



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), 61-86. DOI: [10.22126/cbb.2025.11884.1103](https://doi.org/10.22126/cbb.2025.11884.1103)



© The Author(s).
doi: [10.22126/cbb.2025.11884.1103](https://doi.org/10.22126/cbb.2025.11884.1103)

Publisher: Razi University



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: رایانامه: 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 ۳ 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*، ۵(۱)، ۸۶-۶۱. 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 غلات یولاف را به خود اختصاص داده است، که اهمیت آن را در مقایسه با سایر گونه‌ها برجسته می‌کند (Kebede et al., 2023). در سال‌های اخیر، به دلیل افزایش تقاضا برای محصولات غذایی سالم و عملکردهای متنوع یولاف، 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 (Wen et al., 2023).

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 این کاهش بستگی به ژنوتیپ گیاه دارد (Zhao et al., 2021). بنابراین، شناسایی ژنوتیپ‌های مقاوم به خشکی با توانایی حفظ عملکرد در شرایط تنش، امری ضروری است.

شاخص‌های تحمل خشکی مانند شاخص تحمل تنش (STI)، میانگین بهره‌وری (MP) و میانگین هندسی بهره‌وری (GMP)، ابزارهای مفیدی برای ارزیابی و انتخاب ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی هستند (Moussa et al., 2023; Morovati et al., 2024). این شاخص‌ها با تحلیل عملکرد دانه در شرایط تنش و بدون تنش، امکان شناسایی ژنوتیپ‌های برتر را فراهم می‌کنند. با این حال، کمبود اطلاعات کافی درباره تنوع ژنتیکی یولاف و واکنش آن به تنش خشکی، چالشی اساسی 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 بالای خود برای کشاورزی پایدار، کمتر مورد توجه قرار گرفته است (Bahraminejad et al., 2016). همچنین، نیاز به توسعه شاخص‌های دقیق‌تر و ترکیب چند شاخص برای ارزیابی تحمل خشکی، از دیگر چالش‌های موجود در این زمینه است.

در پژوهش‌های اخیر، از تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA) و بای‌پلات برای تحلیل تنوع ژنتیکی و شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی استفاده شده است. این روش، با کاهش پیچیدگی داده‌ها، ویژگی‌ها و شاخص‌های کلیدی مؤثر بر تحمل خشکی را شناسایی می‌کند (Barati et al., 2023; Rijal et al., 2024). بهرامی‌نژاد و همکاران (Bahraminejad et al., 2016) با بررسی ۲۵ ژنوتیپ یولاف زراعی، تنوع قابل توجهی در عملکرد دانه و شاخص‌های تحمل خشکی مشاهده کردند و ژنوتیپ‌های برتری مانند UFRGS940886-4 و Euro را به‌عنوان متحمل، معرفی نمودند. این نتایج، اهمیت شاخص‌هایی تن خشکی و همچنین PCA و بای‌پلات را در غربال ژنوتیپ‌های مقاوم به خشکی نشان می‌دهد. پژوهش‌های مشابه در سایر غلات مانند جو نیز این یافته‌ها را تأیید کرده‌اند (Ahakpaz et al., 2020).

هدف اصلی این پژوهش شناسایی ژنوتیپ‌های یولاف با عملکرد بالا و متحمل به خشکی است. این مطالعه با ارزیابی شاخص‌های چندگانه تحمل خشکی و استفاده از PCA، نوآوری خود را در ترکیب ابزارهای تحلیلی و شاخص‌های قابل اعتماد برای شناسایی ژنوتیپ‌های برتر نشان می‌دهد. در این پژوهش، عملکرد دانه ۲۱ ژنوتیپ یولاف در سه شرایط آبی مختلف (بدون تنش، دیم و تنش خشکی بعد از گلدهی) بررسی شده است تا ژنوتیپ‌هایی شناسایی شوند که قابلیت حفظ عملکرد بالا در شرایط مختلف را داشته باشند.

رویکرد این پژوهش نه‌تنها به بهبود کارایی برنامه‌های اصلاحی یولاف کمک می‌کند، بلکه با ارائه یک مدل تحلیلی، می‌تواند به‌عنوان الگویی در مطالعات مشابه سایر غلات مورد استفاده قرار گیرد. نتایج این تحقیق علاوه بر تأثیرگذاری در اصلاح ژنتیکی یولاف، راهکارهای عملی برای افزایش بهره‌وری پایدار این محصول در شرایط تنش‌های محیطی ارائه می‌دهد و گامی مؤثر در جهت افزایش تاب‌آوری کشاورزی در برابر تغییرات اقلیمی محسوب می‌شود.

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 شده بودند، مورد ارزیابی قرار گرفتند.

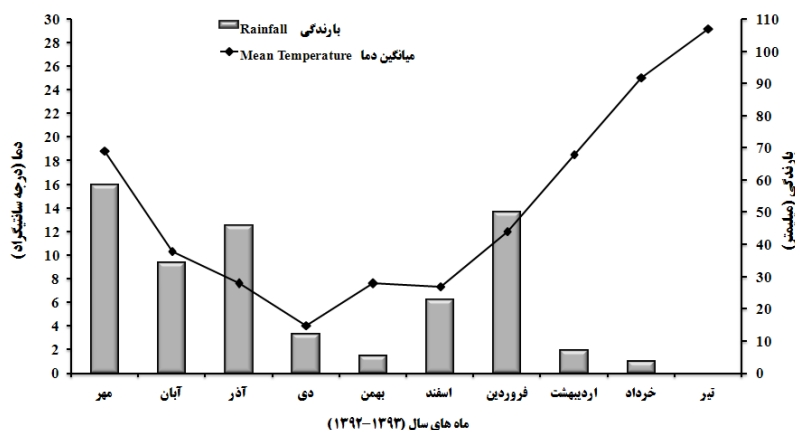
آزمایش به‌صورت طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار و تحت سه شرایط آبی (بدون تنش)، دیم و تنش خشکی بعد از گلدهی در مزرعه تحقیقاتی و آزمایشگاه پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه رازی، با مختصات جغرافیایی ۴۷ درجه و ۹ دقیقه طول شرقی و ۳۴ درجه و ۲۱ دقیقه عرض شمالی، طی فصل زراعی ۱۳۹۳-۱۳۹۴ اجرا شد. منطقه مورد مطالعه دارای اقلیم سرد معتدل با میانگین بیشینه و کمینه دمای سالانه به‌ترتیب 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 سانتی متر 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 میلی متر 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 علف های هرز به صورت دستی انجام پذیرفت.

جدول ۱- شماره، نام و منشأ ژنوتیپ های مورد مطالعه یولاف

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

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

(بدون تنش)، دیم و تنش خشکی بعد از گلدهی، واکنش ژنوتیپ‌ها ارزیابی گردید. شاخص‌های تحمل تنش خشکی، جهت تعیین میزان تحمل یا حساسیت ژنوتیپ‌ها به خشکی، با استفاده از روابط ۱ تا ۷ محاسبه شدند.

SSI-۱ شاخص حساسیت به تنش ۱) (

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

بر اساس این شاخص که توسط فیشر و مائورر (Fischer & Maurer, 1978) ارائه شده است، ژنوتیپ‌هایی که مقدار SSI آن‌ها کمتر از یک باشد، به‌عنوان متحمل به خشکی شناخته می‌شوند؛ زیرا کاهش عملکرد آن‌ها در شرایط خشکی کمتر از کاهش عملکرد متوسط کل ژنوتیپ‌ها است. با این حال، این شاخص توانایی تفکیک گروه A از C (گروه‌بندی‌های چهارگانه فرناندز) را ندارد.

۲- شاخص تحمل ۲ (TOL)

$$TOL = Y_p - Y_s$$

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 جمع‌آوری شده از هر کرت وزن گردید. در نهایت، عملکرد دانه بر حسب کیلوگرم در هکتار با استفاده از تناسب محاسبه شد.

شاخص‌های مقاومت به خشکی مبتنی بر عملکرد

دانه

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

می‌دهد. به همین دلیل، GMP در مقایسه با MP توانایی بالاتری در تفکیک ژنوتیپ‌های گروه A از سایر گروه‌ها دارد. بر اساس این ویژگی، شاخص تحمل به خشکی STI نیز بر مبنای GMP توسعه یافته است.

۵- شاخص تحمل به تنش ۵ (STI)

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

این شاخص که توسط فرناندز (Fernandez, 1992) پیشنهاد شده است، به منظور شناسایی ژنوتیپ‌هایی با عملکرد بالا در هر دو محیط تنش و بدون تنش طراحی گردیده است. مقدار بالای STI برای یک ژنوتیپ نشان‌دهنده تحمل بیشتر آن به خشکی و عملکرد بالقوه بالاتر آن است. شاخص STI قادر به تفکیک و شناسایی گروه A از گروه‌های B و C می‌باشد.

۶- شاخص عملکرد ۶ (YI)

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

این شاخص که توسط گاووزی و همکاران (Gavuzzi et al., 1997) معرفی شده است، ارقام را فقط بر اساس عملکرد آن‌ها در شرایط تنش رتبه‌بندی می‌کند. بنابراین، این شاخص قادر به تشخیص ژنوتیپ‌های گروه A نخواهد بود.

۷- شاخص پایداری عملکرد ۷ (YSI)

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

شاخص TOL توسط راسل و هامبلین (Rosielle & Hamblin, 1981) معرفی شده است و مقدار بالای TOL نشان‌دهنده کاهش عملکرد بیشتر در شرایط تنش و حساسیت بالاتر به خشکی است. با این حال، این شاخص توانایی تفکیک گروه C از گروه A (گروه‌بندی‌های چهارگانه فرناندز) را ندارد.

۳- شاخص میانگین بهره‌وری ۳ (MP)

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

این شاخص توسط راسل و هامبلین (Rosielle & Hamblin, 1981) معرفی شده است از آنجا که MP صرفاً میانگین تولید در هر دو شرایط تنش و بدون تنش است، نباید با عملکرد در شرایط تنش همبستگی داشته باشد. به همین دلیل، MP قادر به تفکیک ژنوتیپ‌های گروه A از سایر گروه‌ها (در گروه‌بندی چهارجانبه فرناندز) نیست. همان‌طور که هولز (Hohls, 2001) بیان کرده است، انتخاب بر اساس MP می‌تواند باعث افزایش عملکرد در هر دو شرایط تنش و بدون تنش شود، مگر اینکه همبستگی بین عملکرد در این دو محیط شدیداً منفی باشد.

۴- میانگین هندسی بهره‌وری ۴ (GMP)

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

شاخص GMP که توسط فرناندز (Fernandez, 1992) معرفی شده است، حساسیت کمتری به مقادیر بسیار متفاوت عملکرد در شرایط تنش و بدون تنش نشان

این شاخص که توسط بوسلاما و شاپاگ (Bouslama & Schapaugh, 1984) معرفی شده است، عملکرد یک رقم را تحت شرایط تنش نسبت به عملکرد آن در شرایط بدون تنش ارزیابی می‌کند و باید به‌عنوان یک نشانگر مقاومت به خشکی در مواد ژنتیکی در نظر گرفته شود. بنابراین، ارقامی که دارای YSI بالاتری هستند، انتظار می‌رود که تحت هر دو شرایط تنش و بدون تنش عملکرد بالاتری داشته باشند.

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.

تجزیه و تحلیل آماری

پس از مرتب‌سازی داده‌ها، نرمال بودن آن‌ها با استفاده از آزمون کلموگروف-اسمیرنوف ($Kolmogrov-Smirnov$) در نرم‌افزار SAS بررسی شد که نشان داد داده‌ها از توزیع نرمال برخوردار هستند. 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 هوایی سال زراعی اجرای آزمایش نیز با استفاده از برنامه Excel رسم گردید.

نتایج و بحث

نتایج جدول 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 the grain yield of evaluated oat genotypes under irrigated (non-stress), rainfed, and post-flowering drought stress conditions

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

*, ** 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.

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. 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 در اثر دیم و تنش خشکی بعد از گلدهی به‌ترتیب ۴۹/۱۳ و ۳۳/۱۶ درصد کاهش یافته است. بنابراین، شدت تنش محاسبه‌شده برای شرایط دیم ۰/۴۹ و برای شرایط تنش

بعد از گلدهی ۰/۳۳ به‌دست آمد که هر دو در محدوده تنش متوسط قرار می‌گیرند. شدت تنش در این مطالعه مشابه گزارش‌های سایر پژوهشگران است که شدت تنش کمتر از ۰/۷ را به‌عنوان تنش متوسط و شدت تنش بالاتر از ۰/۷ را به‌عنوان تنش شدید طبقه‌بندی کرده‌اند (Moussa *et al.*, 2023). در مطالعه‌ای روی ذرت، شدت تنش برابر با ۰/۲۷ گزارش شده است (Moussa *et al.*, 2023). این تطابق نشان‌دهنده همخوانی نتایج ما با پژوهش‌های قبلی است. در راستای این نتایج، بهرامی‌نژاد و همکاران (Bahraminejad *et al.*, 2016) و همچنین جزایری و رضایی (Jazayeri & Rezai, 2006) در

گرفته می‌شوند. عملکرد دانه این ژنوتیپ‌ها نیز در هر دو شرایط دیم و بدون تنش بالا بود. طبق نظر فرناندز (Fernandez, 1992)، ژنوتیپ‌هایی که مقادیر بیشتری از شاخص STI دارند، عملکرد بالاتری را در هر دو شرایط تنش و بدون تنش نشان می‌دهند. از میان ژنوتیپ‌های ذکرشده، ژنوتیپ‌های ۵ و ۱۳ از نظر شاخص‌های 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، تحمل نسبی بهتری نسبت به شرایط تنش خشکی خواهد داشت. بر این اساس، در این آزمایش ژنوتیپ‌های ۵ و ۳ از وضعیت بهتری برخوردار بوده و برای کشت در شرایط دیم توصیه می‌شوند. یافته‌های این تحقیق با نتایج مطالعات پیشین همخوانی دارد. پژوهش‌های متعددی تأیید کرده‌اند که شاخص‌های STI، MP و GMP ابزارهای مؤثری برای شناسایی ژنوتیپ‌های با عملکرد بالا در شرایط تنش و بدون تنش هستند. به‌عنوان مثال، موسی و همکاران (Moussa et al., 2023) اثربخشی این شاخص‌ها را در شناسایی ژنوتیپ‌های ذرت با عملکرد بالا گزارش کرده‌اند. به‌طور مشابه، در مطالعه‌ای دیگر، معماری و همکاران (Memari et al., 2021) نشان دادند که ژنوتیپ‌های برتر با مقادیر بالای STI، MP و GMP در هر دو شرایط تنش و بدون تنش عملکرد مطلوبی دارند.

ارزیابی تحمل به خشکی به‌ترتیب ۲۵ و ۲۰ ژنوتیپ یولاف، درصد کاهش میانگین عملکرد دانه ژنوتیپ‌ها در اثر تنش خشکی را به‌ترتیب ۲۹/۸۷ و ۴۹/۵۵ درصد و شدت تنش را ۰/۳ و ۰/۵ گزارش کردند. این داده‌ها تأیید می‌کنند که شدت تنش محاسبه‌شده در مطالعه حاضر نیز در محدوده تنش متوسط قرار دارد. همچنین، ارزیابی هم‌زمان ژنوتیپ‌ها تحت شرایط بهینه و تنش، به‌عنوان مناسب‌ترین روش برای انتخاب ژنوتیپ‌های برتر در محیط‌هایی که به‌طور مکرر با تنش‌های غیرزیستی مانند کمبود آب مواجه هستند، پیشنهاد شده است. این رویکرد به این دلیل اهمیت دارد که انتخاب ژنوتیپ‌ها فقط بر اساس عملکرد در شرایط عادی، لزوماً منجر به بهبود بهره‌وری در شرایط تنش نمی‌شود و بالعکس (Moussa et al., 2023). وجود تنوع بالا میان ژنوتیپ‌های مورد مطالعه در هر سه شرایط در جداول ۳ و ۴ قابل مشاهده است. ژنوتیپ‌های ۷، ۵ و ۲۱ به‌ترتیب 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، ژنوتیپ‌های ۱، ۲۰ و ۱۴ به‌ترتیب 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 شاخص‌های STI، MP و GMP به ژنوتیپ‌های ۷، ۱۷، ۵، ۹ و ۱۳ اختصاص داده شد (جدول ۳). بر اساس این نتایج، این ژنوتیپ‌ها به‌عنوان متحمل به خشکی در نظر

بر اساس نتایج به دست آمده (جدول ۳)، ژنوتیپ‌های ۵، ۳، ۱۳، ۱۲ و ۷ که بالاترین مقادیر YI را داشتند (به ترتیب ۱/۷۰، ۱/۳۰، ۱/۴۰، ۱/۳۱ و ۱/۳۱)، به دلیل عملکرد مطلوب در شرایط دیم، به عنوان 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 به عنوان ژنوتیپ‌های حساس‌تر به تنش خشکی شناخته شده و نیاز به اصلاح بیشتر برای بهبود تحمل به خشکی دارند.

تحت شرایط تنش خشکی اعمال شده 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 (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. پژوهشی روی ۲۸ ژنوتیپ گندم نان نشان داد که تنش خشکی موجب کاهش ۸/۹۸ درصدی عملکرد دانه می‌شود و بر اساس شاخص‌های TOL و SSI، ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی شناسایی شدند (Abd El-Aty et al., 2024).

با توجه به نحوه محاسبه شاخص YI (جدول ۴)، این شاخص به عنوان 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. به عنوان مثال، ژنوتیپ‌های ۵، ۱۷، ۱۹ و ۲۱ به ترتیب با مقادیر YI برابر با ۱/۳۹، ۱/۳۹، ۱/۴۴ و ۱/۸۵، بالاترین مقادیر این شاخص را نشان دادند و به عنوان 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.

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

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

0.46	0.23	1.55	1689.87	2138.86	2622.28	827.72	3450.00	20
1.36	0.76	0.75	3060.32	3141.68	1420.70	2431.33	3852.03	21

۱۸ با مقادیر پایین تر YSI به ترتیب ۰/۲۴، ۰/۳۱ و ۰/۳۸ و مقادیر پایین تر YI به ترتیب ۰/۳۶، ۰/۳۷ و ۰/۶ 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 به دلیل 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.

اما مطالعه دیگر نشان داد که ارقامی با YSI بالاتر، کمترین عملکرد را در شرایط بدون تنش و بالاترین 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 (۱/۰۸)، ۲۱ (۱/۱۲) و ۳ (۰/۹۷) 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 به دلیل 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

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	MP	TOL	YS	YP	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 و 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.

به‌طور کلی، شاخص‌هایی که همبستگی معنی‌داری با عملکرد در شرایط بهینه و تنش دارند، به‌عنوان بهترین شاخص‌ها معرفی می‌شوند، زیرا قادرند ژنوتیپ‌های با عملکرد بالا را در هر دو شرایط تفکیک کنند (Moussa *et al.*, 2023). 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 قادر به انتخاب ژنوتیپ‌هایی با عملکرد بالا در هر دو شرایط (ژنوتیپ‌های مطلوب و متحمل به خشکی) هستند. نتایج مشابهی توسط برخی از محققان گزارش شده است (Boshagh *et al.*, 2018; Hasanzadeh *et al.*, 2020). شاخص‌های STI، MP و GMP در گیاهان مختلف برای غربالگری ژنوتیپ‌های پرمحصول مقاوم به خشکی در هر دو شرایط استفاده شد (Memari *et al.*, 2021). آکورا و همکاران (Akcura *et al.*

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 که توسط حسن‌زاده و همکاران (Hasanzadeh *et al.*, 2020) روی گیاه دارویی سیاه‌دانه انجام شد، YSI همبستگی منفی و معنی‌داری با عملکرد دانه در شرایط بدون تنش نشان داد.

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).

(*al.*, 2011) از شاخص‌های SSI، STI، YSI و HM 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

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

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 گزارش شده توسط بهرامی‌نژاد و همکاران (Bahraminejad *et al.*, 2016)، دستفال و همکاران (Dastfall *et al.*, 2024) و نوریزدان (Nooryazdan, 2024) مطابقت دارد. در مطالعه‌ای که توسط براتی و همکاران (Barati *et al.*, 2023) انجام شد، عملکرد دانه

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 نشان‌دهنده حساسیت بیشتر ژنوتیپ‌ها به تنش خشکی

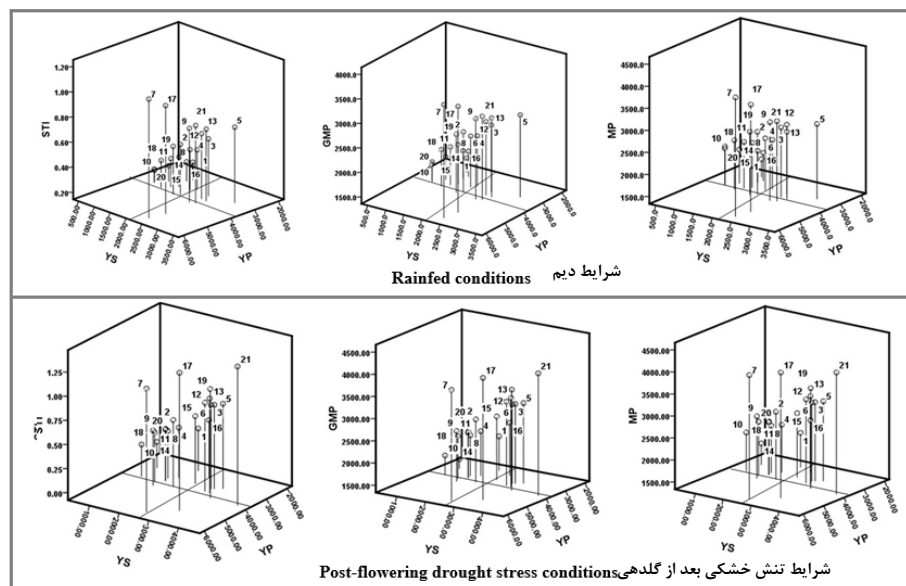
نمودار سه‌بعدی بر اساس شاخص‌های مورد مطالعه برای انتخاب ژنوتیپ‌های برتر

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 پرمعمر 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 دارند. این ژنوتیپ‌ها علاوه بر عملکرد بالا، بیشترین مقادیر مربوط به این شاخص‌ها را نیز به خود اختصاص داده‌اند و

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

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

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 شرایط تنش و بدون تنش در ژنوتیپ‌های یولاف



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

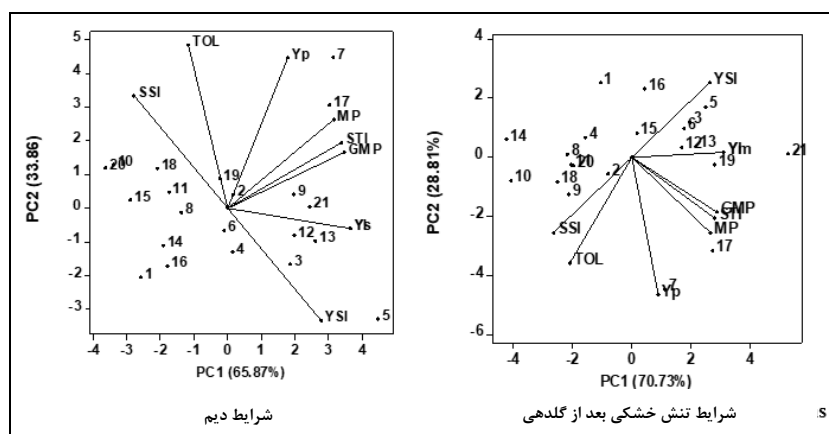
Figure 2- Three-dimensional scatter plot for the selection of drought-tolerant oat genotypes based on grain yield, stress tolerance index (STI), geometric mean productivity (GMP), and mean productivity index (MP) using the Fernandez model under rainfed and post-flowering drought stress conditions

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

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

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.

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 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



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

مجاورت شاخص‌های مهم تحمل به خشکی (STI، MP 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

دو مؤلفه اول حاصل از PCA بر روی شاخص‌های محاسبه‌شده بر اساس داده‌های تنش خشکی بعد از گلدهی و بدون تنش، 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

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 (Bahraminejad et al., 2016; Hasanzadeh et al., 2020; Barati et al., 2023; Dastfall et al., 2024). همچنین، ریجال و همکاران (Rijal et al., 2024) و یاهویان و همکاران (Yahoueian et al., 2017) نشان دادند که نمودارهای بای‌پلات همراه با شاخص‌های تحمل به خشکی ابزار کارآمدی برای غربالگری ژنوتیپ‌های مقاوم و حساس در محصولات مختلف، از جمله گندم و سویا، هستند. 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 & Bahraminejad, 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 کافی هستند. از سوی دیگر، انوار و همکاران (Anwaar et al., 2020) شاخص‌های STI، MP، GMP 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

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 پایداری را نشان داد. در مقابل، ژنوتیپ‌های حساس‌تر مانند ۱۰ و ۱۴ به‌دلیل حساسیت بالا و کاهش شدید عملکرد برای کشت در این شرایط مناسب نبودند و نیازمند اصلاحات ژنتیکی بیشتری هستند. 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 به‌عنوان والدین مناسب در برنامه‌های اصلاحی برای انتقال صفات

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 STI، HMP، MP، GMP 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، ابزارهای مناسبی برای ارزیابی ژنوتیپ‌ها و ارقام به‌شمار 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

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/idaj.2019.126360.257>. (In Persian)
- 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., & 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)

- Boshagh, B., Astraki, H., & Pezashkipour, P. 2018. Evaluation of faba bean genotypes using drought tolerance indices and multivariate statistical methods. *Journal of Crop Breeding*, 10 (27), 1-9. <https://doi.org/10.29252/jcb.10.27.1>. (In Persian)
- Bousslama, M., & Schapaugh, W. T. 1984. Stress tolerance in soybean. Part 1: evaluation of three screening techniques for heat and drought tolerance. *Crop Science*, 24 (5), 933-937. <https://doi.org/10.2135/cropsci1984.0011183X002400050026x>
- 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)
- 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>
- 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.
- Fischer, R. A., & Maurer, R. 1978. Drought resistance in spring wheat cultivars. I. Grain yield responses. *Australian Journal of Agricultural Research*, 29 (5), 897-912. <https://doi.org/10.1071/AR9780897>
- Gavuzzi, P., Rizza, F., Palumbo, M., Campanile, R. G., Ricciardi, G. L., & Borghi, B. 1997. Evaluation of field and laboratory predictors of drought and heat tolerance in winter cereals. *Canadian Journal of plant science*, 77 (4), 523-531. <https://doi.org/10.4141/P96-130>
- 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/ifjsis.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)
- Hohls, T. 2001. Conditions under which selection for mean productivity, tolerance to environmental stress, or stability should be used to improve yield across a range of contrasting environments. *Euphytica*, 120, 235-245. <https://doi.org/10.1023/A:1017569415098>
- 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/qlr2.12056>

- 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>
- Lal, K., Jatoi, W. A., Memon, S., Jatoi, I. A., Rind, S. N., Rajput, L., Khan, N. M., Khaskhali, I. A., Depar, M. S., Lund, M. I., Kaleri, M. H., & Sarwar, M. K. S. 2024. Wheat (*Triticum aestivum* L.) drought tolerance indices under water stress conditions. *SABRAO Journal of Breeding and Genetics*, 56 (1), 232-245. <http://doi.org/10.54910/sabao2024.56.1.21>
- Memari, M., Dadashi, M. R., Sheikh, F., & Ajamnoroezi, H. 2021. Evaluation of drought stress tolerance in some faba bean genotypes using drought tolerance indices and biochemical compounds. *Journal of Crop Production and Processing*, 11 (2), 139-151. <https://doi.org/10.47176/jcpp.11.2.35911>. (In Persian)
- 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>
- 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)
- 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>
- Rosielle, A. A., & Hamblin, J. 1981. Theoretical aspects of selection for yield in stress and non-stress environments. *Crop Science*, 21 (6), 943-946. <https://doi.org/10.2135/cropsci1981.0011183X002100060033x>
- 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>

- 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>