models.

Materials and Methods: This experiment was conducted to evaluate tolerance to terminal drought stress in bread and durum wheat genotypes over two cropping seasons 2023–24 and 2024-25. The studied genotypes included seven bread wheat genotypes: M-99-9 and Mahluji, Afrouz, Amin, Farin, Araz, and Taktaz, and three durum wheat genotypes: D-400-14, D-400-18, and Mahan. The experiment was carried out under two irrigation regimes, optimal irrigation and terminal drought stress (irrigation withheld from the anthesis stage; Zadoks 61), using a randomized complete block design with three replications. Seeds were sown mid-November with density: 400 m⁻² (bread wheat), 450 m⁻² (durum wheat). In normal irrigation maintained soil moisture at field capacity, and ceased post-pollination for drought stress conditions. Plots were harvested by a Wintersteiger plot combine. After collecting experimental data and estimating grain yield, several yield-based drought tolerance and susceptible indices were calculated. A heatmap-based correlation method was used to investigate association among calculated indices and grain yield. Three selection indices such as multi-trait genotype-ideotype distance index (MGIDI), factor analysis and ideotype design via best linear unbiased prediction (FAI-BLUP), and Smith-Hazel (SH) were exploited to identify the superior tolerant- genotypes.

Results: Combined analysis of variance for grain yield data showed significant effects of year and genotype as well as the interaction effects for genotype × year for both optimal irrigation and terminal drought conditions. The results showed that on average, in two years of the experiment, grain yield decreased by 32.8% under terminal drought stress conditions compared to optimal irrigation conditions, the highest of which was related to the Mahluji cultivar in the and the lowest was related to the D-400-18 durum wheat genotype in first cropping season. The result for screening wheat genotypes using drought tolerance and susceptible indices revealed reasonable

repeatability, therefore some of the investigated genotypes appeared in the same pattern in each year of experiments. Based on the Pearson's correlation, grain yields (Y_p and Y_s) positively and significantly correlated with MP, GMP, HM and STI indices in the first year. In the second year, a positive and significant correlation was observed between grain yield in terminal drought condition with STI, MP, GMP, and HM indices. Based on the averaged two-cropping seasons, grain yields significantly and positively correlated with HM, STI, MP, and GMP indices, supporting the repeatability of our findings. To identify the superior tolerant wheat genotypes based on multi-indices, we used three multi-trait selection indices such as MGIDI, FAI- BLUP, and Smith-Hazel. Genotypes G4 and G5, in the first cropping season, G2 and G7, in the second cropping season, and genotypes G2, G5 over two cropping seasons were selected as superior genotypes using the MGIDI index. Based on the FAI-BLUP index, G2 and G3 were identified as the superior drought tolerant genotypes in the first cropping season, and G2 and G5 in the second cropping season and in over two cropping seasons. The result of screening genotypes using the Smith-Hazel index showed that genotypes including G2 and G5 were identified as the high-yielding and tolerant genotypes in second cropping season and in average over two cropping seasons. Based on three selection indices revealed that genotype numbers G2 (Afrouz) and G5 (Farin) were superior genotypes.

Conclusion: This experiment evaluated and compared the responses of different bread and durum wheat genotypes to terminal drought stress using drought tolerance indices. The results indicated that all examined wheat genotypes were affected by terminal drought stress, resulted in reduction of mean grain yield of approximately 32.8% compared with optimal irrigation conditions. Analysis of the relationships between grain yield and drought tolerance and susceptibility indices under both optimum and terminal drought stress conditions showed that the STI, GMP, MP, and HM indices were the most effective for identifying drought-tolerant genotypes. Furthermore, the selection indices FAI-BLUP, MGIDI, and Smith-Hazel, based on grain yield and drought tolerance and susceptibility indices, demonstrated high efficiency in selecting drought-tolerant genotypes. Overall, the cultivars Afrouz and Farin were identified as the most drought-tolerant genotypes and can be considered ideal parental lines for the development of stable cultivars adapted to dry climatic conditions.

Key words: Bread wheat, Climate change, Durum wheat, Grain yield and ithholding irrigation

Received: November, 2025

Accepted: June, 2026

1. Assistant Prof., Seed and Plant Improvement Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization. Karaj, Iran (Corresponding author, ✉ sanjani20_s@yahoo.com)
2. Assistant Prof., Agricultural Engineering Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization. Karaj, Iran
3. Professor, Seed and Plant Improvement Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization. Karaj, Iran
4. Assistant Prof., Agricultural Research, Education and Extension Organization. Karaj, Iran
5. PhD Student, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran



2025© The Authors. This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0), which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source.

مقدمه

گندم یکی از مهم‌ترین محصولات زراعی جهان است که حدود ۲۰ درصد از کالری و پروتئین مورد نیاز انسان را تأمین می‌کند. این گیاه بیشترین سطح زیر کشت را در بین گیاهان غلاتی داشته و در حدود ۲۵ درصد از کل تولید آن در سطح بین‌المللی مبادله می‌شود (Acevedo et al., 2018). سال زراعی ۱۴۰۳-۱۴۰۲ در ایران ۷/۶۲ میلیون هکتار و تولید آن ۱۸/۵۹ میلیون تن و سطح زیر کشت گندم آبی ۲/۷۸ میلیون هکتار و مقدار تولید آن ۱۰/۸۳ میلیون تن گزارش شده است (Anonymous, 2024). نتایج پژوهش‌های اخیر نشان داده است که خشکسالی اثرات اقتصادی قابل توجهی بر بهره‌وری کشاورزی در سراسر جهان داشته و شدت آثار آن بسته به شرایط منطقه‌ای و میزان توسعه کشورها متفاوت است. خشکسالی سالانه باعث کاهش ۰/۳۹ تا ۰/۸۵ رشد سرانه تولید ناخالص داخلی (GDP) در سطح جهان می‌شود (Zaveri et al., 2023). گزارش شده است که طی ۴۰ سال گذشته مناطق حساس به خشکسالی در سطح جهان حدود یک میلیون و دویست کیلومتر مربع افزایش یافته و زمین‌های کشاورزی جزء آسیب‌پذیرترین اکوسیستم‌ها هستند (Li et al., 2024). پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهد که تا پایان قرن بیست و یکم، سطح زیر کشت گندم که در معرض خشکسالی قرار می‌گیرد، تا ۶۰ درصد افزایش و تنش خشکی از طریق تغییرات مورفولوژیک، فیزیولوژیک، بیوشیمیایی و مولکولی، باعث کاهش قابل توجه عملکرد گندم می‌شود (Bohra et al., 2024). تغییرات اقلیمی و وقوع خشکسالی در مناطق اصلی تولید گندم، دستاوردهای بزرگ انقلاب سبز را که طی آن عملکرد جهانی گندم از حدود یک تن در هکتار در دهه ۱۹۶۰ به ۳/۵ تن در سال‌های اخیر رسیده است تهدید می‌کند (Langridge et al., 2022).

با توجه به بحران کم آبی و وقوع خشک‌سالی‌های مکرر و همچنین محدودیت منابع آبی کشور، ارزیابی

واکنش ژنوتیپ‌های گندم به تنش خشکی و شناسایی شاخص‌های مرتبط با تحمل خشکی ضروری به نظر می‌رسد. یکی از راهکارهای مقابله با تنش‌های خشکی انتهای فصل، اصلاح ارقامی است که آب قابل دسترس را با کارآیی بیشتری مصرف نموده و به تنش خشکی انتهای فصل متحمل‌تر باشند. برای ارزیابی عملکرد ارقام گیاهی در شرایط کم آبی، از شاخص‌های تحمل و حساسیت به خشکی استفاده می‌شود. در همین ارتباط شاخص‌های مهمی مانند شاخص تحمل به تنش (Stress Tolerance Index; STI)، میانگین بهره‌وری (Geometric Mean Productivity; GMP)، میانگین بهره‌وری (Mean Productivity; MP)، میانگین هارمونیک (Harmonic Mean; HM)، شاخص عملکرد (Yield Index; YI)، شاخص حساسیت به تنش (Stress Susceptibility; SSI)، شاخص تحمل (Tolerance; TOL) و شاخص پایداری عملکرد (Yield stability index; YSI) معرفی شده‌اند. پژوهش‌های انجام شده روی گندم، کلزا و پنبه نشان داد که شاخص‌های STI، GMP، MP، HM و YI با عملکرد دانه در شرایط بدون تنش و تنش همبستگی مثبت داشته و برای شناسایی ژنوتیپ‌های برتر قابل استفاده هستند (Yarahmadi et al., 2020; Khalili et al., 2012). در مقابل، شاخص‌های SSI و TOL برای شناسایی ژنوتیپ‌هایی که در شرایط مطلوب عملکرد بالایی داشته، اما به خشکی حساس‌ترند، مناسب هستند (Yarahmadi et al., 2020). این شاخص‌ها امکان اجرای برنامه‌های غربالگری کارآمد برای توسعه ارقام متحمل به خشکی در گیاهان مختلف زراعی را فراهم می‌کنند. گزارش شده است که STI، GMP و MP قابل اعتمادترین شاخص‌ها برای غربالگری گندم در شرایط کمبود آب هستند (Nouraein et al., 2013). رحمتی و همکاران (Rahmati et al., 2020) در آزمایش روی ۱۰ ژنوتیپ گندم دوروم در شرایط آبیاری مطلوب و تنش خشکی گزارش نمودند که اختلاف ژنوتیپ‌ها از نظر

عملکرد دانه معنی دار بود و بر اساس شاخص های تحمل به خشکی مبتنی بر عملکرد دانه، سه ژنوتیپ امرب ۳، هانا و آریا متحمل و سایر ژنوتیپ ها حساس به تنش خشکی بودند. آنها اظهار داشتند که با توجه به همبستگی مثبت و معنی دار شاخص های MP، GMP، HM و STI با عملکرد دانه در هر دو شرایط آبیاری مطلوب و تنش خشکی، این شاخص ها برای شناسایی ژنوتیپ های برتر مناسب تر هستند.

نتایج ارزیابی تحمل به تنش خشکی تعدادی از ژنوتیپ های گندم نان اقلیم سرد ایران نشان داد که شاخص های MP، GMP، HM و STI بیشترین همبستگی را با عملکرد دانه در شرایط بدون تنش داشتند و ژنوتیپ هایی که دارای بیشترین مقدار این شاخص ها بودند، به عنوان متحمل به تنش خشکی شناخته شدند (Bahraini Vijuyeh et al., 2019). نتایج یک آزمایش روی ۱۵۴ ژنوتیپ گندم دوروم نشان داد که همبستگی بالایی بین شاخص های MP، GMP، HARM، MRP و SIT و عملکرد دانه در شرایط آبیاری مطلوب و تنش خشکی انتهای فصل وجود داشته و شاخص های مناسبی برای شناسایی ژنوتیپ های متحمل به تنش خشکی شناخته شدند (Ahmadi et al., 2020). انتخاب بر اساس شاخص های مختلف غالباً نتایج متفاوتی ارائه می دهد، از این رو استفاده از انواع روش های آماری جهت شناسایی ژنوتیپ های متحمل و حساس، یکی از مرسوم ترین روش ها می باشد. در سال های اخیر شاخص های گزینشی جدیدی با استفاده از عملکرد دانه و سایر صفات از طریق روش های چند متغیره جهت انتخاب ژنوتیپ های برتر معرفی شده اند که از مهم ترین آنها می توان شاخص فاصله ژنوتیپ-ایدئوتیپ چند صفتی (Multi-trait Genotype-Ideotype Distance Index; MGIDI) (Olivoto and Nardino, 2020) و شاخص تحلیلی عاملی طراحی ایدئوتیپ از طریق بهترین پیش بینی خطی ناریب (Factor Analysis and Ideotype design via Best Linear Unbiased Prediction; FAI-

عملکرد دانه معنی دار بود و بر اساس شاخص های تحمل به خشکی مبتنی بر عملکرد دانه، سه ژنوتیپ امرب ۳، هانا و آریا متحمل و سایر ژنوتیپ ها حساس به تنش خشکی بودند. آنها اظهار داشتند که با توجه به همبستگی مثبت و معنی دار شاخص های MP، GMP، HM و STI با عملکرد دانه در هر دو شرایط آبیاری مطلوب و تنش خشکی، این شاخص ها برای شناسایی ژنوتیپ های برتر مناسب تر هستند.

نتایج ارزیابی تحمل به تنش خشکی تعدادی از ژنوتیپ های گندم نان اقلیم سرد ایران نشان داد که شاخص های MP، GMP، HM و STI بیشترین همبستگی را با عملکرد دانه در شرایط بدون تنش داشتند و ژنوتیپ هایی که دارای بیشترین مقدار این شاخص ها بودند، به عنوان متحمل به تنش خشکی شناخته شدند (Bahraini Vijuyeh et al., 2019). نتایج یک آزمایش روی ۱۵۴ ژنوتیپ گندم دوروم نشان داد که همبستگی بالایی بین شاخص های MP، GMP، HARM، MRP و SIT و عملکرد دانه در شرایط آبیاری مطلوب و تنش خشکی انتهای فصل وجود داشته و شاخص های مناسبی برای شناسایی ژنوتیپ های متحمل به تنش خشکی شناخته شدند (Ahmadi et al., 2020). انتخاب بر اساس شاخص های مختلف غالباً نتایج متفاوتی ارائه می دهد، از این رو استفاده از انواع روش های آماری جهت شناسایی ژنوتیپ های متحمل و حساس، یکی از مرسوم ترین روش ها می باشد. در سال های اخیر شاخص های گزینشی جدیدی با استفاده از عملکرد دانه و سایر صفات از طریق روش های چند متغیره جهت انتخاب ژنوتیپ های برتر معرفی شده اند که از مهم ترین آنها می توان شاخص فاصله ژنوتیپ-ایدئوتیپ چند صفتی (Multi-trait Genotype-Ideotype Distance Index; MGIDI) (Olivoto and Nardino, 2020) و شاخص تحلیلی عاملی طراحی ایدئوتیپ از طریق بهترین پیش بینی خطی ناریب (Factor Analysis and Ideotype design via Best Linear Unbiased Prediction; FAI-

مواد و روش ها

این پژوهش در مزرعه آزمایشی مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر واقع در کرج با مختصات طول جغرافیایی ۵۱ درجه و ۹ دقیقه شرقی، عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۵۹ دقیقه شمالی و ارتفاع ۱۳۲۱ متر از سطح دریا انجام شد. به منظور شناسایی ژنوتیپ های برتر گندم نان و دوروم تحت شرایط تنش خشکی و با هدف استفاده از شاخص های تحمل خشکی این مطالعه طی دو سال زراعی ۱۴۰۲-۰۳ و ۱۴۰۳-۰۴ به صورت دو آزمایش جداگانه در قالب طرح بلوک های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. آزمایش اول در شرایط بدون تنش (آبیاری کامل و تأمین نیاز آبی گیاه بر اساس کاهش رطوبت خاک در عمق توسعه ریشه) و آزمایش دوم در شرایط تنش خشکی (قطع آبیاری از مرحله گرده افشانی، کد زادوکس ۶۱، تا انتهای مرحله رسیدگی) اجرا شد. ژنوتیپ های گندم مورد ارزیابی شامل هفت ژنوتیپ گندم نان (لاین M-99-9 و ارقام محلولی، افروز، امین، فرین، آراز و تکتاز) و سه ژنوتیپ گندم دوروم (لاین های D-400-14، D-400-18 و رقم ماهان) بودند که از برنامه های به نژادی بخش تحقیقات غلات مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر انتخاب شدند (جدول ۱).

جدول ۱- مشخصات ژنوتیپ‌های گندم نان و دوروم مورد استفاده در آزمایش

Table 1. Characteristics of bread and durum wheat genotypes used in the experiment

کد ژنوتیپ Genotype code	ژنوتیپ‌های گندم Wheat genotypes	شجره Pedigree	نوع گندم Wheat type	عادت رشد Growth habit
G1	Mahluji	محلوجی Evwyt2/Azd//Rsh*2/10120/3/Azd//HD2172/V83035/4/Morvarid/5/Sirvan	گندم نان Bread wheat	Spring
G2	Afroz	افروز SAUAL/YANAC//SAUAL/3/BECARD/QUAIU #1	گندم نان Bread wheat	Spring
G3	M-99-9	WAXWING*2/KIRITATI//NIKNEJAD	گندم نان Bread wheat	Spring
G4	Amin	امین KAUZ/LUCO-M/PVN/STAR/3/Yaco/2*Parus/4/Pishtaz	گندم نان Bread wheat	Spring
G5	Farin	فرین Franclin/Rolfs07CMSS06B00013S-0Y-099ZTM-099Y-099M-2WGY-0B	گندم نان Bread wheat	Spring
G6	Araz	آراز CROC-1/AE.TA(WX-224)//OPATA-M-85/3/PASTOR	گندم نان Bread wheat	Spring
G7	Taktaz	تکتاز SAUAL/3/MILAN/S87230//BAV92	گندم نان Bread wheat	Spring
G8	Mahan	ماهان P91.272.3.1/3*MEXI75//2*JUPAREC2001/5/ARTICO/AJAIA_3//...	دوروم Durum wheat	Spring
G9	D-400-14	GUAYACAN INIA/GUANAY//PORRON_4/BEJAH_7/6/...	دوروم Durum wheat	Spring
G10	D-400-18	C F4 20 S/4/YAZI_1/AKAKI_4//SOMAT_3/3/AUK/GUIL//GREEN/5/...	دوروم Durum wheat	Spring

(زمان کاشت، مرحله پنجه‌زنی و مرحله ساقه‌دهی) به خاک داده شد. در تیمار بدون تنش (آبیاری کامل) نیاز آبی گیاه با جبران کمبود رطوبت خاک تا حد ظرفیت زراعی، بر اساس نمونه‌برداری از خاک و ارزیابی خصوصیات آن، تأمین شد. در تیمار تنش خشکی، آبیاری تا مرحله گرده‌افشانی (زادوکس ۶۱) انجام و پس از آن تا انتهای مرحله رسیدگی متوقف شد. رطوبت خاک قبل از هر نوبت آبیاری با استفاده از دستگاه رطوبت‌سنج اندازه‌گیری شد. زمان آبیاری بر اساس ۵۰ درصد تخلیه مجاز رطوبت خاک در تیمار آبیاری کامل تعیین شد. توزیع آب با استفاده از سامانه آبیاری قطره‌ای، یک نوار آبیاری برای هر پشته، انجام و حجم آب آبیاری با استفاده از کنتور حجمی در هر کرت اندازه‌گیری شد. شرایط آب و هوایی محل اجرای آزمایش در دو سال آزمایش در جدول ۳ ارائه شده است.

قبل از آماده‌سازی زمین، از خاک نمونه‌برداری و توصیه کودی بر اساس نتایج تجزیه خاک انجام شد (جدول ۲). کاشت بذر در پنجره تاریخ کاشت (Sowing date window) مناسب توصیه شده برای منطقه در آبان (سال اول ۱۵ آبان و سال دوم ۲۰ آبان) با استفاده از بذر کار خطی کار آزمایشی وینتراشتایگر (Wintersteiger AG, Austria) انجام شد. ابعاد کرت‌های آزمایشی به طول ۶ متر و عرض ۲/۴۸ متر شامل چهار پشته با عرض ۶۲ سانتی‌متر و سه ردیف کاشت روی هر پشته بود. تراکم برای گندم نان ۴۰۰ بذر در متر مربع و برای گندم دوروم ۴۵۰ بذر در متر مربع در نظر گرفته شد. بین کرت‌های اصلی، دو پشته نکاشت در نظر گرفته شد. کنترل شیمیایی علف‌های هرز پهن‌برگ و باریک‌برگ طی دوره رشد انجام شد. کودهای فسفر و پتاس بر اساس نتایج تجزیه خاک به‌طور کامل در زمان کاشت به خاک داده شدند. کود نیتروژن در سه مرحله

جدول ۲- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک محل اجرای آزمایش

Table 2. Physical and chemical properties of the soil at the experiment site

عمق خاک Soil depth (cm)	بافت خاک Soil texture	هدایت الکتریکی EC (dS.m ⁻¹)	واکنش خاک pH	رطوبت وزنی Weight moisture (%)		پتاسیم K (mg.kg ⁻¹)	فسفر P (mg.kg ⁻¹)	نیتروژن N (%)
				ظرفیت زراعی FC	نقطه پژمردگی PWP			
0-20	رسی لومی Clay loam	4.1	7.15	29.4	12.2	230	8.2	0.07
20-40	لومی Loam	1.5	7.22	27.3	11.5	-	-	-
40-60	رسی لومی Clay loam	1.7	7.5	28.6	11.6	-	-	-

جدول ۳- اطلاعات هواشناسی محل اجرای آزمایش (۱۴۰۳-۰۴ و ۱۴۰۲-۰۳)

Table 3. Meteorological information of the experiment site (2023-24 and 2024-25)

		۱۴۰۳-۱۴۰۲			2023-24			۱۴۰۴-۱۴۰۳			2024-25		
		Temperature (°C)			دما			Temperature (°C)			دما		
Month	ماه	بارندگی			بارندگی			بارندگی			بارندگی		
		حد اقل Min (°C)	حد اکثر Max (°C)	میانگین Mean (°C)	حد اقل Min (°C)	حد اکثر Max (°C)	میانگین Mean (°C)	حد اقل Min (°C)	حد اکثر Max (°C)	میانگین Mean (°C)	حد اقل Min (°C)	حد اکثر Max (°C)	میانگین Mean (°C)
Nov.	آبان	8.7	19.3	14.2	19	5.1	15.3	10.2	64				
Dec.	آذر	3.1	13.0	8.0	9	0	9.0	4.5	16				
Jan.	دی	0	11.2	5.6	28	-1.2	7.7	3.3	26				
Feb.	بهمن	-1.1	9.5	4.2	94	-3.6	6.0	1.2	38				
Mar.	اسفند	-1.5	9.9	4.2	68	1.1	11.8	6.4	36				
Apr.	فروردین	5.2	18.8	11.9	46	7.4	19.5	13.5	42				
May	اردیبهشت	10.7	23.1	16.9	47	15.1	28.4	21.7	5				
Jun.	خرداد	16.4	31.1	23.8	12	16.9	30.6	23.7	0				

Source: Meteorological Organization of Iran

منبع: سازمان هواشناسی کشور

شرایط آبیاری کامل و تنش خشکی انجام شد. جهت مقایسه میانگین‌ها از آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار (LSD) استفاده شد. شاخص‌های مربوط به تحمل و حساسیت به خشکی با استفاده از نرم افزار iPASTIC (Pour-Aboughadareh *et al.*, 2019) و با معادلات مربوطه محاسبه شدند (جدول ۴).

پس از رسیدگی، محصول کرت‌های آزمایشی پس از حذف حاشیه از دو ردیف وسط، با استفاده از کمباین آزمایشی وینتراشتاایگر (Research plot harvester) (Classic ST 2015, WINTERSTEIGER AG, Austria) برداشت و توزین و عملکرد هر کرت تبدیل به واحد کیلوگرم در هکتار شد. تجزیه واریانس داده‌ها برای دو

جدول ۴- شاخص‌های تحمل و حساسیت به تنش خشکی مورد استفاده برای ارزیابی ژنوتیپ‌های گندم

Table 4. Drought tolerance and susceptibility indices used for evaluation of the wheat genotypes

Index	شاخص	فرمول Formula	منبع References
Tolerance Index; TOL	شاخص تحمل	$TOL = Y_p - Y_s$	Hossain <i>et al.</i> , 1990
Mean Productivity; MP	میانگین بهره‌وری	$MP = \frac{Y_s + Y_p}{2}$	Rosielle and Hamblin, 1981
Stress Susceptibility Index; SSI	شاخص حساسیت به تنش	$SSI = \frac{1 - (Y_s/Y_p)}{1 - (\bar{Y}_s/\bar{Y}_p)}$	Fischer and Maurer, 1978
Stress Tolerance Index; STI	شاخص تحمل به تنش	$STI = \frac{Y_s \times Y_p}{\bar{Y}_p^2}$	Fernandez, 1992
Geometric Mean Productivity; GMP	میانگین هندسی بهره‌وری	$GMP = \sqrt{(Y_s \times Y_p)}$	Fernandez, 1992
Yield Index; YI	شاخص عملکرد	$YI = \frac{Y_s}{\bar{Y}_s}$	Gavuzzi <i>et al.</i> , 1997
Yield Stability Index; YSI	شاخص پایداری عملکرد	$YSI = \frac{Y_s}{Y_p}$	Bousslama and Schapaugh, 1984
Harmonic Mean; HM	میانگین هارمونیک	$HM = \frac{2(Y_p \times Y_s)}{(Y_p + Y_s)}$	Schneider <i>et al.</i> , 1997

Y_p : عملکرد دانه در شرایط بدون تنش، Y_s : عملکرد دانه در شرایط تنش خشکی، TOL: شاخص تحمل، MP: میانگین بهره‌وری، STI: شاخص تحمل به تنش، GMP: میانگین هندسی بهره‌وری، HM: میانگین هارمونیک، SSI: شاخص حساسیت به تنش، STI: شاخص تحمل تنش، YI: شاخص عملکرد، YSI: شاخص پایداری عملکرد، Y_p : Grain yield under normal conditions, Y_s : Grain yield under drought stress conditions, TOL; Tolerance Index, MP; Mean Productivity, STI; Stress Tolerance Index, GMP; Geometric Mean Productivity, HM; Harmonic Mean, SSI; Stress Susceptibility Index, YI; Yield Index, YSI; Yield Stability Index

نتایج و بحث

تجزیه واریانس مرکب داده‌ها نشان داد که اثر سال، ژنوتیپ و برهمکنش ژنوتیپ و سال بر عملکرد دانه در هر دو شرایط بدون تنش و تنش خشکی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بودند. این موضوع نشان دهنده تفاوت ژنتیکی میان ژنوتیپ‌های گندم مورد بررسی از نظر توان تولید در شرایط مختلف محیطی بر عملکرد دانه است. این موضوع امکان استفاده از شاخص‌های تحمل و حساسیت برای شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل به تنش خشکی را فراهم می‌کند. نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که بیشترین

پس از محاسبه شاخص‌های تحمل و حساسیت به تنش، جهت شناسایی ژنوتیپ‌های برتر از شاخص‌های MGIDI، Smith-Hezel و شاخص تحلیل عاملی و طراحی ایدئوتیپ از طریق مدل بهترین پیش‌بینی خطی نااریب (FAI-B:UP) با استفاده از بسته metan در محیط R استفاده شد (Olivoto and Lucio, 2020). ضرایب همبستگی بین عملکرد دانه در شرایط بدون تنش و تنش خشکی و سایر شاخص‌های تنش با استفاده از روش پیرسون و تجزیه به مؤلفه‌های اصلی با استفاده از نرم‌افزار R نسخه 4.5.1 انجام شد.

محلوجی در سال اول و کمترین مقدار آن مربوط به گندم دوروم لاین D-400-18 در سال اول بود (جدول ۵). اهدایی و همکاران (Ehdaie *et al.*, 2008) گزارش کردند که تنش خشکی در دوره پرشدن دانه باعث کاهش فتوسنتز و محدود شدن اختصاص مواد حاصل از فتوسنتز جاری گیاه به دانه در گندم شد. بر این اساس کاهش عملکرد دانه در شرایط خشکی انتهای فصل را می‌توان به کاهش فتوسنتز جاری گیاه نسبت داد.

عملکرد دانه در هر دو سال و در هر دو شرایط بدون تنش و تنش خشکی مربوط به رقم افروز در سال دوم (۸۲۵۵/۳ و ۵۴۸۱ کیلوگرم در هکتار) و و کمترین مقدار مربوط به لاین D-400-18 در سال اول (۳۲۲۰/۳ و ۲۷۴۲/۰ کیلوگرم در هکتار) بود (جدول ۵). در هر دو سال آزمایش عملکرد دانه در شرایط تنش خشکی نسبت به شرایط بدون تنش ۳۲/۸ درصد کاهش داشت که بیشترین آن مربوط به رقم

جدول ۵- مقایسه میانگین عملکرد دانه ژنوتیپ‌های گندم در برهمکنش ژنوتیپ و سال در تیمارهای بدون تنش و تنش خشکی انتهای فصل

Table 5. Mean comparison of grain yield of wheat genotypes in interaction of genotype and year under normal (Yp) and terminal drought stress (Ys) treatments

Wheat genotypes	ژنوتیپ‌های گندم	عملکرد دانه (بدون تنش) Yp (kg.ha ⁻¹)	عملکرد دانه (تنش خشکی) Ys (kg.ha ⁻¹)
۰۳-۱۴۰۲ 2023-24			
Mahluji	محلوجی	6107.3	3256.6
Afrouz	افروز	7002.6	4145.3
M-99-9		6145.0	4362.3
Amin	امین	5501.6	4301.6
Farin	فرین	5551.0	4409.0
Araz	آراز	5200.0	3206.0
Taktaz	تکتاز	3704.3	2771.0
Mahan	ماهان	4811.6	3228.6
D-400-14		4312.6	3501.3
D-400-18		3220.3	2742.0
۰۴-۱۴۰۳ 2024-25			
Mahluji	محلوجی	7182.3	4820.3
Afrouz	افروز	8255.3	5481.0
M-99-9		7089.6	4039.0
Amin	امین	7269.6	4072.6
Farin	فرین	7862.3	4722.0
Araz	آراز	6849.3	5430.3
Taktaz	تکتاز	7255.0	5353.3
Mahan	ماهان	7600.3	4585.3
D-400-14		7135.0	4379.6
D-400-18		6727.3	4950.6
LSD (1%)		667.8	810.1

ژنوتیپ‌های گندم نان و دوروم از نظر کلیه شاخص‌های مورد مطالعه تفاوت قابل توجهی داشته و واکنش متفاوتی نسبت به تنش خشکی داشتند. در سال اول رقم افروز و لاین M-99-9 از نظر شاخص‌های STI، HM و

نتایج حاصل از مقادیر عددی شاخص‌های تحمل و حساسیت به تنش خشکی در ژنوتیپ‌های گندم نان و دوروم در سال اول، دوم و نتایج میانگین دو ساله در جداول ۶ و ۷ ارائه شده است. نتایج نشان داد که

GMP دارای بیشترین مقادیر بودند و بر این اساس به عنوان ژنوتیپ‌های با پتانسیل عملکرد دانه بالا شناسایی شدند (جدول ۶). از نظر شاخص SSI و TOL لاین‌های گندم دوروم D-400-18 و D-400-14 کمترین مقادیر را داشتند. ژنوتیپ‌های با مقادیر کم برای شاخص TOL، تفاوت عملکرد دانه کمتری در شرایط تنش و بدون تنش داشتند و ارقام با مقادیر زیاد SSI عملکرد دانه پایین‌تری در محیط تنش خشکی داشتند. ارقام محلولجی، افروز و لاین M-99-9 اگرچه از نظر عملکرد دانه در شرایط بدون تنش برتر بودند، با این حال فقط از نظر شاخص‌های STI، HM و GMP به عنوان ژنوتیپ‌های متحمل شناخته شدند. در سال دوم نتایج حاصل از مقایسه ژنوتیپ‌های گندم از نظر شاخص‌های تحمل و حساسیت تا حدودی متفاوت بود. ارقام گندم افروز و تکتاز بالاترین مقادیر شاخص‌های STI، HM، MP و GMP را داشتند. این دو رقم بالاترین عملکرد دانه را در شرایط تنش خشکی داشتند (جدول ۶). از نظر شاخص‌های SSI و TOL ارقام آراز، تکتاز و ژنوتیپ D-400-18 کمترین مقدار را نشان دادند. با توجه به نتایج این پژوهش رقم تکتاز از نظر شاخص‌های تحمل و حساسیت به تنش جزو ژنوتیپ‌های برتر بود و رقم افروز مشابه رقم تکتاز علاوه بر شاخص‌های ذکر شده از نظر عملکرد دانه در شرایط بدون تنش نیز برتری قابل توجهی نسبت به سایر ژنوتیپ‌ها داشت (جدول ۷).

به منظور بررسی تکرارپذیری نتایج بدست آمده از ارزیابی ژنوتیپ‌های گندم از نظر هر یک از شاخص‌های تحمل و حساسیت به تنش، محاسبات بر اساس داده‌های دو ساله نیز انجام شد (جدول ۷). نتایج نشان داد که رقم افروز و فرین از نظر شاخص‌های STI، HM، MP و GMP بیشترین مقدار را داشتند. ارقام مذکور در هر دو شرایط بدون تنش و تنش خشکی بالاترین عملکرد دانه را نسبت به سایر ژنوتیپ‌ها داشتند (جدول ۷). در مقابل، لاین D-400-18 کمترین مقادیر این شاخص‌ها را داشت. بر اساس شاخص تحمل (TOL)، که نشان دهنده تفاوت

عملکرد بین شرایط تنش و بدون تنش است، لاین D-400-18 و رقم تکتاز به دلیل دارا بودن کمترین تفاوت عملکرد (به‌ترتیب ۱۱۲۷/۵ و ۱۴۱۷/۵ کیلوگرم در هکتار) به عنوان ژنوتیپ‌های پایدارتر شناخته شدند. این ژنوتیپ‌ها شاخص پایداری عملکرد بالاتری را نیز داشتند (جدول ۷). بررسی شاخص حساسیت به تنش (SSI) نشان داد که لاین D-400-18 با مقدار ۰/۶۹ و رقم تکتاز با مقدار ۰/۷۹، کمترین میزان حساسیت را به خشکی داشته و رقم محلولجی (۱/۱۹) بیشترین حساسیت را داشت. سایر پژوهشگران نیز گزارش داده‌اند که شاخص‌های GMP، MP و STI معیارهای مؤثری برای انتخاب ژنوتیپ‌های گندم با عملکرد بالا در شرایط تنش و بدون تنش به شمار می‌روند (Patel et al., 2019). با توجه به اینکه شاخص‌هایی برای انتخاب ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی مناسب هستند که دارای همبستگی بالا با عملکرد در هر دو شرایط بدون تنش و تنش خشکی باشند، همبستگی بین عملکرد دانه ژنوتیپ‌های گندم و شاخص‌های تحمل و حساسیت مورد بررسی قرار گرفت. ضرایب همبستگی بین عملکرد دانه ژنوتیپ‌های گندم با شاخص‌های تحمل و حساسیت به خشکی نشان‌دهنده الگوهای معنی‌داری در روابط بین این شاخص‌ها به تفکیک سال و میانگین دو سال بود (شکل ۱). در سال اول، شاخص‌های MP، GMP، STI و HM همبستگی مثبت و معنی‌داری (در سطح احتمال یک درصد) با عملکرد دانه در هر دو شرایط بدون تنش و تنش داشتند (شکل ۱-A). در سال دوم، شاخص‌های MP، GMP، STI و HM با عملکرد دانه در شرایط تنش خشکی و شاخص MP با عملکرد دانه در شرایط بدون تنش همبستگی مثبت و معنی‌داری داشتند (شکل ۱-B). گزارش شده است که شاخص‌هایی که دارای همبستگی مثبت و معنی‌داری با عملکرد دانه در هر دو شرایط تنش و بدون تنش خشکی باشند، می‌توانند به عنوان مناسب‌ترین شاخص‌ها برای گزینش ژنوتیپ‌های متحمل در نظر گرفته شوند.

جدول ۶- میانگین عملکرد دانه و شاخص‌های تحمل و حساسیت به تنش در ژنوتیپ‌های گندم (۱۴۰۳-۰۴ و ۱۴۰۲-۰۳)

Table 6. Mean grain yield and drought tolerance and susceptibility indices for wheat genotypes (2023-24 and 2024-25)

Wheat genotypes	ژنوتیپ‌های گندم	عملکرد دانه (بدون تنش)	عملکرد دانه (تنش خشکی)	TOL	MP	GMP	HM	SSI	STI	YI	YSI
		Yp (kg.ha ⁻¹)	Ys (kg.ha ⁻¹)								
۰۳-۱۴۰۲ 2023-24											
Mahluji	محلوجی	6107.3	3256.7	2850.7	4682.0	4459.8	4248.1	1.54	0.75	0.91	0.53
Afrouz	افروز	7002.7	4145.3	2857.3	5574.0	5387.8	5207.8	1.35	1.09	1.15	0.59
M-99-9		6145.0	4362.3	1782.7	5253.7	5177.5	5102.4	0.96	1.01	1.21	0.71
Amin	امین	5501.7	4301.7	1200.0	4901.7	4864.8	4828.2	0.72	0.89	1.20	0.78
Farin	فرین	5551.0	4409.0	1142.0	4980.0	4947.2	4914.5	0.68	0.92	1.23	0.79
Araz	آراز	5200.0	3206.0	1994.0	4203.0	4083.0	3966.5	1.26	0.63	0.89	0.62
Taktaz	تکتاز	3704.3	2771.0	933.3	3237.7	3203.9	3170.4	0.83	0.39	0.77	0.75
Mahan	ماهان	4811.7	3228.7	1583.0	4020.2	3941.5	3864.3	1.09	0.58	0.90	0.67
D-400-14		4312.7	3501.3	811.3	3907.0	3885.9	3864.9	0.62	0.57	0.97	0.81
D-400-18		3220.3	2742.0	478.3	2981.2	2971.6	2962.0	0.49	0.33	0.76	0.85
۰۴-۱۴۰۳ 2024-25											
Mahluji	محلوجی	7182.3	4820.3	2362.0	6001.3	5884.0	5768.9	0.95	0.65	1.01	0.67
Afrouz	افروز	8255.3	5481.0	2774.3	6868.2	6726.6	6588.0	0.97	0.84	1.15	0.66
M-99-9		7089.7	4039.0	3050.7	5564.3	5351.2	5146.2	1.24	0.53	0.84	0.57
Amin	امین	7269.7	4072.7	3197.0	5671.2	5441.2	5220.6	1.27	0.55	0.85	0.56
Farin	فرین	7862.3	4722.0	3140.3	6292.2	6093.1	5900.3	1.15	0.69	0.99	0.60
Araz	آراز	6849.3	5430.3	1419.0	6139.8	6098.7	6057.8	0.60	0.69	1.14	0.79
Taktaz	تکتاز	7255.0	5353.3	1901.7	6304.2	6232.0	6160.8	0.76	0.72	1.12	0.74
Mahan	ماهان	7600.3	4585.3	3015.0	6092.8	5903.4	5719.8	1.14	0.65	0.96	0.60
D-400-14		7135.0	4379.7	2755.3	5757.3	5590.1	5427.7	1.11	0.58	0.92	0.61
D-400-18		6727.3	4950.7	1776.7	5839.0	5771.0	5703.9	0.76	0.62	1.03	0.74

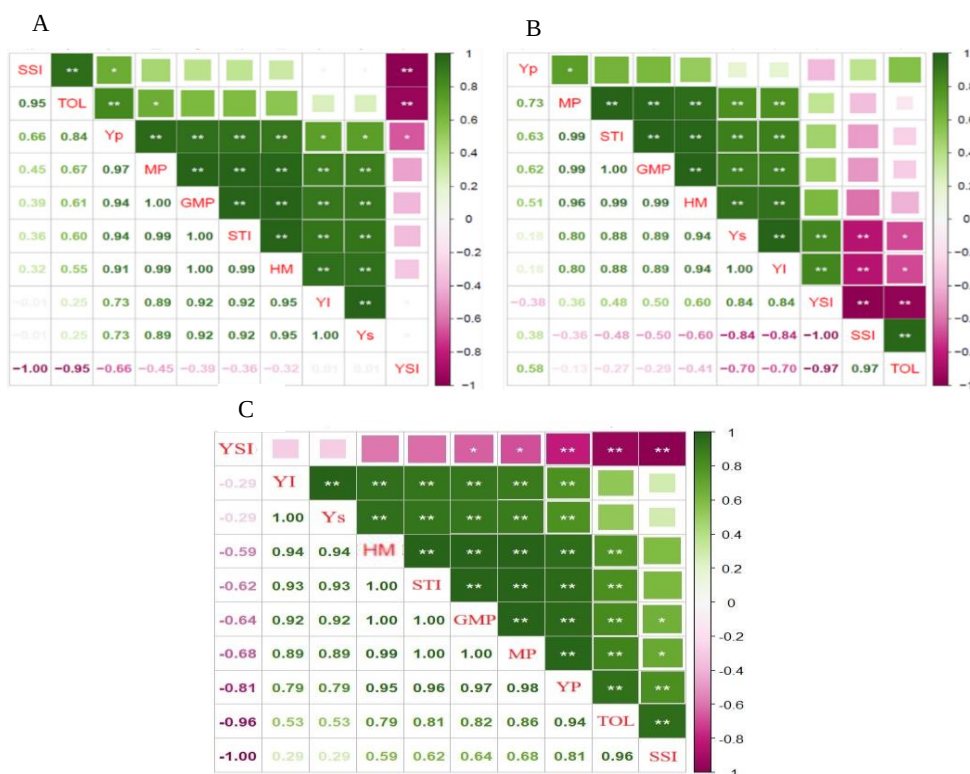
جدول ۷- میانگین دو ساله عملکرد دانه و شاخص‌های تحمل و حساسیت به تنش در ژنوتیپ‌های گندم

Table 7. Mean grain yield and drought tolerance and susceptibility indices for wheat genotypes (Mean of two years)

Wheat genotypes	ژنوتیپ‌های گندم	عملکرد دانه (بدون تنش) Yp (kg.ha ⁻¹)	عملکرد دانه (تنش خشکی) Ys (kg.ha ⁻¹)	TOL	MP	GMP	HM	SSI	STI	YI	YSI
Mahluji	محلوجی	6644.8	4038.5	2606.3	5341.7	5180.3	5023.7	1.19	0.689	0.96	0.608
Afrouz	افروز	7629.0	4813.2	2815.8	6221.1	6059.7	5902.5	1.12	0.943	1.15	0.631
M-99-9		6617.3	4200.7	2416.7	5409.0	5272.3	5139.1	1.11	0.714	1.00	0.635
Amin	امین	6385.7	4187.2	2198.5	5286.4	5170.9	5057.8	1.05	0.687	1.00	0.656
Farin	فرین	6706.7	4565.5	2141.2	5636.1	5533.5	5432.7	0.97	0.787	1.09	0.681
Araz	آراز	6024.7	4318.2	1706.5	5171.4	5100.5	5030.6	0.86	0.668	1.03	0.717
Taktaz	تکتاز	5479.7	4062.2	1417.5	4770.9	4718.0	4665.6	0.79	0.572	0.97	0.741
Mahan	ماهان	6206.0	3907.0	2299.0	5056.5	4924.1	4795.2	1.13	0.623	0.93	0.630
D-400-14		5723.8	3940.5	1783.3	4832.2	4749.2	4667.6	0.95	0.579	0.94	0.688
D-400-18		4973.8	3846.3	1127.5	4410.1	4373.9	4338.0	0.69	0.491	0.92	0.773

شرایط بدون تنش، معمولاً در شرایط تنش نیز عملکرد خوبی دارند که این موضوع با گزارش‌ها در گیاه جو مطابقت دارد (Feizi *et al.*, 2020). شاخص‌های MP، GMP، STI و HM در هر دو شرایط بدون تنش و تنش خشکی همبستگی مثبت و معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد با Yp و Ys داشتند. بر این اساس، شاخص‌های یاد شده را می‌توان به عنوان شاخص‌های برتر جهت غربالگری مواد ژنتیکی در برنامه‌های به نژادی در نظر گرفت. این یافته‌ها با نتایج سایر پژوهشگران نیز مطابقت دارد (Nouraein *et al.*, 2013).

شاخص‌هایی مانند میانگین هندسی بهره‌وری (GMP)، میانگین بهره‌وری (MP) و شاخص تحمل تنش (STI)، دارای بالاترین همبستگی با عملکرد دانه در شرایط بدون تنش و تنش دارند (Drikvand *et al.*, 2012; Mohammed and Kadhem, 2017). به منظور بررسی تکرارپذیری، روابط بین شاخص‌ها با عملکرد دانه براساس میانگین دو ساله نیز انجام شد (شکل ۱-C). شاخص‌های عملکرد دانه در شرایط بدون تنش (Yp) و عملکرد دانه در شرایط تنش خشکی (Ys) با یکدیگر همبستگی مثبت و بالایی (۰/۷۹) داشتند، این موضوع نشان می‌دهد که ژنوتیپ‌هایی با عملکرد بالا در



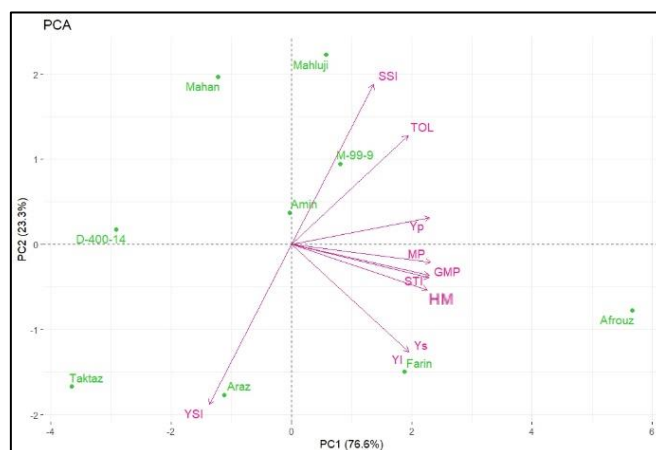
شکل ۱- همبستگی عملکرد دانه و شاخص‌های تحمل و حساسیت به خشکی بر اساس داده‌های سال اول (A)، سال دوم (B) و میانگین دو سال (C)

Fig. 1. Correlation coefficients between grain yield and drought tolerance and susceptibility indices for the first year (A), second year (B), and mean of two-years (C)

* و **: به ترتیب معنی‌دار در سطوح احتمال پنج و یک درصد
* and **: Significant at 5% and 1% probability levels, respectively
Yp: عملکرد دانه در شرایط بدون تنش، Ys: عملکرد دانه در شرایط تنش خشکی، TOL: شاخص تحمل، MP: میانگین بهره‌وری، STI: شاخص تحمل به تنش، GMP: میانگین هندسی بهره‌وری، HM: میانگین هارمونیک، SSI: شاخص حساسیت به تنش، STI: شاخص تحمل تنش، YI: شاخص عملکرد، YSI: شاخص پایداری عملکرد
Yp; Grain yield under normal conditions, Ys; Grain yield under drought stress conditions, TOL; Tolerance Index, MP; Mean Productivity, STI; Stress Tolerance Index, GMP; Geometric Mean Productivity, HM; Harmonic Mean, SSI; Stress Susceptibility Index, YI; Yield Index, YSI; Yield Stability Index

نتایج تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA) برای ژنوتیپ‌های گندم و شاخص‌های تحمل به تنش خشکی نشان‌دهنده توزیع معنی‌دار ژنوتیپ‌ها و شاخص‌ها بر اساس دو مؤلفه اصلی بود (شکل ۲). مؤلفه اول ۷۶/۶ (PC1) از واریانس کل را تبیین کرد و عمدتاً با شاخص‌های عملکرد دانه در شرایط بدون تنش (Yp)، عملکرد دانه در شرایط خشکی (Ys)، میانگین بهره‌وری (MP)، (میانگین هندسی بهره‌وری (GMP)، شاخص تحمل به تنش (STI)، میانگین هارمونیک (HM) و شاخص عملکرد (YI) همبستگی مثبت داشت. این مؤلفه نشان‌دهنده بعد عملکرد کلی و تحمل به تنش است که ژنوتیپ‌هایی با امتیاز مثبت بالا در این محور، برتری عملکرد را در هر دو شرایط تنش و بدون تنش دارند. مؤلفه دوم ۲۳/۳ (PC2) از واریانس را پوشش داد و تمایز بین شاخص‌های حساسیت مانند شاخص حساسیت به تنش (SSI) و شاخص تحمل (TOL) در جهت مثبت و شاخص پایداری عملکرد (YSI) را در جهت منفی نشان داد. این دو مؤلفه در مجموع بیش از ۹۹ درصد از واریانس داده‌ها را تبیین کردند که دقت بالای تحلیل را تأیید می‌کند. نتایج یک آزمایش در گندم دوروم نشان داد که در GMP و STI تقریباً ۵۸ درصد از تغییرات عملکرد را در شرایط تنش خشکی توجیه کردند (Boussen et al., 2010). تحلیل مؤلفه‌های اصلی به‌طور مداوم شاخص‌های چندگانه را به مؤلفه‌های کمتری کاهش می‌دهد و در عین حال توضیح واریانس بالایی را حفظ می‌کند (۹۹/۴۹ درصد). این موضوع نشان می‌دهد که این شاخص‌ها جنبه‌های مکمل تحمل به خشکی را اندازه‌گیری می‌کنند (Drikvand et al., 2012). بر اساس نتایج یک آزمایش در جو، مؤلفه اول، ۷۶/۹ درصد از تغییرات را به خود اختصاص داد و عملکرد در شرایط بدون تنش (Yp)، عملکرد در شرایط تنش (Ys)، میانگین بهره‌وری (MP)، GMP و STI و شاخص عملکرد (YI) نیز تحت تأثیر تنش قرار گرفتند و این مؤلفه "پتانسیل عملکرد و تحمل

به خشکی" نامیده شد (Subhani et al., 2015). توزیع ژنوتیپ‌های گندم در نمودار بای پلات نشان‌دهنده واکنش آنها به شاخص‌های تحمل به تنش است (شکل ۲). در آزمایش حاضر رقم افروز در سمت راست مثبت PC1 و نزدیک به شاخص‌های Yp، MP، GMP، STI و HM قرار گرفت که نشان‌دهنده برتری عملکرد و تحمل بالای آن به تنش خشکی است. بر این اساس رقم افروز به‌عنوان ژنوتیپ متحمل به خشکی طبقه‌بندی می‌شود، در مقابل رقم محلوجی ولاین M-99-9 نزدیک به SSI و TOL در سمت بالا PC2 قرار گرفتند که نشان‌دهنده حساسیت بیشتر آنها به تنش خشکی است. رقم آراز نزدیک به YSI در سمت پایین PC2 قرار گرفت که پایداری عملکرد را بدون عملکرد بالا نشان می‌دهد و رقم تکتاز ولاین D-400-14 در سمت چپ منفی PC1 قرار گرفته و عملکرد پایین‌تری در شرایط تنش داشتند. این یافته‌ها نشان می‌دهند که شاخص‌های STI، GMP، MP و YI می‌توانند به‌عنوان معیارهای مناسبی در برنامه‌های به‌نژادی گندم برای انتخاب ژنوتیپ‌های متحمل به تنش خشکی مورد استفاده قرار گیرند. نتایج آزمایش مهربان و همکاران، (Mehraban et al., 2018) نیز همبستگی‌های مثبت این شاخص‌ها با Yp و Ys را در گندم گزارش کرده و آن‌ها را به‌عنوان پیش‌بین‌های برتر نسبت به TOL و SSI معرفی کردند (Mehraban et al., 2018). نتایج سایر آزمایش‌ها نیز نشان داده است که شاخص‌های STI، GMP، MP و HM مؤثرترین شاخص‌ها برای شناسایی ژنوتیپ‌های پربازده گندم در هر دو شرایط بدون تنش و تنش خشکی هستند (Mohammed and Kadhém, 2017). گزارش شده است که ژنوتیپ‌های با TOL و SSI بالا پایداری عملکرد کمتری دارند و همبستگی‌های منفی این شاخص‌ها با عملکرد در شرایط تنش نشان داد که SSI و TOL برای شناسایی ژنوتیپ‌های حساس مناسب‌تر هستند (Aktas, 2016).

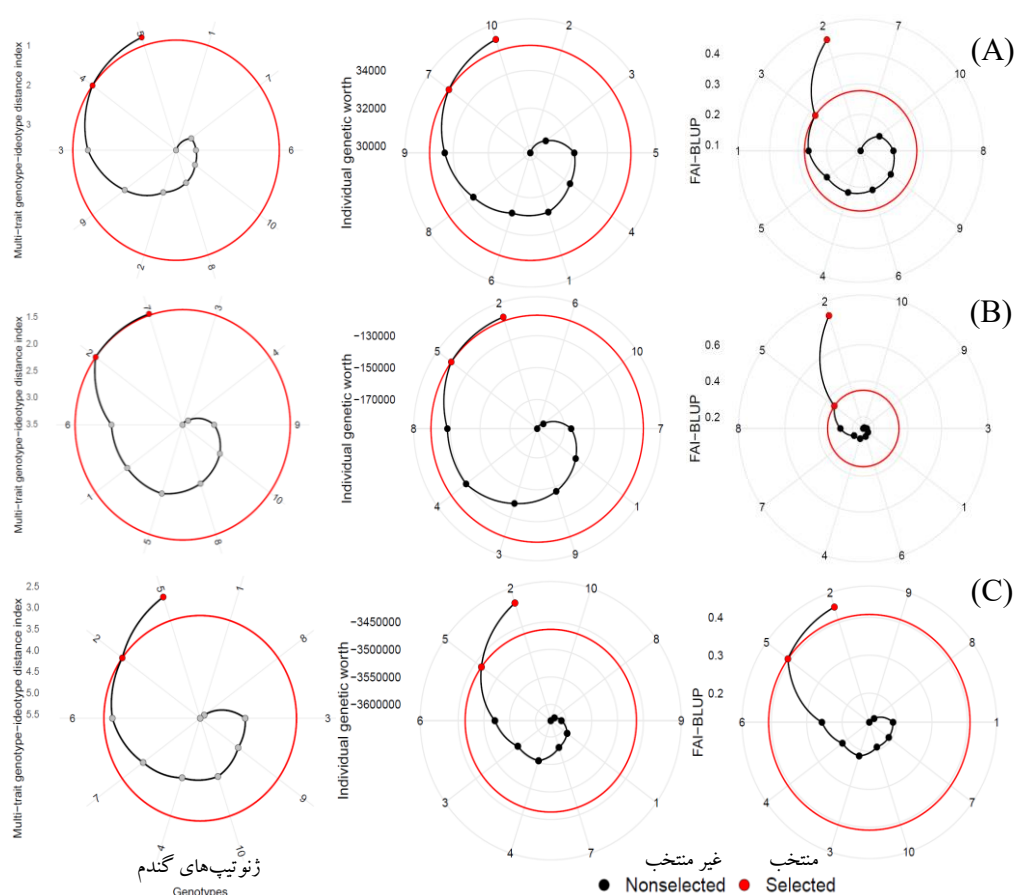


شکل ۲- نمودار بای پلات تجزیه به مؤلفه‌های اصلی برای ژنوتیپ‌های گندم و شاخص‌های تحمل به تنش خشکی

Fig. 2. Biplot analysis of PCA for wheat genotypes and drought tolerance indices

برتر بر اساس داده‌های سال دوم و میانگین داده‌های دو ساله شناخته شدند (شکل ۳). شاخص‌ها و مدل‌های آماری مبتنی بر صفات و پارامترهای مختلف، به عنوان ابزارهایی کارآمد و قابل اعتماد در گزینش ژنوتیپ‌ها و ارقام با پتانسیل عملکرد بالا و فنوتیپ مطلوب، به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند. نتایج حاصل از آزمایش‌های پیشین نشان داده است که استفاده از شاخص‌های گزینشی چندصفتی نقش مؤثری در شناسایی ژنوتیپ‌های برتر در طیف وسیعی از گیاهان زراعی از جمله گندم، جو، سویا، لوبیا و سورگوم دارند. کارایی بالای این رویکردها در پژوهش‌های مختلف گزارش شده است. در همین راستا، نتایج حاصل از پژوهش حاضر با یافته‌های گزارش شده توسط سایر محققان مطابقت دارد (Pour-Aboughadareh *et al.*, 2021; Jadidi *et al.*, 2022; Olivoto *et al.*, 2020; 2021). با توجه به نتایج حاصل از داده‌های هر سال و میانگین دو ساله و سه شاخص مورد بررسی، مشخص شد که الگوی گزینشی یکسانی بین سه شاخص وجود نداشت. با این حال ارقام افروز و فرین به عنوان ژنوتیپ‌های برتر از نظر تحمل به تنش خشکی شناخته شدند.

جهت انتخاب ژنوتیپ‌های برتر بر اساس کلیه شاخص‌های محاسبه شده و عملکرد دانه از سه شاخص FAI-BLUP، MGIDI و Smith-Hazel استفاده شد. در هر یک از این مدل‌ها، هر یک از شاخص‌های تحمل و حساسیت در کنار عملکرد دانه به عنوان یک متغیر در نظر گرفته شدند. نتایج به دست آمده از مدل‌های آماری به صورت گرافیکی در شکل ۳ نشان داده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده از غربال ژنوتیپ‌های گندم بر اساس شاخص MGIDI، ارقام امین و فرین در سال اول و ارقام افروز و تکتاز در سال دوم و ارقام افروز و فرین در میانگین دو سال آزمایش به عنوان برترین ژنوتیپ‌ها از نظر عملکرد دانه و شاخص‌های تحمل خشکی شناخته شدند (شکل ۳). رقم تکتاز و لاین D-400-18 در سال اول، ارقام افروز و فرین در سال دوم و بر اساس میانگین داده‌های دوساله به عنوان برترین ژنوتیپ‌ها بر اساس مدل Smith-Hazel از سایر ژنوتیپ‌ها متمایز شدند. بر اساس شاخص FAI-BLUP نیز سه ژنوتیپ بر اساس هر یک از مجموعه داده‌ها به عنوان ژنوتیپ‌های برتر شناخته شدند، بطوریکه در سال اول رقم افروز و لاین M-99-9 جزء ژنوتیپ‌های مطلوب بودند، در حالیکه افروز و فرین به عنوان ژنوتیپ‌های



شکل ۳- نمودارهای دایره‌ای شاخص‌های MGIDI- FAI-BLUP و Smith-Hazel بر اساس میانگین داده‌های سال اول (A)، سال دوم (B) و میانگین دو سال (C) ژنوتیپ‌های گندم

Fig. 3. Circle plots depicted using on the MGIDI, FAI-BLUP, and Smith-Hazel indices for the first year (A), second year (B), and two-year means (C) of wheat genotypes

از چپ به راست و به ترتیب؛ دایره‌های قرمز مرکزی نشان دهنده نقطه برش بر اساس شدت انتخاب هستند. ژنوتیپ‌های منتخب بر اساس هر شاخص با نقطه‌های قرمز رنگ مشخص شده‌اند

From left to right the central red circles indicate the determined cut-point based on selection pressure. Selected wheat genotypes highlighted by red dots

نتیجه‌گیری

بین شاخص‌های تحمل و حساسیت به خشکی با عملکرد دانه در هر دو شرایط بدون تنش و تنش خشکی نشان داد که از شاخص‌های STI، GMP، MP، HM می‌توان به‌عنوان مناسب‌ترین شاخص‌ها جهت غربال ژنوتیپ‌های گندم متحمل به خشکی استفاده کرد. نتایج حاصل از شاخص‌های گزینشی MGIDI- FAI-BLUP و Smith-Hazel بر اساس عملکرد دانه و هریک از شاخص‌های تحمل و حساسیت به خشکی نشان داد که این شاخص‌ها

نتایج این پژوهش که با هدف ارزیابی و مقایسه واکنش ژنوتیپ‌های گندم نان و دوروم به تنش خشکی انتهای فصل با استفاده از شاخص‌های تحمل به خشکی اجرا شد نشان داد که کلیه ژنوتیپ‌های گندم مورد بررسی تحت تاثیر تنش خشکی انتهای فصل قرار گرفته و عملکرد دانه نسبت به شرایط بدون تنش (آبیاری کامل) در حدود ۳۰ درصد کاهش یافت. ارزیابی روابط

سپاسگزاری

نگارندگان از پشتیبانی‌های موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر برای اجرای این پروژه تحقیقاتی با کد مصوب ۰۱-۰۳-۰۳-۰۱۱-۰۴۰۲۸۶ سپاسگزاری می‌کنند.

کارایی مناسبی جهت گزینش ژنوتیپ‌های گندم متحمل به خشکی داشتند. بر اساس نتایج پژوهش حاضر، ارقام افروز و فرین به لحاظ تحمل بالاتر، به‌عنوان والدین مناسب برای تولید ارقام با عملکرد دانه پایدار در شرایط تنش خشکی انتهای فصل قابل استفاده هستند.

References

منابع مورد استفاده

- Acevedo, M., Zurn, J.D., Molero, G., Singh, P., He, X., Aoun, M. and McCandless, L., 2018. The role of wheat in global food security. In: Agricultural Development and Sustainable Intensification. pp.81-110. <https://doi.org/10.4324/9780203733301-4>
- Ahmadi, G.H., Siosemarde, A., Sohrabi, Y. and Jalal Kamali, M.R., 2020. Evaluation of response of durum wheat (*Triticum durum* Desf.) lines to terminal drought stress. *Applied Research in Field Crops*, 33(1), pp.23-43. [In Persian]. doi: 10.22092/aj.2019.125259.1384
- Aktaş, H., 2016. Drought tolerance indices of selected landraces and bread wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes derived from synthetic wheats. *Applied Ecology and Environmental Research*, 14(4), pp.177-189. https://doi.org/10.15666/aeer/1404_177189
- Anonymous, 2024. Agricultural statistics of 2023-2024 cropping season. Ministry of Agriculture -Jahad, Vol. 1. [In Persian].
- Bahraini Vijuyeh, V., Dadashi, M.R. and 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), pp.111-121. [In Persian]. <https://doi.org/10.22067/gsc.v17i1.69690>
- Benakanahalli, N.K., Sridhara, S., Ramesh, N., Olivoto, T., Sreekantappa, G., Tamam, N., Abdelbacki, A.M.M., Elansary, H.O. and Abdelmohsen, S.A.M., 2021. A framework for Identification of stable genotypes based on MTSI and MGDII indexes: an example in guar (*Cymopsis tetragonoloba* L.). *Agronomy*, 11(6), pp.1221. <https://doi.org/10.3390/agronomy11061221>
- Bohra, A., Choudhary, M., Bennett, D., Joshi, R., Mir, R.R. and Varshney, R.K., 2024. Drought-tolerant wheat for enhancing global food security. *Functional & Integrative Genomics*, 24(6), pp.212. <https://doi.org/10.1007/s10142-024-01488-8>
- Bouslama, M. and Schapaugh, W.T., 1984. Stress tolerance in soybeans. I. Evaluation of three screening techniques for heat and drought tolerance. *Crop science*, 24(5), pp.933- 937.
- Boussen, H., Ben Salem, M., Slama, A., Mallek-Maalej, E. and Rezgui, S., 2010. Evaluation of drought tolerance indices in durum wheat recombinant inbred lines. 2th International Conference on Drought Management FAO-CIHEAM, 4-6 March 2010, Istanbul, Turkey.

- Drikvand, R., Doosty, B. and Hosseinpour, T., 2012.** Response of rainfed wheat genotypes to drought stress using drought tolerance indices. *Journal of Agricultural Science*, 4(7), 126. <https://doi.org/10.5539/JAS.V4N7P126>
- Ehdaie, B., Alloush, G.A. and Waines, J. G., 2008.** Genotypic variation in linear rate of grain growth and contribution of stem reserves to grain yield in wheat. *Field Crops Research*, 106, pp.34-43.
- Feizi, M., Solouki, M., Sadeghzadeh, B., Fakheri, B. and Mohammadi, S.A., 2020.** Evaluation of drought tolerance indices for barley landraces under irrigated and dry conditions. *Bioscience Journal*, 36(5), pp.1518-1527. <https://doi.org/10.14393/bj-v36n5a2020-41864>
- Fernandez, G.C.J., 1992.** Effective selection criteria for assessing plant stress tolerance. pp. 257-270. In: Kuo, C.G. (Ed.) *Adaptation of Food Crops to Temperature and Water Stress: Proceedings of an International Symposium*, Tainan, Taiwan.
- Fischer, R.A. and Maurer, R., 1978.** Drought resistance in spring wheat cultivars. I. Grain yield responses. *Australian Journal of Agricultural Research*, 29(5), pp.897-912. <https://doi.org/10.1071/AR9780897>
- Gavuzzi, P., Rizza, F., Palumbo, M., Campanile, R.G., Ricciardi, G.L. and Borghi, B., 1997.** Evaluation of field and laboratory predictors of drought and heat tolerance in winter cereals. *Canadian Journal of Plant Science*, 77(4), pp.523-531. <https://doi.org/10.4141/P96-130>
- Hossain, A.B.S., Sears, R.G., Cox, T.S. and Paulsen, G.M., 1990.** Desiccation tolerance and its relationship to assimilate partitioning in winter wheat. *Crop Science*, 30(3), pp.622-627. <https://doi.org/10.2135/cropsci1990.0011183X003000030030x>
- Jadidi, O., Etmnan, A., Azizi-Nezhad, R., Ebrahimi, A., & Pour-Aboughadareh, A., 2022.** Physiological and molecular responses of barley genotypes to salinity stress. *Genes*, 13(11), 2040. <https://doi.org/10.3390/genes13112040>
- Khalili, M., Naghavi, M.R., Aboughadareh, A.P. and Talebzadeh, S.J., 2012.** Evaluating of drought stress tolerance based on selection indices in spring canola cultivars (*Brassica napus* L.). *Journal of Agricultural Science*, 4(11), pp.78. <https://doi.org/10.5539/JAS.V4N11P78>
- Langridge, P., Alaux, M., Almeida, N.F., Ammar, K., Baum, M., Bekkaoui, F. and Zhang, X., 2022.** Meeting the challenges facing wheat production: the strategic research agenda of the global wheat initiative. *Agronomy*, 12(11), pp. 2767. <https://doi.org/10.3390/agronomy12112767>
- Li, Q., Ye, A., Wada, Y., Zhang, Y. and Zhou, J., 2024.** Climate change leads to an expansion of global drought-sensitive area. *Journal of Hydrology*, 632, pp.130874. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.130874>
- Mehraban, A., Tobe, A., Gholipouri, A., Amiri, E., Ghafari, A. and Rostaii, M., 2018.** Evaluation of drought tolerance indices and yield stability of wheat cultivars to drought stress in different growth stage. *World Journal of Environmental Biosciences*, 7(1-2018), pp.8-14.
- Mohammed, A.K. and Kadhem, F.A., 2017.** Screening drought tolerance in bread wheat genotypes (*Triticum*

- aestivum* L.) using drought indices and multivariate analysis. *Iraqi Journal of Agricultural Sciences*, 48, pp.41-55. <https://doi.org/10.36103/ijas.v48ispecial.244>
- Nouraein, M., Mohammadi, S.A., Aharizad, S., Moghaddam, M. and Sadeghzadeh, B., 2013.** Evaluation of drought tolerance indices in wheat recombinant inbred line population. *Annals of Biological Research*, 4(3), pp.113-122.
- Olivoto, T. and Lucio, A.D., 2020.** Metan: an R package for multi-environment trial analysis. *Methods in Ecology and Evolution*, 11, pp.783-789. <https://doi.org/10.1111/2041-210x.13384>
- Olivoto, T. and Nardino, M., 2020.** MGIDI: A novel multi-trait index for genotype selection in plant breeding. *Bioinformatics*, pp.1-22. <https://doi.org/10.1101/2020.07.23.217778>
- Patel, J.M., Patel, A.S., Patel, C.R., Mamrutha, H.M., Pradeep, S. and Pachchigar, K.P., 2019.** Evaluation of selection indices in screening durum wheat genotypes combining drought tolerance and high yield potential. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 8(4), pp.1165-1178. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2019.804.134>
- Pour-Aboughadareh, A., Yousefian, M., Moradkhani, H., Moghaddam Vahed, M., Poczai, P. and Siddique, K.H.M., 2019.** iPASTIC: An online toolkit to estimate plant abiotic stress indices. *Applications in Plant Sciences* 7(7): e11278. <https://doi.org/10.1002/aps3.11278>
- Pour-Aboughadareh, A. and Poczai, P., 2021.** A dataset on multi-trait selection approaches for screening desirable wild relatives of wheat. *Data in Brief*, 39, 107541. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2021.107541>
- Rahmati, H., Nakhzari Moghadam, A., Rahemi Karizaki, A. and Evarsaji, Z., 2020.** Evaluation of drought tolerance in durum wheat genotypes using drought tolerance indices. *Journal of Crop Breeding*, 12(13), pp.174-183. [In Persian]. doi: 10.29252/jcb.12.33.174
- Rocha, J.R., Machado, J.C. and Carneiro, P.C.S., 2018.** Multitrait index based on factor analysis and ideotype-design: Proposal and application on elephant grass breeding for bioenergy. *Global Change Biology and Bioenergy*, 10, pp.52-60. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2004.01.013>
- Rosielle, A.A. and Hamblin, J., 1981.** Theoretical aspects of selection for yield in stress and non-stress environment 1. *Crop science*, 21(6), pp.943-946. <https://doi.org/10.2135/cropsci1981.0011183X002100060033x>
- Schneider, K.A., Rosales-Serna, R., Ibarra-Perez, F., Cazares-Enriquez, B., Acosta-Gallegos, J.A., Ramirez-Vallejo, P. and Kelly, J.D., 1997.** Improving common bean performance under drought stress. *Crop Science*, 37(1), pp.43-50. <https://doi.org/10.2135/cropsci1997.0011183X003700010007x>
- Subhani, G.M., Ahmad, J., Anwar, J., Hussain, M. and Mahmood, A., 2015.** Identification of drought tolerant genotypes of barley (*Hordeum vulgare* L.) through stress tolerance indices. *JAPS: Journal of Animal & Plant Sciences*, 25(3), pp.686-692.
- Yarahmadi, S., Nematzade, G., Sabouri, H. and Najafi, Z.H., 2020.** Relationships between drought stress

tolerance indices and their use in wheat screening programs. *Journal of Crop Breeding*, 12(33), pp.29-41. [In Persian]. doi: 10.29252/JCB.12.33.29

Zaveri, E.D., Damania, R. and Engle, N.L., 2023. Droughts and Deficits: The Global Impact of Droughts on Economic Growth (English). Policy research working paper ; no. WPS 10453 Washington, D.C. World Bank Group. <http://documents.worldbank.org/curated/en/099520405232341146>