



Selection of drought-tolerant oat (*Avena sativa* L.) genotypes based on grain yield and stress tolerance indices

Seyed Mehdi Safavi^{1,2} , Sohbat Bahraminejad^{2,3} & Hazhir Beheshtizadeh²

¹ Department of Genetics and Plant breeding, Ker.C., Islamic Azad University, Kermanshah, Iran.

² Department of Plant Production and Genetics, Campus of Agriculture and Natural Resources, Razi University, Kermanshah, Iran.

³ Cereal Research Center, Razi University, Kermanshah, Iran.

Corresponding author. E-mail: sohbah72@gmail.com

ABSTRACT

Introduction: Heat and dry stress events during the wheat-growing season, particularly during wheat grain filling, are among the prevalent environmental constraints that adversely affect wheat growth and productivity worldwide. Because people in developing countries are highly dependent on cereal-based diets, they are prone to Zn-related diseases. The situation becomes worse when the crop is grown in soil with low Zn content. Studies have shown that the application of Zinc (Zn) successfully increased wheat grain yield and grain Zn content and improved wheat tolerance to drought. The present studies are designed to provide a better understanding and further information on the response of wheat to Zn application under drought conditions.

Materials and methods: The present study included two experiments: a preliminary experiment that aimed to elucidate the effect of the application of Zn via foliar or seed priming on wheat tolerance to drought stress and a field study that was designed to investigate the effect of exogenous proline and foliar application of Zn on wheat yield and grain nutrient. A preliminary experiment detected the effects of the Zn application method on the biochemical and molecular characteristics of drought-stressed wheat. Proline-biosynthesis-related gene [Δ 1-pyrroline-5-carboxylate reductase (P5CS)] expression, proline accumulation, and malondialdehyde content were determined four days after drought stress was imposed. A subsequent field experiment (Experiment 2) was also conducted to elucidate the effect of foliar application of Zn [0, 0.1, 0.2 and 0.3% (w/v)] individually and in all possible combinations with proline (0 and 15 μ mole) on wheat performance under post-anthesis drought stress condition. The foliar application was applied at anthesis. All plants were exposed to drought stress by withholding irrigation for 21 days. The field experiment was conducted in 2021/22 during the wheat-growing season at a commercial wheat-grown farm. The experiment site is located in Sirvan County, Ilam Province. A durum wheat cultivar, 'Saji', was used in both experiments.

Results: Zn application, mainly when applied via foliar, increased P5CS mRNA accumulation and proline content and decreased malondialdehyde content in the leaf compared to the control treatment. Results of the field experiment showed that the combined application of Zn the control treatment, exogenously applied proline increased grain yield by up to 4.4%. Results showed that the foliar application of Zn at 0.2% (w/v) in combination with proline (15 mM) had a more significant effect on increased grain yield. Foliar-applied Zn at 0.1%, 0.2% and 0.3% (w/v) of ZnSO₄ solution decreased grain P content by 8.3%, 14.7% and 18.1%, respectively, as compared with the control. Foliar Zn application of 0.1%, 0.2%, and 0.3% (w/v) of ZnSO₄·7H₂O solution increased Zn content in grain by 6.3%, 11.9%, and 19.1%, respectively, to control plants.

Conclusion: Regarding the cost for farmers, foliar application of Zn at a concentration of 0.3% at the anthesis stage can be suggested as the best treatment to improve both the quantity and quality of wheat.

Keywords: Gene expression, malondialdehyde, Plant stress, Zn application.

Article Type: Research Article

Article history: Received: 03 Nov 2024, Revised: 14 Jan 2025, Accepted: 08 Mar 2025, Published online: 21 Mar 2026

Cite this article: Safavi, S. M., Bahraminejad, S. & Beheshtizadeh, H. (2026). Selection of drought-tolerant oat (*Avena sativa* L.) genotypes based on grain yield and stress tolerance indices. *Cereal Biotechnology and Biochemistry*, 5(1), 61-88. DOI: [10.22126/cbb.2025.11884.1103](https://doi.org/10.22126/cbb.2025.11884.1103)

© The Author(s).

Publisher: Razi University



[10.22126/cbb.2025.11884.1103](https://doi.org/10.22126/cbb.2025.11884.1103)



بیوتکنولوژی و بیوشیمی غلات



شاپا الکترونیکی: ۵۱۷۰-۲۷۸۳

بیوتکنولوژی و بیوشیمی غلات

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

گزینش ژنوتیپ‌های یولاف زراعی (*Avena sativa* L.) متحمل به خشکی بر اساس عملکرد دانه و شاخص‌های تحمل تنش

سید مهدی صفوی^{۱*}، صحبت بهرامی‌نژاد^۲ و هژیر بهشتی‌زاده^۳

^۱ گروه ژنتیک و به نژادی گیاهی، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران.

^۲ گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده علوم و مهندسی کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.

^۳ مرکز تحقیقات غلات، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.

✉ نویسنده مسئول: sohbah72@gmail.com

چکیده

مقدمه: یولاف زراعی (*Avena sativa* L.) به‌عنوان محصولی با ارزش تغذیه‌ای بالا، نقش مهمی در تأمین غذای انسان و دام دارد و در سال‌های اخیر، به‌دلیل افزایش تقاضا برای محصولات غذایی سالم، محبوبیت آن در بین مصرف‌کنندگان سلامت‌محور، رشد چشمگیری یافته است. این تقاضا، ضرورت بهبود تولید یولاف و توسعه روش‌های کارآمد کشاورزی برای حفظ و افزایش بهره‌وری آن را بیشتر کرده است. اگرچه یولاف به‌دلیل سازگاری بالا با شرایط اقلیمی مختلف و توانایی رشد در محیط‌های سخت، به‌عنوان یکی از مقاوم‌ترین غلات در برابر تنش‌های غیرزیستی شناخته می‌شود. با این وجود، تغییرات اقلیمی و کاهش منابع آبی و به ویژه بروز تنش خشکی، چالش‌های جدیدی برای تولید این محصول، ایجاد کرده است و تأثیرات منفی زیادی بر رشد و عملکرد آن می‌گذارد. در این پژوهش، عملکرد دانه ۲۱ ژنوتیپ یولاف در سه شرایط آبی مختلف بررسی و توسط شاخص‌های مختلف مقاومت به خشکی ارزیابی شده است تا ژنوتیپ‌هایی شناسایی شوند که قابلیت حفظ عملکرد بالا در شرایط مختلف را داشته باشند.

مواد و روش‌ها: این پژوهش با هدف ارزیابی عملکرد دانه و شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی با استفاده از شاخص‌های تحمل به تنش، در ۲۱ ژنوتیپ یولاف، در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار و تحت سه شرایط آبی (بدون تنش)، دیم و تنش خشکی بعد از گلدهی، در مزرعه تحقیقاتی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه رازی کرمانشاه در سال زراعی ۱۳۹۴-۱۳۹۳ انجام شد.

یافته‌ها: نتایج تجزیه واریانس ساده برای صفت عملکرد دانه در شرایط آبی (بدون تنش)، دیم و تنش خشکی بعد از گلدهی، تفاوت معنی‌داری را بین ژنوتیپ‌های یولاف نشان داد. شاخص تحمل به تنش (STI)، میانگین بهره‌وری (MP) و میانگین هندسی بهره‌وری (GMP) همبستگی مثبت و بسیار معنی‌داری با عملکرد دانه در هر دو شرایط تنش و بدون تنش داشتند و بنابراین برای غربالگری ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی مناسب می‌باشند. نتایج تجزیه به مؤلفه‌های اصلی نشان داد که دو مؤلفه اول بیش از ۹۹ درصد از تنوع داده‌ها را توجیه کردند. بر اساس نمودار بای‌پلات، ژنوتیپ‌های ۷ و ۱۷ در هر دو شرایط عملکرد مطلوبی داشتند و ژنوتیپ‌های ۱۹، ۲۱، ۱۲، ۱۳، ۶ و ۵ برای کشت در شرایط خشکی انتهای فصل پیشنهاد شدند.

نتیجه‌گیری: در شرایط دیم، ژنوتیپ‌های ۷، ۱۷، ۵، ۹ و ۱۳ و در شرایط تنش خشکی بعد از گلدهی، ژنوتیپ‌های ۵، ۱۹، ۲۱، ۳ و ۱۷ با شاخص‌های مطلوب و عملکرد پایدار شناسایی شدند. نتایج این پژوهش می‌تواند به بهبود برنامه‌های اصلاحی یولاف و توسعه ارقام مقاوم به خشکی کمک کند.

واژه‌های کلیدی: بای‌پلات، تنش خشکی، دیم، شاخص‌های تحمل به تنش، یولاف زراعی.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

نوع مقاله: دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۱۳ **اصلاح:** ۱۴۰۳/۱۰/۲۵ **پذیرش:** ۱۴۰۳/۱۲/۱۸ **انتشار آنلاین:** ۱۴۰۵/۰۱/۰۱

استناد: صفوی، س. م.، بهرامی‌نژاد، ص. و بهشتی‌زاده، ه. (۱۴۰۵). گزینش ژنوتیپ‌های یولاف زراعی (*Avena sativa* L.) متحمل به خشکی بر اساس عملکرد دانه و

شاخص‌های تحمل تنش. *بیوتکنولوژی و بیوشیمی غلات*، ۱(۱)، ۵-۸۸. DOI: [10.22126/cbb.2025.11884.1103](https://doi.org/10.22126/cbb.2025.11884.1103)



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه رازی

مقدمه

یولاف زراعی (*Avena sativa* L.) یکی از غلات مهم با ارزش تغذیه‌ای بالا است که به دلیل دارا بودن مقادیر قابل توجهی پروتئین، فیبر، ویتامین‌ها و مواد معدنی، نقش مهمی در تغذیه انسان و دام ایفا می‌کند (Wen et al., 2023; Dhakal et al., 2024). این گیاه به‌طور گسترده به‌عنوان علوفه و محصول دانه‌ای در کشاورزی جهانی استفاده می‌شود و بیش از ۸۰ درصد از سطح زیر کشت جهانی یولاف به این گونه اختصاص دارد که اهمیت آن را در مقایسه با سایر گونه‌های یولاف برجسته می‌کند (Kebede et al., 2023). در سال‌های اخیر، به دلیل افزایش تقاضا برای محصولات غذایی سالم و کاربردهای متنوع یولاف، محبوبیت آن در بین مصرف‌کنندگان سلامت‌محور، رشد چشمگیری یافته است. این افزایش تقاضا، ضرورت بهبود تولید یولاف و توسعه روش‌های کارآمد کشاورزی برای حفظ و افزایش بهره‌وری آن را بیشتر کرده است (Wen et al., 2023).

از نظر تولید نیز یولاف یکی از غلات مهم در نظام تولید غلات جهان به شمار می‌رود. بر اساس داده‌های آماری، در سال‌های اخیر سطح زیر کشت جهانی یولاف در حدود ۹/۵۶ میلیون هکتار بوده و تولید جهانی آن حدود ۵۷/۲۲ میلیون تن گزارش شده است (FAO, 2022). متوسط عملکرد جهانی نیز در حدود ۲/۳۶ تن در هکتار گزارش شده است. در ایران، سطح زیر کشت و تولید یولاف در مقایسه با غلات عمده کشور محدودتر است و این محصول عمدتاً در مقیاس‌های کوچک‌تر و برای مصارف علوفه‌ای و

دانه‌ای کشت می‌شود. با وجود اهمیت جهانی این محصول، یولاف در ایران سهم محدودی در نظام تولید زراعی دارد و اطلاعات مربوط به سطح زیرکشت و میزان تولید آن در سالنامه‌های آماری کشور به‌صورت مستقل و منظم گزارش نشده است. این محدودیت در دسترسی به آمار تولیدی، در کنار اهمیت یولاف به‌عنوان یک محصول غذایی و علوفه‌ای و ظرفیت آن برای تنوع‌بخشی به تولید غلات، ضرورت توجه بیشتر به شناسایی و ارزیابی منابع ژنتیکی این گیاه را در شرایط ایران برجسته می‌کند. به‌ویژه، ارزیابی ژنوتیپ‌های جدید یولاف می‌تواند اطلاعات ارزشمندی درباره ظرفیت این گیاه برای حفظ عملکرد در شرایط محدودیت آب فراهم کند.

یولاف به دلیل سازگاری بالا با شرایط اقلیمی مختلف و توانایی رشد در محیط‌های سخت، به‌عنوان یکی از مقاوم‌ترین غلات در برابر تنش‌های غیرزیستی مانند خشکی، شوری و دما شناخته می‌شود. با این وجود، تغییرات اقلیمی و کاهش منابع آبی، چالش‌های جدیدی برای تولید این محصول، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، ایجاد کرده‌اند (Wen et al., 2023; Ghimire et al., 2024). خشکی، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین تنش‌های غیرزیستی، تأثیرات منفی شدیدی بر رشد، فتوسنتز و عملکرد دانه دارد و در مراحل حساس رشد، از جمله گلدهی و پر شدن دانه، موجب کاهش قابل توجه عملکرد و کیفیت محصول می‌شود (Zhang et al., 2022; Ghimire et al., 2024). بر اساس مطالعات، تنش خشکی می‌تواند عملکرد دانه یولاف را تا ۶۹ درصد

کاهش دهد و شدت این کاهش به ژنوتیپ و مرحله رشد گیاه وابسته است (Zhao et al., 2021). بنابراین، شناسایی ژنوتیپ‌هایی که ضمن حفظ عملکرد بالا در شرایط مطلوب، توانایی حفظ عملکرد در شرایط محدودیت آب را نیز دارند، از اهمیت زیادی در برنامه‌های به‌نژادی یولاف برخوردار است.

برای ارزیابی واکنش ژنوتیپ‌ها به تنش خشکی و شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل، شاخص‌های مختلفی بر اساس عملکرد ژنوتیپ در شرایط تنش و بدون تنش پیشنهاد شده‌اند. شاخص تحمل به تنش (STI) نخستین بار توسط فرناندز (Fernandez, 1992) معرفی شد و یکی از شاخص‌های متداول برای شناسایی ژنوتیپ‌هایی است که توانایی دستیابی به عملکرد بالا را هم در شرایط بدون تنش و هم در شرایط تنش دارند. همچنین، میانگین بهره‌وری (MP) و میانگین هندسی بهره‌وری (GMP) توسط مک‌کیگ و کلارک (McCaig & Clarke, 1982) پیشنهاد شدند و از آن زمان به‌طور گسترده در ارزیابی پاسخ ژنوتیپ‌های غلات به تنش خشکی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در مجموع، استفاده هم‌زمان از این شاخص‌ها می‌تواند امکان مقایسه عملکرد ژنوتیپ‌ها در شرایط متفاوت رطوبتی و شناسایی ژنوتیپ‌های دارای عملکرد پایدارتر را فراهم کند.

فرناندز (Fernandez, 1992) ژنوتیپ‌ها را بر اساس پاسخ عملکردشان به شرایط تنش به چهار گروه طبقه‌بندی کرده است: گروه A: ژنوتیپ‌هایی که در هر دو شرایط تنش و غیرتنش عملکرد بالایی دارند. گروه B:

ژنوتیپ‌هایی که فقط در شرایط بدون تنش عملکرد بالایی دارند. گروه C: ژنوتیپ‌هایی که فقط در شرایط تنش عملکرد بالایی نشان می‌دهند. گروه D: ژنوتیپ‌هایی که در هر دو شرایط تنش و بدون تنش عملکرد ضعیفی دارند. پس از اندازه‌گیری عملکرد دانه در شرایط آبی (بدون تنش)، دیم و تنش خشکی بعد از گلدهی، واکنش ژنوتیپ‌ها ارزیابی گردید.

در مطالعات انجام‌شده روی یولاف نیز کارایی این شاخص‌ها در شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی گزارش شده است. بهرامی‌نژاد و همکاران (Bahraminejad, 2016) با ارزیابی ژنوتیپ‌های یولاف (*Avena sativa* L.) از نظر واکنش به تنش خشکی، کاربرد شاخص‌های مختلف تحمل و حساسیت به خشکی را در تفکیک ژنوتیپ‌های متحمل بررسی کردند. نتایج نشان داد که بین ژنوتیپ‌ها از نظر پاسخ به تنش خشکی تنوع قابل توجهی وجود داشت و شاخص‌های SI، DSI و MP توانایی مناسبی در تشخیص تفاوت ژنوتیپ‌ها از نظر تحمل به خشکی داشتند. همچنین، همبستگی شاخص‌های مذکور با صفات مرتبط با عملکرد، به‌ویژه وزن و تعداد دانه، نشان داد که می‌توان از این شاخص‌ها به‌عنوان معیارهای کمی برای غربال ژنوتیپ‌های یولاف استفاده کرد. در این مطالعه، تجزیه به مؤلفه‌های اصلی نیز توانست ژنوتیپ‌ها را بر اساس میزان حساسیت یا مقاومت به خشکی در گروه‌های متمایزی قرار دهد و نتایج PCA با الگوی حاصل از همبستگی بین شاخص‌ها و صفات عملکردی مطابقت داشت. مطالعه‌ای بر روی ۲۱ ژنوتیپ

یولاف در دو شرایط آبی و دیم در شهرستان سرپل ذهاب نشان داد که شاخص‌های STI, GMP, MP, HAM و YI بالاترین همبستگی را با عملکرد در هر دو شرایط دیم و آبی داشتند (Naseri, 2022). این یافته‌ها نشان می‌دهند که شاخص‌های مبتنی بر عملکرد می‌توانند ابزار مناسبی برای تفکیک ژنوتیپ‌های یولاف از نظر واکنش به محدودیت آب باشند.

شواهد حاصل از سایر غلات نیز اهمیت این شاخص‌ها را در ارزیابی تحمل به خشکی تأیید کرده‌اند. در ارزیابی ژنوتیپ‌های جو تحت شرایط کم‌آبی، همبستگی مثبت عملکرد با شاخص‌های MP, GMP و STI نشان داد که این شاخص‌ها می‌توانند معیارهای مناسبی برای شناسایی ژنوتیپ‌های با عملکرد بالا و سازگار با تنش خشکی باشند (Saidi et al., 2024; Ferioun et al., 2024).

همچنین مطالعه‌ای بر روی لندریس‌ها (جمعیت‌های بومی) و ژنوتیپ‌های جو در شرایط مطلوب و تنش خشکی، کارایی شاخص‌های MP, GMP, STI و YI را در ارزیابی واکنش ژنوتیپ‌ها به تنش خشکی نشان داد (Feizi et al., 2020). بنابراین اگرچه شاخص‌های منفرد اطلاعات ارزشمندی در مورد واکنش ژنوتیپ‌ها ارائه می‌کنند، استفاده هم‌زمان از چند شاخص و بررسی روابط آنها با عملکرد می‌تواند ارزیابی دقیق‌تری از تحمل به خشکی فراهم کند. در پژوهشی جدیدتر، خان (Khan, 2025) با ارزیابی ۳۵ ژنوتیپ گندم بهاره در شرایط آبی و دیم، کارایی شاخص‌های مختلف تحمل به خشکی را با استفاده از پارامترهای ژنتیکی، همبستگی و تجزیه به

مؤلفه‌های اصلی بررسی کرد. نتایج نشان داد که شاخص‌های MP, HM, GMP, STI, YI و DI ارتباط مناسبی با عملکرد بالقوه ژنوتیپ‌ها در هر دو شرایط تنش و بدون تنش داشتند و می‌توان از آنها برای شناسایی ژنوتیپ‌های دارای عملکرد بالا و تحمل مناسب به خشکی استفاده کرد. همچنین، شاخص‌های SSI, SSPI, SDI, YSI و RDI در تفکیک ژنوتیپ‌های حساس و متحمل به شرایط تنش مفید بودند. این یافته‌ها نشان می‌دهد که استفاده هم‌زمان از چند شاخص و ترکیب آن با روش‌های چندمتغیره مانند PCA می‌تواند نسبت به اتکا به یک شاخص منفرد، ارزیابی جامع‌تری از واکنش ژنوتیپ‌ها به خشکی فراهم کند.

با وجود کاربرد گسترده شاخص‌های تحمل به خشکی، کمبود اطلاعات کافی درباره تنوع ژنتیکی یولاف و واکنش ژنوتیپ‌های آن به شرایط مختلف رطوبتی، همچنان یکی از چالش‌های مهم در این زمینه است. مطالعات پیشین بیشتر بر غلات اصلی مانند گندم تمرکز داشته‌اند (Abd El-Aty et al., 2024; Rijal et al., 2024)، در حالی که یولاف، با وجود پتانسیل قابل توجه برای استفاده در سامانه‌های کشاورزی پایدار، کمتر مورد توجه قرار گرفته است (Bahraminejad et al., 2016). افزون بر این، اتکا به یک شاخص منفرد ممکن است به دلیل تفاوت در نحوه محاسبه و هدف هر شاخص، منجر به رتبه‌بندی متفاوت ژنوتیپ‌ها شود. از این‌رو، استفاده از مجموعه‌ای از شاخص‌ها و روش‌های چندمتغیره می‌تواند در شناسایی ژنوتیپ‌های برتر اطمینان بیشتری ایجاد کند.

در پژوهش‌های اخیر، از تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA) و بای‌پلات برای تحلیل هم‌زمان شاخص‌های تحمل به خشکی، کاهش پیچیدگی داده‌ها و شناسایی الگوهای موجود در واکنش ژنوتیپ‌ها استفاده شده است (Barati et al., 2023; Rijal et al., 2024). این روش‌ها امکان بررسی روابط میان شاخص‌های مختلف و عملکرد و همچنین شناسایی ژنوتیپ‌های دارای عملکرد مطلوب در شرایط مختلف محیطی را فراهم می‌کنند. بهرامی‌نژاد و همکاران (Bahraminejad et al., 2016) نیز با بررسی ۲۵ ژنوتیپ یولاف زراعی، تنوع قابل توجهی در عملکرد دانه و شاخص‌های تحمل به خشکی مشاهده کردند و ژنوتیپ‌هایی مانند UFRGS940886-4 و Euro را به‌عنوان ژنوتیپ‌های متحمل معرفی کردند. این نتایج بر اهمیت استفاده از شاخص‌های تحمل به خشکی در کنار روش‌های چندمتغیره برای غربالگری ژنوتیپ‌های یولاف تأکید دارند. پژوهش‌های مشابه در سایر غلات، از جمله جو، نیز قابلیت این رویکردها را در شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی تأیید کرده‌اند (Ahakpaz et al., 2020).

اگرچه مطالعاتی درباره تحمل به خشکی در یولاف انجام شده است، شواهد موجود در ایران، به‌ویژه در زمینه ارزیابی ژنوتیپ‌های جدید یولاف و مقایسه واکنش آن‌ها تحت رژیم‌های مختلف رطوبتی، همچنان محدود است. از این رو، نوآوری اصلی پژوهش حاضر، ارزیابی مجموعه‌ای از ژنوتیپ‌های جدید یولاف و بررسی ظرفیت ژنتیکی آن‌ها برای حفظ عملکرد در شرایط متفاوت دسترسی به آب

است. همچنین، استفاده هم‌زمان از مجموعه‌ای از شاخص‌های تحمل به خشکی و روش‌های چندمتغیره می‌تواند شناخت جامع‌تری از الگوی واکنش ژنوتیپ‌های جدید به محدودیت آب فراهم کند. از این نظر، نتایج پژوهش حاضر می‌تواند به معرفی منابع ژنتیکی جدید و کمتر ارزیابی‌شده برای استفاده در برنامه‌های اصلاحی یولاف در ایران کمک کند. با توجه به اهمیت روزافزون یولاف در تولید محصولات غذایی و علوفه‌ای و افزایش محدودیت منابع آب، شناسایی ژنوتیپ‌هایی که بتوانند در شرایط مختلف رطوبتی عملکرد مطلوبی داشته باشند، اهمیت زیادی دارد. هدف اصلی این پژوهش، ارزیابی عملکرد و واکنش ۲۱ ژنوتیپ یولاف در سه شرایط رطوبتی شامل شرایط بدون تنش، دیم و تنش خشکی پس از گلدهی و شناسایی ژنوتیپ‌های دارای عملکرد بالا و تحمل مناسب به خشکی بود. برای این منظور، شاخص‌های مختلف تحمل به خشکی محاسبه و روابط میان شاخص‌ها و عملکرد دانه با استفاده از تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA) و بای‌پلات بررسی شد. در نهایت، ژنوتیپ‌ها بر اساس عملکرد و الگوی پاسخ آن‌ها به شرایط مختلف رطوبتی مورد مقایسه قرار گرفتند.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش، ۲۱ ژنوتیپ یولاف زراعی (جدول ۱) که از بانک بذر استرالیای جنوبی (SARDI) تهیه و در بانک بذر پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه رازی نگهداری می‌شوند، مورد ارزیابی قرار گرفتند. آزمایش در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار و تحت

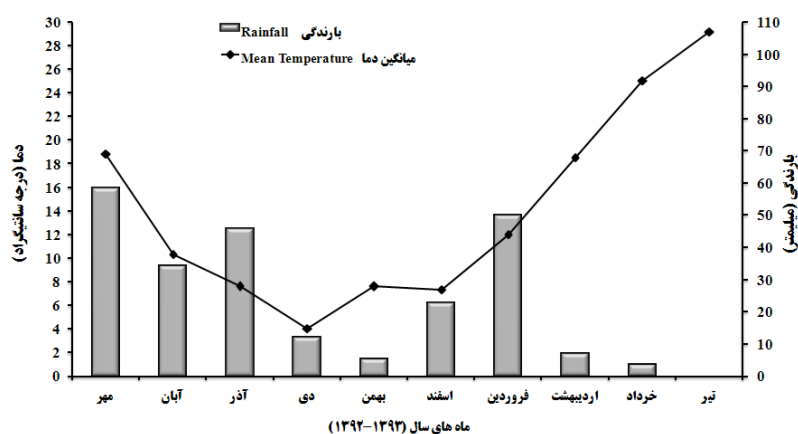
سه شرایط آبی (بدون تنش)، دیم و تنش خشکی بعد از گلدهی در مزرعه تحقیقاتی و آزمایشگاه پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه رازی، با مختصات جغرافیایی ۴۷ درجه و ۹ دقیقه طول شرقی و ۳۴ درجه و ۲۱ دقیقه عرض شمالی، طی فصل زراعی ۱۳۹۳-۱۳۹۴ اجرا شد. منطقه مورد مطالعه دارای اقلیم معتدل کوهستانی با میانگین بیشینه و کمینه دمای سالانه به ترتیب ۲۲/۶ و ۵/۹ درجه سلسیوس و ارتفاع ۱۳۱۹ متر از سطح دریا بوده است. متوسط بارندگی سالانه منطقه حدود ۴۵۰ تا ۴۸۰ میلی‌متر و بافت خاک لومی رسی گزارش شده است. عملیات کاشت در تاریخ ۲۲ آبان ۱۳۹۳ به صورت دستی انجام گرفت. هر واحد آزمایشی شامل پنج ردیف به طول دو متر و فاصله خطوط ۲۰ سانتی‌متر با تراکم کاشت ۴۰۰ بذر در مترمربع طراحی شد. قطع آبیاری و اعمال تنش خشکی در مکان تنش، از تاریخ ۱۸ اردیبهشت ۱۳۹۴ در مرحله گلدهی آغاز گردید و تا زمان برداشت ادامه یافت. در این مدت، فقط حدود هشت میلی‌متر بارندگی در دو نوبت رخ داد که تأثیر قابل توجهی نداشت (شکل ۱). در شرایط آبی، آبیاری تا رسیدن به مرحله فیزیولوژیک در سه نوبت انجام شد. در طول اجرای طرح، هیچ گونه کودی مصرف نشده و کنترل علف‌های هرز به صورت دستی انجام پذیرفت.

جدول ۱- شماره، نام و منشأ ژنوتیپ‌های مورد مطالعه یولاف

Table 1- Entry number, name, and origin of the studied oat genotypes

Genotype No.	Genotype name	Origin منشأ
1	Ozark	USA
2	UPF775456	Brazil
3	Wallaroo	Australia
4	Euro	Australia
5	Wintaroo	Australia
6	GA-Mitchell	USA
7	Potoroo	Australia
8	13Zop95	Canada
9	Mortlock	Australia
10	OH1022	USA
11	IA91098-2	USA

Canada	4Zop95	12
Australia	Swan	13
Sweden	Kalott	14
Mexico	Tarahumara	15
USA	C-1/130	16
Brazil	UFRGS948886	17
Finland	Nasta	18
Australia	Brusher	19
Germany	Arnold	20
Australia	Quoll	21



شکل ۱- مقدار بارندگی (میلی‌متر) و میانگین دما (درجه سلسیوس) ماهیانه در سال زراعی ۱۳۹۳-۱۳۹۴

Figure 1- Monthly rainfall (mm) and mean temperature (°C) during the 2014-2015 cropping years

شاخص‌های مقاومت به خشکی مبتنی بر عملکرد

دانه

پس از اندازه‌گیری عملکرد دانه در شرایط آبی (بدون

تنش)، دیم و تنش خشکی بعد از گلدهی، واکنش

ژنوتیپ‌ها ارزیابی گردید. شاخص‌های تحمل تنش

اندازه‌گیری صفت عملکرد دانه: در هر محیط، دو ردیف

کشت از هر کرت، با حذف نیم‌متر از ابتدا و انتهای آن،

برداشت شدند. پس از جداسازی دانه‌ها از کاه، مقدار کل

دانه‌های جمع‌آوری‌شده از هر کرت وزن گردید. در نهایت،

عملکرد دانه بر حسب کیلوگرم در هکتار با استفاده از

تناسب محاسبه شد.

تجزیه و تحلیل آماری

پیش از انجام تجزیه‌های آماری، نرمال بودن داده‌ها با استفاده از آزمون کلموگروف-اسمیرنوف (Kolmogrov-Smirnov) بررسی شد. نتایج آزمون نشان داد که داده‌ها از توزیع نرمال برخوردار بودند. بنابراین پس از تأیید پیش‌فرض نرمال بودن، تجزیه واریانس (در نرم‌افزار SAS) و سایر تجزیه‌های آماری انجام شد. به‌منظور شناسایی بهترین شاخص برای تعیین ارقام متحمل به تنش و تحلیل روابط بین شاخص‌ها، از تجزیه‌های همبستگی و تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA) استفاده گردید. در تجزیه به مؤلفه‌های اصلی، مؤلفه‌هایی که بیشترین درصد تغییرات را توجیه می‌کنند، در ترسیم بای‌پلات مورد استفاده قرار می‌گیرند. بنابراین، در این مطالعه از دو مؤلفه اصلی اول برای ترسیم بای‌پلات استفاده شد که در آن، ارتباط همزمان بین تمامی شاخص‌های محاسبه‌شده و همچنین عملکرد دانه تحت هر دو شرایط به‌صورت گرافیکی نمایش داده شد. این دو مؤلفه تغییرات مستقلی را تبیین می‌کنند و ژنوتیپ‌ها بر اساس آن‌ها با نقاطی در سطح نمودار مشخص می‌شوند. ژنوتیپ‌ها بر اساس این دو مؤلفه در گروه‌های مشخصی قرار می‌گیرند که بر مبنای میانگین عملکرد و تحمل یا حساسیت آن‌ها به تنش است. همبستگی، رسم نمودار سه‌بعدی و تجزیه به مؤلفه‌های اصلی با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۴ و ترسیم نمودار بای‌پلات با استفاده از نرم‌افزار Statgraphics نسخه ۱۶،۱،۱۱ انجام شد. نمودار مربوط به وضعیت آب و

خشکی، جهت تعیین میزان تحمل یا حساسیت ژنوتیپ‌ها به خشکی، با استفاده از روابط ۱ تا ۷ محاسبه شدند.

۱- شاخص حساسیت به تنش^۱ (SSI)

$$SSI = \frac{1 - (Y_s/Y_p)}{SI}, \quad SI = 1 - \left[\frac{\bar{Y}_s}{\bar{Y}_p} \right]$$

۲- شاخص تحمل^۲ (TOL)

$$TOL = Y_p - Y_s$$

۳- شاخص میانگین بهره‌وری^۳ (MP)

$$MP = \frac{Y_s + Y_p}{2}$$

۴- میانگین هندسی بهره‌وری^۴ (GMP)

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

۵- شاخص تحمل به تنش^۵ (STI)

$$STI = \left(\frac{Y_p}{\bar{Y}_p} \right) \left(\frac{Y_s}{\bar{Y}_s} \right) \left(\frac{\bar{Y}_s}{\bar{Y}_p} \right) = \frac{(Y_p)(Y_s)}{(\bar{Y}_p)^2}$$

۶- شاخص عملکرد^۶ (YI)

$$YI = \frac{Y_s}{\bar{Y}_s}$$

۷- شاخص پایداری عملکرد^۷ (YSI)

$$YSI = \frac{Y_s}{Y_p}$$

در این روابط، Y_p ، Y_s ، $\bar{Y}_s$ و SI به‌ترتیب نشان‌دهنده عملکرد بالقوه هر ژنوتیپ در شرایط بدون تنش، تنش، میانگین عملکرد کلیه ژنوتیپ‌ها در شرایط بدون تنش، تنش و شدت تنش هستند.

¹. Stress susceptibility index

². Tolerance index

³. Mean productivity

⁴. Geometric mean productivity

⁵. Stress tolerance index

⁶. Yeild index

⁷. Yeild stability index

هوایی سال زراعی اجرای آزمایش نیز با استفاده از برنامه Excel رسم گردید.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس ساده برای صفت عملکرد دانه در شرایط آبی (بدون تنش)، دیم و تنش خشکی بعد از گلدهی، تفاوت معنی‌داری را بین ژنوتیپ‌های یولاف نشان داد (جدول ۲). دامنه تغییرات وسیعی در عملکرد دانه میان ژنوتیپ‌ها مشاهده شد. علاوه بر این، وجود اختلاف

معنی‌دار بین ژنوتیپ‌ها (داده‌ها ارائه نشده است) از نظر شاخص‌های کمی مقاومت به خشکی و عملکرد دانه در شرایط آبی، دیم و تنش خشکی بعد از گلدهی، نشان‌دهنده تنوع ژنتیکی قابل توجهی است که امکان انتخاب ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی را فراهم می‌سازد.

جدول ۲- تجزیه واریانس صفت عملکرد دانه در ژنوتیپ‌های یولاف ارزیابی‌شده تحت شرایط آبی، دیم و تنش

خشکی بعد از گلدهی

Table 2- Analysis of variance for grain yield of oat genotypes under irrigated (non-stress), rainfed, and post-flowering drought stress conditions

میانگین مربعات Mean squares			df درجه آزادی	منابع تغییر SOV
شرایط تنش بعد از گلدهی Post-flowering drought stress conditions	شرایط دیم Rainfed conditions	شرایط آبی Irrigated conditions		
460092.49 ^{n.s}	2116745.96*	6601668.56**	2	تکرار Replication
2546233.96**	1171748.56*	1748039.61*	20	ژنوتیپ Genotype
996605.47	540550.81	1025734.05	40	خطا Error
42.59	41.20	28.89	-	ضریب تغییرات CV (%)

*, ** و ^{ns}: به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد و غیرمعنی‌دار.

*, ** and ^{n.s}: Significant ($\alpha=5\%$), highly significant ($\alpha=1\%$), and non-significant, respectively.

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، میانگین عملکرد دانه ژنوتیپ‌های یولاف تحت شرایط آبی، دیم و تنش خشکی بعد از گلدهی به‌ترتیب ۳۵۰۷، ۱۷۸۴ و ۲۳۴۴ کیلوگرم در هکتار به‌دست آمد. این نتایج نشان داد که عملکرد دانه

ارزیابی ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی

مقادیر عددی شاخص‌های محاسبه‌شده با استفاده از داده‌های شرایط آبی و دیم در جدول ۳ و شرایط آبی و تنش خشکی بعد از گلدهی در جدول ۴ ارائه شده است.

در اثر شرایط دیم و تنش خشکی بعد از گلدهی به ترتیب ۴۹/۱۳ و ۳۳/۱۶ درصد کاهش یافته است. شدت تنش محاسبه شده برای شرایط دیم ۰/۴۹ و برای شرایط تنش بعد از گلدهی ۰/۳۳ به دست آمد که هر دو در محدوده تنش متوسط قرار می گیرند. شدت تنش در این مطالعه مشابه گزارش های سایر پژوهشگران است که شدت تنش کمتر از ۰/۷ را به عنوان تنش متوسط و شدت تنش بالاتر از ۰/۷ را به عنوان تنش شدید طبقه بندی کرده اند (Moussa et al., 2023). در مطالعه ای بر روی ژنوتیپ های یولاف، شدت تنش رطوبتی ۳۰/۱ درصد گزارش شد و عملکرد دانه در شرایط تنش نسبت به آبیاری کامل کاهش قابل توجهی نشان داد. با توجه به اعمال تنش رطوبتی از مرحله گلدهی و شباهت نسبی شرایط اقلیمی مطالعه مذکور با پژوهش حاضر، شدت تنش گزارش شده در آن مطالعه با شدت تنش در پژوهش حاضر قابل مقایسه بوده و نشان می دهد شدت محدودیت آبی در دو پژوهش در دامنه نسبتاً مشابهی قرار داشته است (Mahmoodi et al., 2016). در راستای این نتایج، بهرامی نژاد و همکاران (Bahraminejad et al., 2016) و همچنین جزایری و رضایی (Jazayeri & Rezai, 2006) در ارزیابی تحمل به خشکی به ترتیب ۲۵ و ۲۰ ژنوتیپ یولاف، درصد کاهش میانگین عملکرد دانه ژنوتیپ ها در اثر تنش خشکی را به ترتیب ۲۹/۸۷ و ۴۹/۵۵ درصد و شدت تنش را ۰/۳ و ۰/۵ گزارش کردند. این داده ها تأیید می کنند که شدت تنش محاسبه شده در مطالعه حاضر نیز در محدوده تنش متوسط قرار دارد. همچنین، ارزیابی

همزمان ژنوتیپ ها تحت شرایط بهینه و تنش، به عنوان مناسب ترین روش برای انتخاب ژنوتیپ های برتر در محیط هایی که به طور مکرر با تنش های غیرزیستی مانند کمبود آب مواجه هستند، پیشنهاد شده است. این رویکرد به این دلیل اهمیت دارد که انتخاب ژنوتیپ ها فقط بر اساس عملکرد در شرایط عادی، لزوماً منجر به بهبود بهره وری در شرایط تنش نمی شود و بالعکس (Moussa et al., 2023). وجود تنوع بالا میان ژنوتیپ های مورد مطالعه در هر سه شرایط در جداول ۳ و ۴ قابل مشاهده است. ژنوتیپ های ۷، ۵ و ۲۱ به ترتیب با عملکرد دانه ۵۷۱۵، ۳۰۴۵ و ۴۳۴۰ کیلوگرم در هکتار، بالاترین مقادیر را در شرایط آبی، دیم و تنش خشکی بعد از گلدهی داشتند. در مقابل، ژنوتیپ های ۱، ۲۰ و ۱۴ به ترتیب با ۲۲۹۵، ۸۲۷ و ۸۶۰ کیلوگرم در هکتار، کمترین عملکرد دانه را در همین شرایط نشان دادند (جداول ۳ و ۴).

تحت شرایط دیم بالاترین مقادیر عددی مربوط به شاخص های STI، MP و GMP به ژنوتیپ های ۷، ۱۷، ۵، ۹ و ۱۳ اختصاص داده شد (جدول ۳). بر اساس این نتایج، این ژنوتیپ ها به عنوان متحمل به خشکی در نظر گرفته می شوند. عملکرد دانه این ژنوتیپ ها نیز در هر دو شرایط دیم و بدون تنش بالا بود. طبق نظر فرناندز (Fernandez, 1992)، ژنوتیپ هایی که مقادیر بیشتری از شاخص STI دارند، عملکرد بالاتری را در هر دو شرایط تنش و بدون تنش نشان می دهند. از میان ژنوتیپ های ذکر شده، ژنوتیپ های ۵ و ۱۳ از نظر شاخص های

نتایج نشان می‌دهد که ترکیب شاخص‌هایی با ماهیت متفاوت می‌تواند نسبت به استفاده از یک شاخص منفرد، ارزیابی جامع‌تری از واکنش ژنوتیپ‌ها به تنش خشکی ارائه دهد.

بر اساس نتایج به‌دست آمده (جدول ۳)، ژنوتیپ‌های ۵، ۳، ۱۳، ۱۲ و ۷ که بالاترین مقادیر YI را داشتند (به‌ترتیب ۱/۷۰، ۱/۳۰، ۱/۴۰، ۱/۳۱ و ۱/۳۱)، به‌دلیل عملکرد مطلوب در شرایط دیم، به‌عنوان گزینه‌های مناسب برای کشت در مناطق خشک و نیمه خشک معرفی می‌شوند. از سوی دیگر، ژنوتیپ‌های ۱، ۱۰، ۱۴ و ۲۰ که مقادیر YI پایین‌تری داشتند، کاهش بیشتری در عملکرد تحت شرایط دیم نشان دادند و به همین دلیل به‌عنوان ژنوتیپ‌های حساس‌تر به تنش خشکی شناخته شده و نیاز به اصلاح بیشتر برای بهبود تحمل به خشکی دارند.

تحت شرایط تنش خشکی اعمال‌شده بعد از گلدهی، بیشترین مقادیر عددی شاخص‌های STI، MP و GMP به ژنوتیپ‌های ۳، ۵، ۶، ۷، ۱۲، ۱۳، ۱۷، ۱۹ و ۲۱ اختصاص یافت (جدول ۴). این ژنوتیپ‌ها عملکرد دانه نسبتاً بالایی را در هر دو شرایط تنش بعد از گلدهی و بدون تنش نشان دادند. از میان این ژنوتیپ‌ها، مقادیر کمتری از شاخص‌های SSI و TOL به ژنوتیپ‌های ۳، ۵، ۶، ۱۳، ۱۷، ۱۹ و ۲۱ تعلق گرفت. با توجه به حساسیت پایین این ژنوتیپ‌ها به خشکی و عملکرد بالای آن‌ها، توصیه می‌شود که برای کشت در شرایط تنش خشکی انتهای فصل مورد استفاده قرار گیرند. درستکار و همکاران

حساسیت به تنش، یعنی TOL و SSI نیز مقادیر عددی پایینی را به خود اختصاص دادند (جدول ۳). هرگاه مقادیر شاخص‌های STI، MP و GMP یک ژنوتیپ نسبت به سایر ژنوتیپ‌ها بزرگ‌تر و مقادیر شاخص‌های SSI و TOL آن کوچک‌تر باشد، می‌توان آن ژنوتیپ را از نظر حفظ عملکرد در شرایط تنش، متحمل‌تر در نظر گرفت. بر این اساس، در این آزمایش ژنوتیپ‌های ۵ و ۳ از وضعیت مطلوب‌تری برخوردار بودند و می‌توانند برای کشت در شرایط دیم مورد توجه قرار گیرند. یافته‌های این تحقیق با نتایج مطالعات انجام‌شده در یولاف و سایر غلات مطابقت دارد. آکورا و کری (Akçura & Ceri, 2011) با ارزیابی ۱۴ لندریس و رقم یولاف در شرایط دیم و آبی طی سه سال، نشان دادند که شاخص‌های STI، MP و GMP توانایی مناسبی در شناسایی ژنوتیپ‌های با عملکرد بالا در هر دو شرایط آبی و دیم دارند. در ر ارزیابی ۲۰۶ ژرم‌پلاسما جو، شاخص‌های GMP، MP و STI با سازگاری بیشتر ژنوتیپ‌ها به خشکی ارتباط داشتند، در حالی که مقادیر پایین‌تر SSI و TOL با واکنش مطلوب‌تر به تنش همراه بود. بر این اساس، استفاده هم‌زمان از شاخص‌های مثبت و منفی برای غربال ژنوتیپ‌های متحمل پیشنهاد شد (Song et al., 2024). همچنین، در مطالعه‌ای دیگر روی ژنوتیپ‌های جو، استفاده هم‌زمان از شاخص‌های TOL، MP، GMP، SSI، STI و YI و YSI در کنار روش‌های چندمتغیره، امکان شناسایی ژنوتیپ‌های دارای عملکرد و سازگاری مناسب در شرایط کم‌آبی را فراهم کرد (Mokarroma et al., 2025). این

عملکرد را در شرایط تنش داشتند (Sio-Se Mardeh *et al.*, 2006). مقادیر نزدیک به عدد یک در YSI به این معناست که ژنوتیپ مورد نظر کمتر تحت تأثیر تغییرات محیطی قرار گرفته و عملکرد ثابتی از خود نشان داده است. بر این اساس، ژنوتیپ‌های ۵، ۲۱ و ۳ نسبت به سایر ژنوتیپ‌ها وضعیت بهتری داشتند (جدول ۴). این موضوع بیانگر عملکرد پایدارتر این ژنوتیپ‌ها تحت شرایط تنش و بدون تنش است. به‌ویژه ژنوتیپ ۲۱ که بالاترین مقدار YSI را داراست و به‌عنوان ژنوتیپ پایدارتر شناخته می‌شود. این ژنوتیپ‌ها به‌دلیل پایداری عملکردشان، برای کشت در شرایط متغیر محیطی مناسب‌تر هستند و می‌توانند به‌عنوان گزینه‌ای مناسب برای کشت در مناطقی با تنش‌های محیطی مانند خشکی پیشنهاد شوند. در مقابل، ژنوتیپ‌های ۱۰، ۱۴ و ۱۸ با مقادیر پایین‌تر YSI و YI، حساسیت بیشتری به تغییرات محیطی نشان داده و عملکرد پایداری نداشتند (جدول ۴). این ژنوتیپ‌ها احتمالاً برای شرایط تنش خشکی مناسب نخواهند بود. بنابراین، با توجه به پایداری عملکرد بالا و تحمل به تنش خشکی، ژنوتیپ‌های ۵، ۱۹ و ۲۱ به‌دلیل مقادیر بالای YI و YSI می‌توانند گزینه‌های مناسبی برای کشت در شرایط تنش خشکی باشند. این ژنوتیپ‌ها می‌توانند در برنامه‌های اصلاحی برای بهبود تحمل به خشکی مورد استفاده قرار گیرند. از طرف دیگر، ژنوتیپ‌های حساس‌تر مانند ۱۰ و ۱۴ باید در شرایط تنش کمتر یا تحت مدیریت مناسب کشت شوند.

(Dorostkar *et al.*, 2015) نیز تأیید کردند که مقادیر بالای STI، MP و GMP، همراه با مقادیر پایین SSI، بهترین شاخص‌ها برای غربالگری ژنوتیپ‌های مقاوم به خشکی در گندم هستند. هر چه مقدار این شاخص‌ها بالاتر باشد، ژنوتیپ پایدارتر و به خشکی مقاوم‌تر خواهد بود. با توجه به نحوه محاسبه شاخص YI (جدول ۴)، این شاخص به‌عنوان ابزاری نسبی برای مقایسه درون‌گروهی ژنوتیپ‌ها در یک محیط خاص، در تعیین سطوح تحمل به تنش استفاده می‌شود. ژنوتیپ‌هایی که مقدار YI آن‌ها بیشتر از ۱ است، عملکرد بهتری تحت شرایط تنش خشکی نشان می‌دهند. به‌عنوان مثال، ژنوتیپ‌های ۵، ۱۷، ۱۹ و ۲۱ به‌ترتیب با مقادیر YI برابر با ۱/۳۹، ۱/۳۹، ۱/۴۴ و ۱/۸۵، بالاترین مقادیر این شاخص را نشان دادند و به‌عنوان ژنوتیپ‌های برتر از نظر تحمل به خشکی معرفی می‌شوند. شاخص پایداری عملکرد (YSI) نشان‌دهنده توانایی یک ژنوتیپ در حفظ عملکرد نسبی خود در مقایسه با سایر ژنوتیپ‌ها تحت شرایط مختلف محیطی است. بنابراین، ارقامی با YSI بالاتر انتظار می‌رود که تحت هر دو شرایط عملکرد بالاتری داشته باشند که مطابق با نتایج مروتی و همکاران (Morovati *et al.*, 2024) است.

اما مطالعه دیگر نشان داد که ارقامی با YSI بالاتر، کمترین عملکرد را در شرایط بدون تنش و بالاترین

جدول ۳- شاخص‌های تحمل به خشکی در ۲۱ ژنوتیپ یولاف بر اساس عملکرد دانه تحت شرایط آبی و دیم

Table 3- Drought tolerance indices of 21 oat genotypes based on grain yield under irrigated (non-stress) and rainfed conditions

ژنوتیپ	YP	YS	TOL	MP	GMP	SSI	STI	YI
Genotype	(kg/ha)	(kg/ha)	(kg/ha)	(kg/ha)	(kg/ha)			
1	2295.00	1174.66	1120.33	1734.83	1641.91	0.99	0.22	0.65
2	3679.41	1817.70	1861.70	2748.56	2586.13	1.03	0.54	1.01
3	3170.44	2324.89	845.55	2747.67	2714.95	0.54	0.60	1.30
4	3037.28	1865.44	1171.83	2451.36	2380.31	0.79	0.46	1.04
5	3019.66	3044.52	-24.85	3032.09	3032.07	-0.02	0.75	1.70
6	3229.73	1783.33	1446.40	2506.53	2399.94	0.91	0.47	0.99
7	5715.22	2346.81	3368.41	4031.02	3662.32	1.20	1.09	1.31
8	3240.63	1441.89	1798.74	2341.26	2161.63	1.13	0.38	0.80
9	3927.93	2288.96	1638.96	3108.45	2998.48	0.85	0.73	1.28
10	3535.74	879.14	2656.60	2207.45	1763.08	1.53	0.25	0.49
11	3428.93	1325.59	2103.34	2377.26	2131.99	1.25	0.37	0.74
12	3482.89	2340.18	1142.70	2911.54	2854.93	0.67	0.66	1.31
13	3511.14	2510.14	1001.00	3010.65	2968.75	0.58	0.72	1.40
14	2766.89	1330.22	1436.67	2048.56	1918.48	1.06	0.30	0.74
15	3145.96	1049.94	2096.02	2097.95	1817.44	1.36	0.27	0.58
16	2564.22	1369.94	1194.28	1967.08	1874.26	0.95	0.29	0.76
17	5106.74	2420.74	2686.00	3763.74	3515.98	1.07	1.00	1.35
18	3677.41	1206.33	2471.08	2441.87	2106.23	1.37	0.36	0.67
19	3818.96	1694.66	2124.30	2756.81	2543.98	1.13	0.53	0.94
20	3450.00	827.72	2622.28	2138.86	1689.87	1.55	0.23	0.46
21	3852.03	2431.33	1420.70	3141.68	3060.32	0.75	0.76	1.36

جدول ۴- شاخص‌های تحمل به خشکی در ۲۱ ژنوتیپ یولاف بر اساس عملکرد دانه تحت شرایط آبی و تنش

خشکی بعد از گلدهی

Table 4- Drought tolerance indices of 21 oat genotypes based on grain yield under irrigated (non-stress) and post-flowering drought stress conditions

YSI	YI	STI	SSI	GMP (kg/ha)	MP (kg/ha)	TOL (kg/ha)	YS (kg/ha)	YP (kg/ha)	ژنوتیپ Genotype
0.83	0.82	0.35	0.48	2100.66	2108.89	372.22	1922.78	2295.00	1
0.55	0.87	0.61	1.33	2744.48	2863.26	1632.29	2047.11	3679.41	2
0.97	1.31	0.79	0.08	3123.88	3124.22	92.44	3078.00	3170.44	3
0.58	0.76	0.44	1.23	2330.74	2412.92	1248.72	1788.56	3037.28	4
1.08	1.39	0.80	-0.24	3140.63	3143.05	-246.77	3266.44	3019.67	5
0.93	1.28	0.78	0.20	3117.05	3119.02	221.44	3008.30	3229.74	6
0.45	1.09	1.19	1.65	3835.30	4144.48	3141.48	2573.74	5715.22	7
0.48	0.66	0.41	1.56	2249.24	2400.89	1679.48	1561.15	3240.63	8
0.39	0.65	0.49	1.82	2463.96	2736.78	2382.30	1545.63	3927.93	9
0.24	0.37	0.25	2.26	1763.10	2207.46	2656.58	879.17	3535.74	10
0.46	0.68	0.44	1.60	2347.48	2518.02	1821.82	1607.11	3428.93	11
0.85	1.27	0.84	0.43	3222.99	3232.69	500.41	2982.48	3482.89	12
0.90	1.34	0.90	0.30	3331.30	3335.91	350.48	3160.67	3511.15	13
0.31	0.36	0.19	2.07	1542.64	1813.48	1906.82	860.07	2766.89	14
0.76	1.03	0.61	0.69	2758.49	2782.35	727.23	2418.74	3145.97	15
0.96	1.05	0.51	0.10	2519.02	2519.42	89.61	2474.61	2564.22	16
0.63	1.39	1.35	1.09	4079.66	4182.95	1847.59	3259.15	5106.74	17
0.38	0.60	0.42	1.84	2287.09	2549.91	2255.01	1422.41	3677.42	18
0.88	1.44	1.05	0.33	3600.34	3606.59	424.74	3394.22	3818.96	19
0.47	0.69	0.45	1.58	2373.33	2541.33	1817.33	1632.67	3450.00	20
1.12	1.85	1.35	-0.38	4088.62	4095.89	-487.71	4339.74	3852.03	21

همبستگی بین شاخص‌های تحمل به خشکی

نتایج تجزیه همبستگی شاخص‌های تحمل به خشکی بر اساس عملکرد دانه تحت شرایط آبی و دیم (زیر قطر) و شرایط آبی و تنش خشکی پس از گلدهی (بالای قطر) در جدول ۵ آورده شده است. نتایج نشان داد که بین YS با Yp همبستگی معنی‌داری وجود نداشت. این نتیجه ممکن است نشان‌دهنده این باشد که ژنوتیپ‌هایی که در شرایط دیم یا تنش خشکی بعد از گلدهی عملکرد خوبی دارند، لزوماً در شرایط آبیاری نیز عملکرد مشابهی نخواهند داشت. به عبارت دیگر، برخی ژنوتیپ‌ها ممکن است در برابر خشکی مقاوم باشند، اما این مقاومت لزوماً به عملکرد بهتر در شرایط غیرتنش منجر نمی‌شود. این امر ممکن است به دلیل واکنش‌های متفاوت ژنوتیپ‌ها به عوامل محیطی مختلف (مانند خشکی و آبیاری) و ویژگی‌های فیزیولوژیکی متنوعی باشد که در هر شرایط به‌طور خاص عمل می‌کنند. بنابراین، برای انتخاب ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی، نمی‌توان فقط به عملکرد دانه در شرایط خشکی اکتفا کرد، بلکه لازم است که شاخص‌های مختلفی بررسی شوند تا ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی شناسایی شوند که در شرایط مختلف (تنش و بدون تنش) عملکرد بهتری داشته باشند. این یافته با نتایج سایر مطالعات گزارش‌شده همخوانی ندارد (Zaheri & Bahraminejad, 2012; Bahraminejad et al., 2016). عدم همخوانی نتایج مطالعه حاضر با مطالعات قبلی ممکن است به دلیل تفاوت‌های ژنوتیپی، شرایط

محیطی، شدت متفاوت تنش یا روش‌های ارزیابی مختلف باشد. همچنین، واکنش‌های متفاوت ژنوتیپ‌ها به تنش خشکی تحت تأثیر عوامل محیطی متغیر و شیوه‌های مختلف کشاورزی قرار دارد.

در مطالعه حاضر، شاخص‌های STI، MP و GMP دارای همبستگی مثبت بالا و بسیار معنی‌داری با عملکرد دانه در شرایط تنش و بدون تنش بودند. بنابراین، این شاخص‌ها می‌توانند معیارهای مناسبی برای شناسایی ژنوتیپ‌هایی باشند که ضمن برخورداری از عملکرد بالا در شرایط مطلوب، توانایی حفظ عملکرد خود را در شرایط تنش خشکی نیز دارند. این یافته با نتایج مطالعات انجام‌شده در سایر غلات همخوانی دارد. در مطالعه‌ای روی ژنوتیپ‌های جو شاخص‌های STI، MP و GMP همبستگی مثبت و معنی‌داری با عملکرد در هر دو شرایط آبی و تنش خشکی نشان دادند و قابلیت این شاخص‌ها برای شناسایی ژنوتیپ‌های با عملکرد مطلوب در هر دو شرایط تأیید شد (Makebe et al., 2024; Ferioun et al., 2024; Barati et al., 2024). همچنین در ارزیابی لاین‌های موتانت گندم تحت شرایط تنش و بدون تنش، شاخص‌های GMP، MP و STI با عملکرد دانه ارتباط مثبت داشتند و در شناسایی لاین‌های متحمل و پرمحصول به‌عنوان شاخص‌های مناسب شناخته شدند (Kumar et al., 2024; Devi et al., 2024; Akcura et al., 2020). آکورا و همکاران (Darvishnia et al., 2020) از شاخص‌های STI، SSI و YSI و HM (et al., 2011)

برای شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل به تنش خشکی در گندم نان استفاده کردند. آن‌ها پیشنهاد کردند که شاخص SSI برای انتخاب در شرایط تنش شدید و شاخص‌های STI و HM برای محیط‌های با تنش کمتر مناسب‌تر هستند.

شاخص YI همبستگی مثبت و بسیار معنی‌داری (**۰/۰۱) با عملکرد در شرایط تنش (Ys) نشان داد که بر اهمیت این شاخص در ارزیابی تحمل به خشکی تأکید می‌کند. نتایج مشابهی نیز توسط نوریزدان (Nooryazdan, 2024) در گندم گزارش شده است. از آن‌جا که شاخص YI همبستگی کامل (برابر با یک) با عملکرد در شرایط تنش دارد، این شاخص صرفاً ژنوتیپ‌ها را بر اساس عملکرد آن‌ها در شرایط تنش رتبه‌بندی می‌کند. شاخص YSI با Ys همبستگی مثبت و معنی‌داری نشان داد (**۰/۸۳ در شرایط دیم و **۰/۸۶ در شرایط تنش خشکی)، که ارتباط آن با پایداری عملکرد را تأیید می‌کند. بنابراین، از این شاخص می‌توان برای شناسایی ژنوتیپ‌های با عملکرد بالا در شرایط دیم و تنش خشکی استفاده کرد. با این حال، YSI قادر به شناسایی

ژنوتیپ‌هایی با عملکرد بالا در هر دو شرایط تنش و بدون تنش (آبی) نیست. برخلاف نتایج حاضر، در مطالعه‌ای روی ارقام یولاف، شاخص YSI همبستگی منفی و معنی‌داری با عملکرد دانه در شرایط آبیاری نشان داد؛ به‌طوری‌که ژنوتیپ دارای YSI بالاتر، عملکرد پایین‌تری در شرایط مطلوب داشت. این یافته نشان می‌دهد که YSI به‌تنهایی ممکن است ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی با عملکرد پایین را نیز شناسایی کند (Akçura & Ceri, 2011; Mubushar *et al.*, 2022).

در مطالعه حاضر، YSI همبستگی منفی و معنی‌داری با SSI و TOL نشان داد، که بیانگر رابطه معکوس میان این شاخص‌ها در هر دو شرایط است. مطابق با نتایج ما، در برخی تحقیقات دیگر نیز همبستگی معنی‌داری بین SSI و عملکرد در شرایط بدون تنش مشاهده نشده است و این شاخص به‌عنوان معیاری مناسب برای انتخاب ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی مورد تأیید قرار نگرفته است (Bahraminejad *et al.*, 2016; Nooryazdan, 2024).

جدول ۵- ضرایب همبستگی ساده بین شاخص‌های تحمل خشکی و عملکرد دانه تحت شرایط آبی و دیم (زیر

قطر) و شرایط آبی و تنش خشکی پس از گلدهی (بالای قطر)

Table 5- Simple correlation coefficients between drought tolerance indices and grain yield under irrigated and rainfed conditions (below the diagonal) and irrigated and post-flowering drought stress conditions (above the diagonal)

	Ys	Yp	TOL	MP	GMP	SSI	STI	YI	YSI
Ys	1.00	0.25	-0.70**	0.83**	0.91**	-0.86**	0.89**	1.00**	0.86**
Yp	0.38	1.00	0.51*	0.74**	0.63**	0.25	0.66**	0.25	-0.25
TOL	-0.43*	0.67**	1.00	-0.19	-0.34	0.95**	-0.30	-0.70**	-0.95**
MP	0.79**	0.87**	0.21	1.00	0.98**	-0.45*	0.99**	0.83**	0.45*
GMP	0.90**	0.74**	0.00	0.97**	1.00	-0.59**	0.99**	0.91**	0.59**
SSI	-0.83**	0.20	0.86**	-0.31	-0.50*	1.00	-0.54**	-0.86**	-1.00**
STI	0.87**	0.78**	0.06	0.98**	0.99**	-0.45*	1.00	0.89**	0.54*
YI	1.00**	0.38	-0.43	0.79**	0.90**	-0.83**	0.87**	1.00	0.86**
YSI	0.83**	-0.20	-0.86**	0.31	0.50*	-1.00**	0.45*	0.83**	1.00

* و ** به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد

* and **: significant at the 5% and 1% probability levels, respectively

نشان‌دهنده حساسیت بیشتر ژنوتیپ‌ها به تنش خشکی بعد از گلدهی در مقایسه با شرایط دیم و تأثیر منفی SSI و TOL بر کاهش عملکرد دانه است. نتایج نشان داد که در هر دو آزمایش دیم و تنش خشکی بعد از گلدهی، شاخص‌های STI، MP و GMP همبستگی‌های مثبت و بسیار معنی‌داری با یکدیگر دارند. این یافته‌ها با نتایج گزارش‌شده توسط بهرامی‌نژاد و همکاران (Bahraminejad et al., 2016)، دستفال و همکاران (Dastfall et al., 2024) و نوریزدان (Nooryazdan,)

تحت شرایط آبی و دیم و همچنین آبی و تنش خشکی بعد از گلدهی (جدول ۵)، شاخص‌های TOL و SSI با Ys همبستگی منفی و معنی‌دار داشتند، در حالی‌که شاخص TOL با Yp همبستگی مثبت نشان داد. با توجه به این‌که گزینش بر اساس مقادیر پایین این شاخص‌ها صورت می‌گیرد، این امر منجر به انتخاب ژنوتیپ‌هایی با عملکرد بالا در شرایط تنش و عملکرد پایین در شرایط بدون تنش می‌شود. همچنین، همبستگی‌های منفی تحت شرایط آبی و تنش خشکی بعد از گلدهی شدیدتر بود که

شناسایی کند که در هر دو شرایط تنش و بدون تنش عملکرد خوبی داشته باشند.

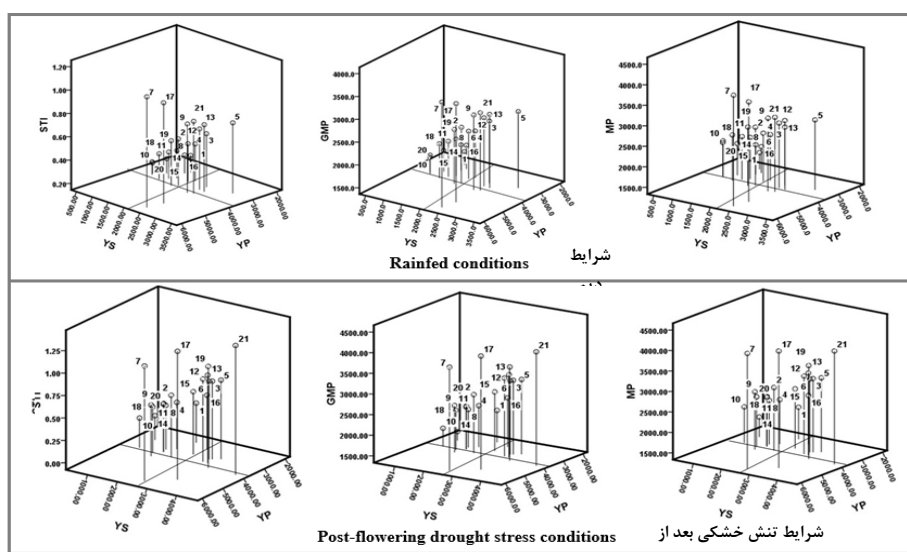
نمودار سه‌بعدی بر اساس شاخص‌های مورد مطالعه برای انتخاب ژنوتیپ‌های برتر

طبق نظر فرناندز (Fernandez, 1992)، ژنوتیپ‌های گروه A به‌عنوان ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی شناخته می‌شوند. بر اساس همبستگی شاخص‌های محاسبه‌شده در شرایط تنش و بدون تنش، همبستگی مثبت و معنی‌دار بالایی بین عملکرد دانه در هر دو شرایط و شاخص‌های STI، MP و GMP مشاهده شد. این نتیجه نشان می‌دهد که این سه شاخص نسبت به سایر شاخص‌ها برای ارزیابی تحمل یا حساسیت به خشکی ژنوتیپ‌ها مناسب‌تر هستند. مطالعات دیگر نیز تأیید کرده‌اند که شاخص‌های STI، MP و GMP بهترین ابزارها برای گزینش ارقام متحمل به خشکی در شرایط تنش می‌باشند. به‌عنوان نمونه، نقوی و همکاران (Naghavi *et al.*, 2013) و بهرامی‌نژاد و همکاران (Bahraminejad *et al.*, 2016) گزارش کرده‌اند که این شاخص‌ها در انتخاب ژنوتیپ‌های یولاف معادل یکدیگر بوده و نتایج آن‌ها با یافته‌های این پژوهش مطابقت دارد. در این پژوهش، به‌منظور شناسایی ژنوتیپ‌های پرمعمکرد و متحمل به خشکی، از این شاخص‌ها برای ترسیم نمودار سه‌بعدی استفاده شد. شکل ۲ بر اساس مقادیر شاخص‌های STI، MP و GMP محاسبه‌شده در شرایط دیم و تنش خشکی بعد از گلدهی ترسیم شده است. همان‌طور که مشخص است، ژنوتیپ‌های ۷ و ۱۷ در منطقه مربوط به گروه A قرار

(2024) مطابقت دارد. در مطالعه‌ای که توسط براتی و همکاران (Barati *et al.*, 2023) انجام شد، عملکرد دانه جو در شرایط تنش خشکی انتهای فصل به‌ترتیب با شاخص‌های YI، HM، GMP، STI و MP همبستگی مثبت و معنی‌داری نشان داد. در شرایط بدون تنش نیز، عملکرد دانه به‌ترتیب با شاخص‌های MP، STI، GMP، HM، TOL و SSI همبستگی مثبت و معنی‌داری داشت. بنابراین، آن‌ها پیشنهاد کردند که برای انتخاب ژنوتیپ‌های جو در مناطق با خشکی انتهای فصل از شاخص‌های YI، HM، GMP، STI و MP و در مناطق بدون خشکی از شاخص‌های MP، STI، GMP، HM، TOL و SSI استفاده شود. همچنین، آرمزجو و نیکخواه چمن‌آباد (Arazmjoo & Nikkhah Chamanabad, 2022) گزارش کردند که در مناطق با تنش خشکی انتهای فصل، شاخص‌های YI، HM، STI و GMP برای انتخاب ژنوتیپ‌های جو مناسب هستند. به‌طور مشابه، دستفال و همکاران (Dastfall *et al.*, 2024) بیان کردند که شاخص‌های STI، GMP و MP بیشترین همبستگی را با عملکرد دانه گندم در شرایط مطلوب، تنش خشکی ملایم و شدید نشان می‌دهند و به عنوان شاخص‌های کارآمد برای شناسایی ژنوتیپ‌های مقاوم به خشکی توصیه می‌شوند. ریجال و همکاران (Rijal *et al.*, 2024) با تحلیل ماتریس همبستگی گزارش کردند که شاخص‌های MP، GMP، STI و HMP ابزارهای مؤثری برای انتخاب ژنوتیپ‌های متحمل به تنش هستند. با این‌حال، شاخص MP همراه با STI یا GMP می‌تواند ژنوتیپ‌هایی را

شرایط تنش و بدون تنش در ژنوتیپ‌های یولاف (Arazmjoo & Bahraminejad *et al.*, 2016)، جو (Nikkhah Chamanabad, 2022; Barati *et al.*, 2023)، ارزن (Nakhei *et al.*, 2019) و گندم (Nooryazdan, 2024) استفاده کرده‌اند.

دارند. این ژنوتیپ‌ها علاوه بر عملکرد بالا، بیشترین مقادیر مربوط به این شاخص‌ها را نیز به خود اختصاص داده‌اند و به‌عنوان ژنوتیپ‌های متحمل برای کشت در شرایط دیم و تنش خشکی آخر فصل پیشنهاد می‌شوند. سایر محققین نیز از نمودارهای سه‌بعدی برای تشخیص گروه A و شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی و عملکرد بالا در



شکل ۲- نمودار سه‌بعدی انتخاب ژنوتیپ‌های یولاف متحمل به خشکی بر اساس عملکرد دانه، شاخص تحمل به تنش (STI)، میانگین هندسی بهره‌وری (GMP) و شاخص میانگین بهره‌وری (MP) با استفاده از مدل فرناندز تحت شرایط دیم و تنش خشکی بعد از گلدهی

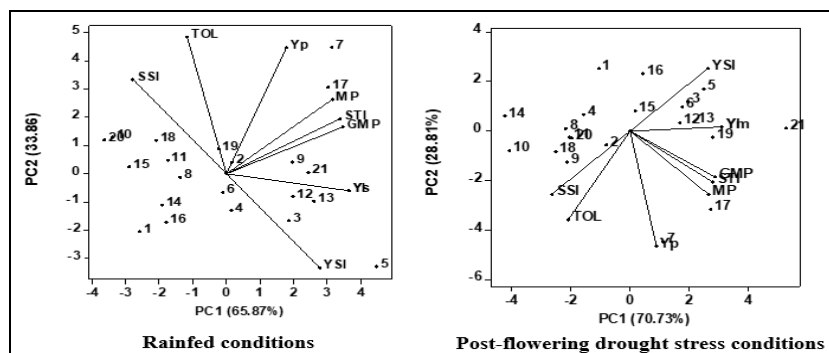
Figure 2- Three-dimensional scatter plot for the selection of drought-tolerant oat genotypes based on grain yield, stress tolerance index (STI), geometric mean productivity (GMP), and mean productivity index (MP) using the Fernandez model under rainfed and post-flowering drought stress conditions

همبستگی ساده، روشی مؤثرتر برای شناسایی و انتخاب ژنوتیپ‌های برتر در شرایط بدون تنش و تنش است (Barati *et al.*, 2023). به‌منظور بررسی روابط بین

تجزیه به مؤلفه‌های اصلی استفاده از بای‌پلات به‌دلیل مقایسه همزمان ژنوتیپ‌ها بر اساس تمامی شاخص‌ها، در مقایسه با تحلیل‌های

بدون تنش نزدیکتر است. این امر نشان‌دهنده آن است که مقادیر بالای شاخص‌های تحمل به خشکی در این ژنوتیپ بیشتر به دلیل عملکرد بالای آن در شرایط بدون تنش بوده است. همچنین، ژنوتیپ‌های ۹ و ۲۱ در مجاور شاخص تحمل تنش و عملکرد در شرایط دیم قرار دارند که نشان‌دهنده مناسب بودن این ژنوتیپ‌ها برای شرایط دیم می‌باشد. زاویه حاده بین شاخص‌های STI، MP و GMP دلالت بر همبستگی بالای آن‌ها با یکدیگر دارد. این شاخص‌ها همچنین همبستگی مثبت و بالایی با عملکرد در هر دو شرایط دیم و آبی نشان داده‌اند. علاوه بر این، وجود همبستگی مثبت و بالا بین شاخص‌های SSI و TOL نیز در فضای بای‌پلات مشاهده شده است.

ژنوتیپ‌های یولاف بر اساس عملکرد و شاخص‌های تحمل به خشکی، از نمودار بای‌پلات حاصل از PCA استفاده گردید (شکل ۳). از آنجایی که مؤلفه اول تغییراتی را توضیح می‌دهد که توسط مؤلفه دوم توضیح داده نمی‌شود و بالعکس، امکان نمایش دو مؤلفه به صورت دو محور عمود بر هم فراهم می‌گردد تا ژنوتیپ‌ها بر اساس این دو مؤلفه در فضای بای‌پلات مشخص شوند. دو مؤلفه اول حاصل از PCA بر روی شاخص‌های محاسبه‌شده بر اساس داده‌های شرایط دیم و آبی، ۹۹/۷۳ درصد از تنوع داده‌ها را توجیه کردند (شکل ۳). در این نمودار ژنوتیپ‌های شماره ۷ و ۱۷ در مجاورت شاخص‌های مهم مقاومت به خشکی (STI، MP و GMP) قرار گرفته‌اند. ژنوتیپ شماره ۷ به بردار مربوط به عملکرد در شرایط



شرایط دیم

شرایط تنش خشکی بعد از گلدهی

شکل ۳- بای‌پلات شاخص‌های تحمل و حساسیت به خشکی در ۲۱ ژنوتیپ یولاف بر اساس دو مؤلفه اصلی تحت

شرایط دیم و تنش خشکی بعد از گلدهی

Figure 3- Biplot of drought tolerance and sensitivity indices in 21 oat genotypes based on the first two principal components under rainfed and post-flowering drought stress conditions

دو مؤلفه اول حاصل از PCA بر روی شاخص‌های محاسبه‌شده بر اساس داده‌های تنش خشکی بعد از گلدهی و شرایط دیم، ۹۹/۵۴ درصد از تنوع داده‌ها را توضیح دادند (شکل ۳). در بای‌پلات رسم شده بر اساس ضرایب دو مؤلفه اول، ژنوتیپ‌های شماره ۷ و ۱۷ در مجاورت شاخص‌های مهم تحمل به خشکی (MP، STI) و GMP قرار گرفته‌اند. ژنوتیپ شماره ۷ به بردار مربوط به عملکرد در شرایط بدون تنش نزدیک‌تر است. ژنوتیپ‌های ۱۹، ۲۱، ۱۲، ۱۳، ۶، ۳ و ۵ در مجاور شاخص‌های تحمل تنش و عملکرد در شرایط تنش بعد از گلدهی قرار دارند که می‌توان این ژنوتیپ‌ها را جهت کشت در شرایط تنش بعد از گلدهی پیشنهاد داد. با توجه به زاویه‌های مشاهده شده بین بردارهای مربوط به شاخص‌های مختلف، همبستگی بین شاخص‌ها در این آزمایش نیز مشابه با آزمایش قبل بود. مطالعات مختلف از PCA برای شناسایی ژنوتیپ‌های مقاوم به خشکی در یولاف و دیگر گیاهان استفاده کرده‌اند (Brahminejad et al., 2016; Hasanzadeh et al., 2020; Barati et al., 2023; Dastfall et al., 2024). همچنین، ریجال و همکاران (Rijal et al., 2024) در گندم و یاهویان و همکاران (Yahoueian et al., 2017) در سویا نشان دادند که استفاده از نمودارهای بای‌پلات در کنار شاخص‌های تحمل به خشکی می‌تواند در تفکیک و شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل و حساس به خشکی مؤثر باشد. در مطالعه‌ای، ده رقم گندم بر اساس شاخص‌های تحمل به خشکی ارزیابی شدند (Lal et al., 2024).

نتایج نشان داد که هفت شاخص عملکرد دانه در شرایط تنش و بدون تنش با سه مؤلفه اصلی، که ۹۵/۷۶ درصد تغییرات را توضیح می‌دهند، ارتباط دارند. شاخص‌های STI، GMP، TOL و MP برخی ژنوتیپ‌ها را به‌عنوان بسیار متحمل به خشکی، تعدادی را با تحمل متوسط و گروهی دیگر را به‌عنوان حساس‌ترین ژنوتیپ‌ها شناسایی کردند (Lal et al., 2024). در یک تحقیق انجام شده برای ارزیابی ۲۱ ژنوتیپ یولاف تحت شرایط دیم و آبیاری در کرمانشاه، تفاوت‌های بسیار معنی‌داری بین ژنوتیپ‌ها در عملکرد دانه مشاهده شد. همبستگی مثبت و معنی‌داری بین عملکرد دانه در شرایط دیم (Ys) و آبیاری (Yp) با شاخص‌های MP، GMP، STI و میانگین هارمونیک (HAM) مشاهده گردید که این شاخص‌ها به‌عنوان مناسب‌ترین معیارها برای غربالگری ژنوتیپ‌ها در شرایط تنش خشکی معرفی شدند. دو ژنوتیپ Brusher و Tarahumara بالاترین مقادیر این شاخص‌ها را داشتند و به‌عنوان وارسته‌های مقاوم به خشکی شناخته شدند. همچنین، PCA دو مؤلفه را شناسایی کرد که مؤلفه اول و دوم به‌ترتیب ۷۸/۶۸ و ۲۰/۹۸ درصد از تغییرات کلی را توضیح دادند. این تجزیه همچنین ژنوتیپ‌های متحمل به تنش را از ژنوتیپ‌های حساس تفکیک کرد (Zaheri & Brahminejad, 2012).

یارحمادی و همکاران (Yarahmadi et al., 2020) گزارش کردند که ژنوتیپ‌های با مقادیر بالای GMP معمولاً عملکرد متغیری دارند و شاخص‌های MP، HAM و TOL برای غربالگری ژنوتیپ‌های مقاوم به خشکی

ابزارهای مناسبی برای ارزیابی ژنوتیپ‌ها و ارقام به شمار می‌روند (Bahraminejad *et al.*, 2016; Naghavi *et al.*, 2013).

نتیجه‌گیری کلی

این پژوهش عملکرد دانه و شاخص‌های تحمل به تنش خشکی در ژنوتیپ‌های یولاف زراعی را ارزیابی کرد و تنوع ژنتیکی گسترده‌ای را از نظر تحمل به خشکی و عملکرد دانه در شرایط مختلف محیطی نشان داد. شاخص‌های STI، MP و GMP به‌عنوان معیارهای قابل‌اعتماد برای انتخاب ژنوتیپ‌های مطلوب در هر دو شرایط تنش و بدون تنش شناسایی شدند، درحالی‌که شاخص YSI با عملکرد پایدار و حساسیت کمتر به تغییرات محیطی ارتباط داشت. از سوی دیگر، شاخص‌های SSI و TOL برای شناسایی ژنوتیپ‌های حساس‌تر به خشکی مفید بودند. این نتایج نشان می‌دهد که استفاده از ترکیبی از شاخص‌ها برای غربالگری ژنوتیپ‌های یولاف در برنامه‌های اصلاحی می‌تواند کارآمدتر باشد. ژنوتیپ‌های ۷، ۵ و ۲۱ به‌ترتیب بالاترین عملکرد را در شرایط آبی، دیم و تنش خشکی بعد از گلدهی نسبت به سایر ژنوتیپ‌ها داشتند. در شرایط دیم، ژنوتیپ‌های ۷، ۱۷، ۵، ۹ و ۱۳ بالاترین شاخص‌های STI، MP و GMP را نشان دادند، درحالی‌که ژنوتیپ‌های ۵ و ۱۳ با مقادیر پایین SSI و TOL گزینه‌های مناسبی برای مناطق خشک و نیمه‌خشک بودند. در شرایط تنش خشکی بعد از گلدهی، ژنوتیپ‌های ۵، ۱۹، ۲۱، ۳، ۷ و ۱۷ با شاخص‌های مطلوب و عملکرد پایدار شناسایی شدند و ژنوتیپ ۲۱ بیشترین

کافی هستند. از سوی دیگر، انوار و همکاران (Anwaar *et al.*, 2020) شاخص‌های GMP، MP، STI را به‌عنوان ابزارهای برتر برای ارزیابی این ارقام معرفی کردند. علاوه بر این، محققان دیگر خیاط نژاد و غلامین (Khayatnezhad & Gholamin, 2020) و گلاب و همکاران (Ghallab *et al.*, 2024) شاخص SSI را برای ارزیابی تحمل به خشکی، به‌ویژه در شرایط ترکیبی تنش و بدون تنش مؤثر دانسته‌اند. در مطالعه‌ای، کاربرد شاخص‌های تحمل به خشکی در ارزیابی ۱۹ ژنوتیپ گندم نان بررسی شد و ژنوتیپ‌های مقاوم به خشکی از طریق رتبه‌بندی شاخص‌ها شناسایی شدند. همچنین، PCA نشان داد که مؤلفه‌های اول و دوم به‌ترتیب ۶۶/۷۸ و ۳۲/۵۰ درصد از واریانس کل را تبیین نمودند. نمودار چندمتغیره بای‌پلات نیز نشان داد که ارقام مورد بررسی در نزدیکی بردارهای مرتبط با شاخص‌های برتر، شامل STI، GMP، MP و HMP قرار گرفته‌اند (Morovati *et al.*, 2024).

در پژوهشی که بر روی ۱۲۰ ژنوتیپ گندم در اتیوپی انجام شد، شاخص‌های GMP، MP، HMP، STI و YI به‌عنوان ابزارهای مناسب برای ارزیابی تحمل به خشکی معرفی شدند. این شاخص‌ها به‌دلیل همبستگی مثبت و معنی‌دار با عملکرد در شرایط تنش و بدون تنش شناسایی شدند (Semahegn *et al.*, 2020). همچنین، مشابه نتایج این مطالعه، تحقیقات انجام‌شده بر روی گونه‌های مختلف گیاهی نشان داده است که شاخص‌هایی که در هر دو شرایط آبی و تنش با عملکرد همبستگی دارند،

پایداری را نشان داد. در مقابل، ژنوتیپ‌های حساس‌تر مانند ۱۰ و ۱۴ به دلیل حساسیت بالا و کاهش شدید عملکرد برای کشت مستقیم توصیه نمی‌شوند و می‌توان از آن‌ها به عنوان والدین حساس در برنامه‌های دورگ‌گیری برای شناسایی نشانگرهای مرتبط با تحمل استفاده کرد. بر اساس PCA، ژنوتیپ‌های ۷ و ۱۷ در هر دو شرایط دیم و تنش خشکی بعد از گلدهی عملکرد مطلوبی داشتند و ژنوتیپ‌های ۱۹، ۲۱، ۱۲، ۱۳، ۶، ۳ و ۵ برای کشت در شرایط خشکی انتهای فصل پیشنهاد می‌شوند. در این پژوهش، ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی می‌توانند به عنوان والدین مناسب در برنامه‌های اصلاحی برای انتقال صفات تحمل به خشکی به ارقام پرمحصول و حساس به تنش استفاده شوند. این رویکرد امکان شناسایی QTL های کنترل‌کننده صفات کمی مؤثر در تحمل به خشکی را فراهم کرده و به بهبود برنامه‌های به‌نژادی کمک می‌کند.

دستاوردهای این مطالعه نقش مهمی در توسعه ارقام مقاوم و افزایش بهره‌وری در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایفا می‌کند. افزون بر این، بهره‌گیری از تنوع ژنتیکی در مزارع، خطرات ناشی از تغییرات محیطی و بیماری‌ها را کاهش داده و در نتیجه، پایداری تولید را افزایش می‌دهد. برای تحقیقات آینده، پیشنهاد می‌شود تنوع ژنتیکی ژنوتیپ‌های مختلف یولاف در مناطق اقلیمی گوناگون بررسی گردد تا دامنه توان بالقوه آن‌ها شناسایی شود. همچنین، انجام مطالعات فیزیولوژیکی و مولکولی برای شناسایی ژن‌ها و مسیرهای مرتبط با تحمل به خشکی، ترکیب شاخص‌های MP، GMP، STI و YSI برای افزایش دقت در انتخاب ژنوتیپ‌های مطلوب و اجرای آزمایش‌های چندساله و چندمکانی برای ارزیابی پایداری نتایج، توصیه می‌شود.

References

- Abd El-Aty, M. S., Gad, K. M., Hefny, Y. A., & Shehata, M. O. 2024. Performance of some wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes and their drought tolerance indices under normal and water stress. *Egyptian Journal of Soil Science*, 64 (1), 19-30. <https://doi.org/10.21608/ejss.2023.234140.1657>
- Ahakpaz, F., Bernosi, I., Abdollahi, B., Golkari, S., Jafarzadeh, J., & Udupa, S. 2020. Evaluation of barley genotypes based on morpho-physiological traits and drought tolerance indices under rainfed and supplementary irrigation conditions. *Iranian Dryland Agronomy Journal*, 8 (2), 153-176. <https://doi.org/10.22092/idadj.2019.126360.257>. (In Persian)
- Akçura, M., & Ceri, S. 2011. Evaluation of drought tolerance indices for selection of Turkish oat (*Avena sativa* L.) landraces under various environmental conditions. *Zemdirbyste-Agriculture*, 98 (2), 157-166.
- Akcura, M., Partigoç, F., & Kaya, Y. 2011. Evaluating of drought stress tolerance based on selection indices in Turkish bread wheat landraces. *Journal of Animal and Plant Sciences*, 21 (4), 700-709.

- Anwaar, H. A., Perveen, R., Mansha, M. Z., Abid, M., Sarwar, Z. M., Aatif, H. M., Umar, U. U. D., Sajid, M., Aslam, H. M. U., Alam, M. M., Rizwan, M., Ikram, R. M., Alghanem, S.M.S., Rashid, A., & Khan, K. A. 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. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2019.12.009>
- Arazmjoo, E., & Nikkhah Chamanabad, H. R. 2022. Selecting tolerant barley genotypes to terminal drought stress based on grain yield stability and stress tolerance indices. Cereal Research, 11 (4), 325-341. <https://doi.org/10.22124/cr.2022.21573.1710>. (In Persian)
- Bahraminejad, S., Keshvari, R., & Amiri, R. 2016. Evaluation of oat (*Avena sativa* L.) genotypes using drought tolerance indices. Environmental Stresses in Crop Sciences, 8 (2), 259-272. <https://doi.org/10.22077/escs.2016.237>. (In Persian)
- Barati, A., Arazmjoo, E., Tabatabaei, S. A., & Ghazvini, H. A. 2024. Selection of Barley Genotypes (*Hordeum vulgare* L.) with High and Stable Grain Yield in Drought Stress Conditions. Journal of Crop Breeding, 16(2), 148-159. <https://doi.org/10.61186/jcb.16.2.148>. (In Persian)
- Barati, A., Arazmjoo, E., Tabatabaei, S. A., & Taheri Mazandrani, M. 2023. Selection of tolerant barley (*Hordeum vulgare* L.) genotypes to terminal drought stress based on grain yield, yield stability and stress tolerance indices. Iranian Journal of Crop Sciences, 25 (3), 258-274. <http://agrobreedjournal.ir/article-1-1321-en.html>. (In Persian)
- Darvishnia, F., Pahlavani, M. H., Zeinelinejad, K., Azizi, K., & Bagherkia, S. 2020. Graphical analysis of reaction of bread wheat genotypes to water stress in lorestan province. Journal of Plant Genetic Research, 7(1), 1-18. <https://doi.org/20.1001.1.23831367.1399.7.1.7.4>. (In Persian)
- Dastfall, M., Najafi Mirak, T., & Zali, H. 2024. Selection of durum wheat (*Triticum turgidum* L. var. durum) genotypes tolerant to terminal season drought stress using multi-trait indices (MGIDI). Iranian Journal of Crop Sciences, 25 (4), 342-361. <http://agrobreedjournal.ir/article-1-1334-en.html>. (In Persian)
- Devi, S., Singh, V., Kumar, M., Yashveer, S., Kumar, R., Sharma, S., ... & Redhu, M. 2024. Assessing wheat genotype performance under heat, drought and combined stresses using multiple stress indices. Euphytica, 220, 164. <https://doi.org/10.1007/s10681-024-03424-0>
- Dhakal, A., Poland, J., Adhikari, L., Faryna, E., Fiedler, J., Rutkoski, J. E., & Arbelaez, J. D. 2024. Implementing multi-trait genomic selection to improve grain milling quality in oats (*Avena sativa* L.). The Plant Genome, 17 (2), e20457. <https://doi.org/10.1002/tpg2.20457>
- Dorostkar, S., Dadkhodaie, A., & Heidari, B. 2015. Evaluation of grain yield indices in hexaploid wheat genotypes in response to drought stress. Archives of Agronomy and Soil Science, 61 (3), 397-413. <https://doi.org/10.1080/03650340.2014.936855>
- FAO. 2022. FAOSTAT: Production—Crops and livestock products. Food and Agriculture Organization of the United Nations. [FAOSTAT](https://www.fao.org/faostat)
- Feizi, M., Solouki, M., Sadeghzadeh, B., Fakheri, B., & Mohammadi, S. A. 2020. Evaluation of drought tolerance indices for barley landraces under irrigated and dry conditions. Bioscience Journal, 36(5), 1518-1527. <https://doi.org/10.14393/BJ-v36n5a2020-41864>
- Feroun, M., Bouhraoua, S., Srhiouar, N., Boussakouran, A., Belahcen, D., El Ghachtouli, N., ... & Louahlia, S. 2024. Advanced multivariate approaches for selecting Moroccan drought-tolerant barley (*Hordeum vulgare* L.) cultivars. Ecological Frontiers, 44(4), 820-828. <https://doi.org/10.1016/j.ecofro.2024.02.010>

- Fernandez, G. C. J. 1992. Effective Selection Criteria for Assessing Stress Tolerance. pp. 257-270. In: Kuo, C. G. (ed.). Proceeding of the International Symposium on Adaptation of Vegetables and Other Food Crops in Temperature and Water Stress. Shanhua, Taiwan.
- Ghallab, K., Abd El-Megeed, S., & Mohamed, Z. 2024. Evaluation of grain yield of some new bread wheat varieties under water stress conditions. Labyrinth: Fayoum Journal of Science and Interdisciplinary Studies, 2 (1), 1-7. <https://doi.org/10.21608/ifsis.2024.264146.1059>
- Ghimire, K., McIntyre, I., & Caffè, M. 2024. Evaluation of Morpho-Physiological Traits of Oat (*Avena sativa* L.) under Drought Stress. Agriculture, 14 (1), 109. <https://doi.org/10.3390/agriculture14010109>
- Hasanzadeh, H., Shahbazi, E., Mohammadi, S., & Saeidi, K. A. 2020. Evaluation of drought tolerance indices for selection of superior genotypes in black cumin (*Nigella sativa* L.). Journal of Crop Production and Processing, 10 (2), 67-80. <http://dx.doi.org/10.47176/jcpp.10.2.26631>. (In Persian)
- Jazayeri, M. R., & Rezai, A. M. 2006. Evaluation of drought tolerance of oat (*Avena sativa* L.) cultivars in climatic conditions of Isfahan. Journal of Crop Production and Processing, 10 (3), 393-404. <http://jcpp.iut.ac.ir/article-1-593-en.html>. (In Persian)
- Kebede, G., Worku, W., Jifar, H., & Feyissa, F. 2023. Grain yield stability analysis using parametric and nonparametric statistics in oat (*Avena sativa* L.) genotypes in Ethiopia. Grassland Research, 2 (3), 182-196. <https://doi.org/10.1002/glr2.12056>
- Khan, A. A. 2025. Drought tolerance indices: genetic parameter estimation and application in discriminating tolerant wheat genotypes. Genetika, 57(3), 377-397. <https://doi.org/10.2298/GENSR2503377K>
- Khayatnezhad, M., & Gholamin, R. 2020. A modern equation for determining the dry-spell resistance of crops to identify suitable seeds for the breeding program using modified stress tolerance index (MSTI). Bioscience Biotechnology Research Communications, 13 (4), 2114-2117. <http://dx.doi.org/10.21786/bbrc/13.4/72>
- Kumar, Y., Devi, S., Phougat, D., Chaurasia, H., & Choudhary, S. 2024. Assessment of Barley genotypes for salinity tolerance based on various indices under field condition. Current Agriculture Research Journal, 12(2), 586-598. <http://dx.doi.org/10.12944/CARJ.12.2.08>
- Lal, K., Jatoti, W. A., Memon, S., Jatoti, I. A., Rind, S. N., Rajput, L., Khan, N. M., Khaskhali, I. A., Depar, M. S., Lund, M. I., Kaleri, M. H., & Sarwar, M. K. S. 2024. Wheat (*Triticum aestivum* L.) drought tolerance indices under water stress conditions. SABRAO Journal of Breeding and Genetics, 56 (1), 232-245. <http://doi.org/10.54910/sabrao2024.56.1.21>
- Mahmoodi, B., Bahraminejad, S., & Fakhri, R. 2016. Genetic diversity of oat genotypes for iron and zinc content under complete irrigation and terminal moisture stress conditions. Iranian Journal of Field Crops Research, 14(3), 415-426. <https://doi.org/10.22067/GSC.V14I3.42328>. (In Persian)
- Makebe, A., Shimelis, H., & Mashilo, J. 2024. Selection of M5 mutant lines of wheat (*Triticum aestivum* L.) for agronomic traits and biomass allocation under drought stress and non-stressed conditions. Frontiers in Plant Science, 15, 1314014. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1314014>
- McCaig, T. N., & Clarke, J. M., 1982. Seasonal changes in nonstructural carbohydrate levels of wheat and oats grown in semiarid environment. Crop Science, 22(5), 963-970. <https://doi.org/10.2135/cropsci1982.0011183X002200050016x>

- Mokarroma, N., Uddin, M. R., Ahmed, I. M., Talukder, A. M. R., Ahsan, A. F. M. S., & Alam, Z. 2025. Multivariate analysis for identifying drought-tolerant barley (*Hordeum vulgare* L.) genotypes using stress indices. Data in Brief, 59, 111452. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2025.111452>
- Morovati, Z., Farshadfar, E., & Shirvani, H. 2024. Investigating the drought resistance of native bread wheat (*Triticum aestivum* L.) populations using drought sensitivity and resistance indices. Cereal Biotechnology and Biochemistry, 3 (2), 305-324. <https://doi.org/10.22126/cbb.2024.11075.1082>. (In Persian)
- Moussa, O. A., Bil-Assanou, I. H., & Zaman-Allah, M. A. 2023. Evaluation of Four Maize (*Zea mays* L.) Genotypes Using Drought Tolerance Indices. Asian Journal of Biology. 19 (2), 54-62. <https://doi.org/10.9734/ajob/2023/v19i2363>
- Mubushar, M., El-Hendawy, S., Tahir, M. U., Alotaibi, M., Mohammed, N., Refay, Y., & Tola, E. 2022. Assessing the suitability of multivariate analysis for stress tolerance indices, biomass, and grain yield for detecting salt tolerance in advanced spring wheat lines irrigated with saline water under field conditions. Agronomy, 12(12), 3084. <https://doi.org/10.3390/agronomy12123084>
- Naghavi, M. R., Pour Aboughadareh, A., & Khalili, M. 2013. Evaluation of drought tolerance indices for screening some of corn (*Zea mays* L.) cultivars under environmental conditions. Notulae Scientia Biologicae, 5 (3), 388-393. <https://doi.org/10.15835/nsb539049>
- Nakhei, A., Arazmjoo, E., & Abasi, M. R. 2019. Evaluation of yield and agronomical traits of foxtail millet (*Setaria italica* L. Beauv.) genotypes under salinity stress and introducing the best tolerance index to salinity. Environmental Stresses in Crop Sciences, 12 (3), 933-948. <https://doi.org/10.22077/escs.2019.1569.1355>. (In Persian)
- Naseri, M. 2022. Evaluation of drought tolerance of oat genotypes (*Avena sativa* L.) in Sarpol-e Zahab conditions using principal component analysis. 17th National Congress and 3rd International Congress of Agricultural Sciences and Plant Breeding of Iran, Kerman, Iran. <https://civilica.com/doc/1419198>
- Nooryazdan, H. 2024. Evaluation of grain yield among wheat cultivars based on drought stress tolerance indices. Cereal Biotechnology and Biochemistry, 3 (2), 325-345. <https://doi.org/10.22126/cbb.2024.11052.1081>. (In Persian)
- Rijal, R. B., Bashyal, P., Yadav, D. R., Upadhyay, K., Pant, K. R., & Adhikari, N. R. 2024. Assessing drought tolerance in advance wheat genotypes using stress tolerance indices. Archives of Agriculture and Environmental Science, 9 (2), 336-344. <https://doi.org/10.26832/24566632.2024.0902019>
- Saidi, A., Barati, A., Ghazvini, H., & Hajibarat, Z. 2024. Combination of AMMI, GGE biplot, stability parameters, and physiological traits in promising barley genotypes under water-deficit condition. Agrosystems, Geosciences & Environment, 7(4), e20575. <https://doi.org/10.1002/agg2.20575>
- Semahegn, Y., Shimelis, H., Laing, M., & Mathew, I. 2020. Evaluation of bread wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes for yield and related traits under drought stress conditions. Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science, 70 (6), 474-484. <https://doi.org/10.1080/09064710.2020.1767802>
- Sio-Se Mardeh, A., Ahmadi, A., Poustini, K., & Mohammadi, V. 2006. Evaluation of drought resistance indices under various environmental conditioning. Field Crops Research, 98 (2-3), 222-229. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2006.02.001>

- Song, R., Shi, P., Xiang, L., He, Y., Dong, Y., Miao, Y., & Qi, J. 2024. Evaluation of barley genotypes for drought adaptability: based on stress indices and comprehensive evaluation as criteria. *Frontiers in Plant Science*, 15:1436872. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1436872>
- Wen, G., Ma, B. L., Shi, Y., Liu, K., & Chen, W. 2023. Selection of oat (*Avena sativa* L.) drought-tolerant genotypes based on multiple yield-associated traits. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 103 (9), 4380-4391. <https://doi.org/10.1002/jsfa.12504>
- Yahoueian, S. H., Behamta, M. R., Babaie, H. R., & Mohammadibazargani, M. 2017. Screening of drought-tolerant and sensitive genotypes in soybean (*Glycine max* L.) using different multivariate methods. *International Journal of Agricultural Research, Innovation and Technology*, 7 (2), 7-17. <https://doi.org/10.22004/ag.econ.305433>
- Yarahmadi, S., Nematzade, G., Sabouri, H., & Najafi Zarini, H. 2020. Relationships between drought stress tolerance indices and their use in wheat screening programs. *Journal of Crop Breeding*, 12 (33), 29-41. <http://dx.doi.org/10.29252/jcb.12.33.29>. (In Persian)
- Zaheri, A., & Bahraminejad, S. 2012. Assessment of drought tolerance in oat (*Avena sativa*) genotypes. *Annals of Biological Research*, 3 (5), 2194-2201.
- Zhang, X., Liu, W., Lv, Y., Li, T., Tang, J., Yang, X., Bai, J., Jin, X., & Zhou, H. 2022. Effects of drought stress during critical periods on the photosynthetic characteristics and production performance of naked oat (*Avena nuda* L.). *Scientific Reports*, 12, 11199. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-15322-3>
- Zhao, B., Ma, B. L., Hu, Y., & Liu, J. 2021. Source-sink adjustment: a mechanistic understanding of the timing and severity of drought stress on photosynthesis and grain yields of two contrasting oat (*Avena sativa* L.) genotypes. *Journal of Plant Growth Regulation*, 40, 263-276. <https://doi.org/10.1007/s00344-020-10093-5>