



Grain yield stability analysis of oat (*Avena sativa* L.) genotypes using univariate parametric and non-parametric methods

Seyed Mehdi Safavi¹ , Sohbah Bahraminejad^{1,2} & Hazhir Beheshtizadeh¹

¹ Department of Plant Production and Genetics, Campus of Agriculture and Natural Resources, Razi University, Kermanshah, Iran.

² Cereal Research Center, Razi University, Kermanshah, Iran.

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

ABSTRACT

Introduction: Oats (*Avena sativa* L.), as one of the multi-purpose crops with high nutritional value, are used for both grain production and as fodder. Oat grain yield is strongly affected by biotic and abiotic factors. These factors can lead to a decrease in yield stability and complexity in predicting genetic results. Therefore, identifying superior and stable genotypes across different environments is crucial. This research aims to evaluate the yield and stability of oat genotypes under various climatic conditions to identify and introduce genotypes with high yield and optimal stability.

Materials and methods: In this research, 21 oat genotypes were evaluated using a randomised complete block design with three replications across 16 environments (combination of year and place) under different conditions, including full irrigation, post-anthesis drought stress, and rainfed conditions during the years 2009-2015. Stability analysis was conducted using univariate parametric methods, Lin and Binn's superiority index (Pi), Romer's environmental variance (S^2_i), Francis and Kannenberg's coefficient of variation (CVi), Wricke's ecovalence (W2i), Shukla's stability variance (σ^2_i), Plaisted and Peterson's statistic (B_i), geometric adaptability index (GAI), Pinthus's coefficient of determination (R^2_i), Finlay and Wilkinson's linear regression coefficient (bi), Eberhart and Russell's variance deviation from the linear regression (S^2_{di}), and Perkins and Jinks's regression coefficient (Bi). Non-parametric methods such as Kang's rank-sum method (RSM), Nassar and Huehn's and Huehn's stability statistics, Thennarasu's stability statistics, and Fox's superiority index were also applied. In parametric analyses, 13 environments were selected due to non-homogeneity of error variances, while all 16 environments were included in the non-parametric methods.

Results: Based on parametric indices, genotypes 19, 7, 21, 15, 4, and 6 with the lowest Pi values, and genotypes 1, 6, 20, 14, and 3 with the lowest W2i, σ^2_i , and values were identified as the most stable genotypes. Furthermore, genotypes 2, 11, 5, and 3, with the lowest S^2_i values, and genotypes 5, 2, 6, 3, 12, 13, 9, and 21, with the lowest CVi values, were more stable than the other genotypes. The highest GAI values were observed in genotypes 19, 7, 21, 5, 17, and 4, which were identified as stable genotypes. Genotypes 2 and 15, with the highest R^2_i values and above-average yield, exhibited greater stability. Additionally, genotypes 1, 6, 8, 17, 20, and 21 were recognized as the most stable genotypes due to their bi values being close to one. Genotypes 1, 6, and 20 were noted for having bi value close to one and lower S^2_{di} values. Furthermore, genotypes 6 and 20 exhibited the lowest B_i and S^2_{di} values. Based on the non-parametric RSM statistics, Genotypes 7, 19, and 21 were introduced as the most stable genotypes. Utilising Nassar and Huehn's indices including $S_i^{(1)}$, $S_i^{(2)}$, identified as stable genotypes. respectively enotypes 1, 6, 18, and 20 were also Genotypes 1, 6, and 18, and Genotypes 6 and 15, G6, enotype $GS_i^{(3)}$ and $S_i^{(6)}$, In the evaluation of Thennarasu's statistics including $NP_i^{(1)}$, $NP_i^{(2)}$, $NP_i^{(3)}$ and $NP_i^{(4)}$, Genotypes 1, 6, 18, and 20, Genotypes 1, 2, 11, 14, 18, and 20, Genotypes 1, 2, 8, 9, 11, 14, 18, and 20, and, Genotypes 1, 2, 11, 14, 18, and 20 were respectively introduced as the most stable. Additionally, based on the TOP index, genotypes 4, 7, 15, 19, and 21 were identified as the most stable with favourable yields. According to the MID index, Genotypes 1 and 6 were identified as the most stable with average yields.

Conclusion: Based on the results of the most parametric and non-parametric indices, Genotype 6 (GA Mitchell) was identified as the most suitable and stable genotype, exhibiting a grain yield higher than the mean. Therefore, this genotype can be utilized as a valuable genetic resource in future breeding programs.

Keywords: Genotype $\times$ environment interaction, Grain yield, Oats, Potoroo, Quoll, Stability analysis.

Article Type: Research Article

Article history: Received: 22 Mar 2024, Revised: 12 May 2024, Accepted: 24 May 2024, Published online: 28 Mar 2025

Cite this article: Safavi, S. M., Bahraminejad, S. & Beheshtizadeh, H. (2025). Grain yield stability analysis of oat (*Avena sativa* L.) genotypes using univariate parametric and non-parametric methods. *Cereal Biotechnology and Biochemistry*, 4(1), 66-91. DOI: [10.22126/cbb.2024.11410.1093](https://doi.org/10.22126/cbb.2024.11410.1093)



© The Author(s).

[10.22126/cbb.2024.11410.1093](https://doi.org/10.22126/cbb.2024.11410.1093)

Publisher: Razi University



تجزیه پایداری عملکرد دانه ژنوتیپ‌های یولاف زراعی (*Avena sativa* L.) با استفاده از روش‌های پارامتری تک‌متغیره و ناپارامتری

سید مهدی صفوی^۱، صحبت بهرامی‌نژاد^۲✉ و هژیر بهشتی‌زاده^۱

^۱ گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده علوم و مهندسی کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.

^۲ مرکز تحقیقات غلات، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.

✉ نویسنده مسئول. رایانامه: sohbah72@gmail.com

چکیده

مقدمه: یولاف (*Avena sativa* L.) به‌عنوان یکی از محصولات زراعی چندمنظوره با ارزش تغذیه‌ای بالا، هم برای تولید دانه و هم به‌عنوان علوفه استفاده می‌شود. عملکرد دانه یولاف به شدت تحت تأثیر عوامل زیستی و غیرزیستی قرار دارد. این عوامل می‌توانند به کاهش پایداری عملکرد و پیچیدگی در پیش‌بینی نتایج ژنتیکی منجر شوند. بنابراین، شناسایی ژنوتیپ‌های برتر و پایدار در محیط‌های مختلف از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این پژوهش با هدف ارزیابی عملکرد و پایداری ژنوتیپ‌های یولاف تحت شرایط متنوع اقلیمی انجام شده است تا ژنوتیپ‌هایی با عملکرد بالا و پایداری مطلوب شناسایی و معرفی شوند.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش، ۲۱ ژنوتیپ یولاف زراعی در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در ۱۶ محیط (ترکیب سال-مکان) و تحت شرایط مختلف شامل آبیاری کامل، تنش خشکی بعد از گرده‌افشانی و دیم طی سال‌های ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۴ مورد ارزیابی قرار گرفتند. تجزیه پایداری با استفاده از روش‌های پارامتری تک‌متغیره شامل شاخص برتری لین و بینز (P_i)، واریانس محیطی رومر (S^2_i)، ضریب تغییرات فرانسویس و کانبرگ (CV_i)، اکوالانس ریک (W^2_i)، واریانس پایداری شوکلا (σ^2_i)، آماره پلستید و پیترسون (P_i)، شاخص سازگاری هندسی (GAI)، ضریب تبیین پنتوس (R^2_i)، ضریب رگرسیون خطی فیلی و ویلکینسون (b_i)، واریانس انحراف از خط رگرسیون ابرهات و راسل (S^2_{di}) و ضریب رگرسیون پرکینز و جینکز (β_i) انجام شد. همچنین، از روش‌های ناپارامتری مانند مجموع رتبه کانگ (RSM)، آماره‌های پایداری هان و نصار و هان، آماره‌های پایداری تنارزو و شاخص برتری فاکس استفاده شد. در تجزیه‌های پارامتری، ۱۳ محیط به‌دلیل عدم یکنواختی واریانس خطاها انتخاب شدند، اما در روش‌های ناپارامتری ۱۶ محیط ارزیابی شدند.

یافته‌ها: بر اساس شاخص‌های پارامتری، ژنوتیپ‌های ۱۹، ۷، ۲۱، ۱۵، ۴ و ۶ کم‌ترین مقادیر P_i و ژنوتیپ‌های ۱، ۶، ۲۰، ۱۴ و ۳ با کم‌ترین مقادیر W^2_i ، σ^2_i و b_i به‌عنوان پایدارترین ژنوتیپ‌ها شناسایی شدند. همچنین، ژنوتیپ‌های ۲، ۱۱، ۵ و ۳ با کم‌ترین S^2_i و ژنوتیپ‌های ۵، ۲، ۳، ۱۲، ۱۳، ۹ و ۲۱ با کم‌ترین CV_i پایدارتر از سایر ژنوتیپ‌های بودند. بیش‌ترین مقدار GAI در ژنوتیپ‌های ۱۹، ۷، ۲۱، ۵، ۱۷ و ۴ مشاهده شد که به‌عنوان ژنوتیپ‌های پایدار معرفی شدند. ژنوتیپ‌های ۲ و ۱۵ بالاترین مقادیر R^2_i و عملکرد بالاتر از میانگین، از پایداری بیش‌تری برخوردار بودند. همچنین، ژنوتیپ‌های ۱، ۶، ۸، ۱۷، ۲۰ و ۲۱ به دلیل داشتن b_i نزدیک به یک، ژنوتیپ‌های ۱، ۶ و ۲۰ به دلیل b_i نزدیک به یک و S^2_{di} کم‌تر و ژنوتیپ‌های ۶ و ۲۰ با حداقل β_i و کم‌ترین S^2_{di} به‌عنوان پایدارترین ژنوتیپ‌ها شناخته شدند. بر اساس آماره‌های ناپارامتری RSM ، ژنوتیپ‌های ۷، ۱۹ و ۲۱ به‌عنوان پایدارترین ژنوتیپ‌ها معرفی شدند. با استفاده از شاخص‌های نصار و هان $S_i^{(4)}$ ، ژنوتیپ ۶، $S_i^{(2)}$ ، ژنوتیپ‌های ۶ و ۱۵، $S_i^{(3)}$ ، ژنوتیپ‌های ۱، ۶ و ۱۸ و $S_i^{(6)}$ ، ژنوتیپ‌های ۱، ۶، ۱۸ و ۲۰ به‌عنوان ژنوتیپ‌های پایدار انتخاب شدند. در ارزیابی آماره‌های تنارزو $NP_i^{(1)}$ ، ژنوتیپ‌های ۱، ۶، ۱۸ و ۲۰، $NP_i^{(2)}$ ، ژنوتیپ‌های ۱، ۲، ۱۱، ۱۴، ۱۸ و ۲۰، $NP_i^{(3)}$ ، ژنوتیپ‌های ۱، ۲، ۸، ۹، ۱۱، ۱۴، ۱۸ و ۲۰ و $NP_i^{(4)}$ ، ژنوتیپ‌های ۱، ۲، ۱۱، ۱۴، ۱۸ و ۲۰ به‌عنوان پایدارترین ژنوتیپ‌ها معرفی شدند. همچنین، بر اساس شاخص TOP ، ژنوتیپ‌های ۴، ۷، ۱۵، ۱۹ و ۲۱ به‌عنوان پایدارترین ژنوتیپ‌ها با عملکرد مطلوب و بر اساس شاخص MID ، ژنوتیپ‌های ۱ و ۶ به‌عنوان پایدارترین ژنوتیپ‌ها با عملکرد متوسط شناسایی شدند.

نتیجه‌گیری: بر اساس نتایج اکثر شاخص‌های پارامتری و ناپارامتری، ژنوتیپ ۶ ($GA\ Mitchell$) با عملکرد دانه بالاتر از میانگین، به‌عنوان مناسب‌ترین و پایدارترین ژنوتیپ شناسایی شد. بنابراین، این ژنوتیپ می‌تواند به‌عنوان منبع ژنتیکی ارزشمند در برنامه‌های به‌نژادی آینده مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: اثر متقابل ژنوتیپ × محیط، پوتورو، تجزیه پایداری، عملکرد دانه، کوال، یولاف زراعی.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

نوع مقاله دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۰۳ **اصلاح:** ۱۴۰۳/۰۲/۲۳ **پذیرش:** ۱۴۰۳/۰۳/۰۴، **انتشار آنلاین:** ۱۴۰۴/۰۱/۰۸

استناد: صفوی، س. م.، بهرامی‌نژاد، ص. و بهشتی‌زاده، ه. (۱۴۰۴). تجزیه پایداری عملکرد دانه ژنوتیپ‌های یولاف زراعی (*Avena sativa* L.) با استفاده از روش‌های

پارامتری تک‌متغیره و ناپارامتری. *بیوتکنولوژی و بیوشیمی غلات*، ۴(۱)، ۶۶-۹۱. DOI: [10.22126/cbb.2024.11410.1093](https://doi.org/10.22126/cbb.2024.11410.1093)



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه رازی

مقدمه

پایدار ایفا می‌کند (Kebede *et al.*, 2023a). با این حال، برای بهره‌برداری کامل از ظرفیت‌های یولاف در تأمین امنیت غذایی، ارزیابی پایداری عملکرد دانه ژنوتیپ‌های مختلف آن در شرایط متنوع محیطی ضروری است. برنامه‌های به‌نژادی یولاف بر توسعه واریته‌های پرمحصول و پایدار تمرکز دارند، اما اثرات متقابل ژنوتیپ در محیط (GEI)، چالش‌های مهمی را در این مسیر ایجاد می‌کند (Devi *et al.*, 2023). بنابراین، شناسایی ژنوتیپ‌های پایدار که عملکرد مناسبی در شرایط مختلف محیطی داشته باشند، علاوه بر بهبود بهره‌وری، به توسعه پایدار این محصول ارزشمند و تأمین امنیت غذایی کمک شایانی می‌کند. پژوهشگران روش‌های آماری متعددی برای تجزیه و تحلیل داده‌های حاصل از آزمایش‌های ناحیه‌ای، بررسی اثر متقابل ژنوتیپ × محیط و شناسایی ژنوتیپ‌های پایدار ارائه کرده‌اند. این روش‌ها به‌طور کلی در دو دسته پارامتری و ناپارامتری قرار می‌گیرند. روش‌های پارامتری شامل روش‌های آماری تک‌متغیره و چندمتغیره هستند که روش‌های مبتنی بر تجزیه واریانس و رگرسیون در گروه تک‌متغیره طبقه‌بندی می‌شوند. از جمله این روش‌ها می‌توان به شاخص برتری لین و بینز (Lin & Binns, 1988)، واریانس محیطی رومر (Romer, 1917)، ضریب تغییرات فرانسیس و کاننبرگ (Francis & Kannenberg, 1978)، اکوالانس ریک (Wricke, 1962)، واریانس پایداری شوکلا (Shukla, 1972)، آماره پلستید و پیترسون (Plaisted & Peterson, 1959)، شاخص سازگاری هندسی، ضریب تبیین پنتوس

یولاف (*Avena sativa* L.) به‌عنوان یکی از مهم‌ترین غلات زراعی در سطح جهانی، نقش حیاتی در تأمین نیازهای تغذیه‌ای و اقتصادی دارد. این محصول چندمنظوره، به‌عنوان علوفه و دانه مورد استفاده قرار می‌گیرد و در رتبه ششم از نظر سطح کشت جهانی، پس از گندم، برنج، ذرت، جو و سورگوم، قرار دارد (Mao *et al.*, 2022). در سال ۲۰۲۲، تولید جهانی یولاف به ۲۶ میلیون تن رسید (FAOSTAT, 2022). با این حال، از مجموع یولاف‌های برداشت‌شده، تنها ۱۴ درصد در صنعت غذایی به کار می‌رود (Dhakal *et al.*, 2024). دانه‌های یولاف منبعی عالی از پروتئین، قند، فیبر، مواد مغذی و مواد معدنی است. همچنین، علوفه سبز یولاف با حدود ۱۰ تا ۱۲ درصد پروتئین و ۳۰ تا ۳۵ درصد ماده خشک، به منبعی غنی برای تغذیه حیوانات تبدیل شده است (Kebede *et al.*, 2023a). علاوه بر این، یولاف به‌دلیل دارا بودن فیبرهای غذایی، پروتئین، مواد معدنی و ترکیبات بیواکتیو مانند بتا-گلوکان، می‌تواند خطر ابتلا به بیماری‌های قلبی، دیابت و چاقی را کاهش دهد (Grundy *et al.*, 2017; Dhakal *et al.*, 2024). با توجه به افزایش تقاضا برای محصولات غذایی سالم و بدون گلوتن، یولاف به‌عنوان منبعی منحصربه‌فرد در تولید نان، نوشیدنی‌ها و سایر محصولات غذایی جایگاه ویژه‌ای دارد (Dhakal *et al.*, 2024). این محصول به‌دلیل ویژگی‌های تغذیه‌ای غنی و سازگاری با شرایط متنوع آب و هوایی، نقش مهمی در تأمین امنیت غذایی و توسعه

در مورد برتری قدرت ارزیابی پایداری روش‌های پارامتری نسبت به روش‌های ناپارامتری، هیچ ابهامی وجود ندارد، اما گزارش‌های متعددی نیز در خصوص مزایای استفاده از روش‌های ناپارامتری ارائه شده است (Huhn & Leon, 2022; Saremirad & Taleghani, 1995). از جمله این روش‌ها می‌توان به مجموع رتبه کانگ (RSM) (Kang, 1991)، آماره‌های پایداری هان (Huehn, 1990)، نصار و هان (Nassar & Huehn, 1987)، تنارازو (Thennarasu, 1995) و شاخص برتری فاکس (Fox *et al.*, 1990) اشاره کرد. در روش‌های ناپارامتری، نیازی به صدق فرضیه‌های نرمال بودن، استقلال داده‌های آزمایشی یا تجانس واریانس خطا در آزمایش‌های مختلف نیست. علاوه بر این، تجزیه و تحلیل و تفسیر نتایج این روش‌ها ساده‌تر است. این روش‌ها اطلاعات ارزشمندی در مورد تغییرپذیری فنوتیپی و اثر متقابل ژنوتیپ × محیط را در اختیار به‌نژادگران قرار می‌دهند و در بسیاری از مطالعات به‌نژادی به‌عنوان گزینه‌ای مناسب مورد استفاده قرار می‌گیرند (Huhn & Leon, 1995; Moghaddaszadeh *et al.*, 2019; Abyar *et al.*, 2021). با این حال، یکی از محدودیت‌های اصلی این روش‌ها، عدم توانایی در نشان دادن اختلاف نسبی عملکرد ژنوتیپ‌ها است (Abyar *et al.*, 2021). آبیار و همکاران (Abyar *et al.*, 2021) نیز از روش‌های ناپارامتری شامل آماره‌های هان، مجموع رتبه کانگ و آماره‌های تنارازو و شاخص فاکس برای شناسایی ژنوتیپ‌های پایدار گندم استفاده کردند.

(Pinthus, 1973)، روش رگرسیون فیملی و ویلکینسون (Finlay & Wilkinson, 1963)، روش رگرسیون ابرهارت و راسل (Eberhart & Russell, 1966) و ضریب رگرسیون پرکینز و جینکز (Perkins & Jinks, 1968) اشاره کرد. این روش‌ها به‌طور گسترده‌ای در ارزیابی پایداری بسیاری از محصولات زراعی مانند یولاف (Sanadya *et al.*, 2024)، گندم (Kiliç, 2012) و چغندر (Saremirad & Taleghani 2022) به‌کار گرفته شده‌اند. کبد و همکاران (Kebede *et al.*, 2023c) با ارزیابی ۲۴ ژنوتیپ یولاف نشان دادند که محیط، ژنوتیپ و اثر متقابل آن‌ها به‌ترتیب ۶۷/۴۵، ۲۲/۷۳ و ۹/۸۲ درصد از تنوع عملکرد ماده خشک علوفه را توجیه می‌کنند. همچنین، تجزیه پایداری نشان داد ژنوتیپ‌های با عملکرد بالای علوفه، بر اساس شاخص‌هایی مانند شاخص برتری ژنوتیپی (P_i)، ضریب تبیین و ضریب تغییرات پایداری عملکرد خوبی داشتند. در نهایت، پنج ژنوتیپ پایدار به‌عنوان ژنوتیپ‌های مطلوب برای برنامه‌های بهبود تولید علوفه در اتیوپی پیشنهاد شدند (Kebede *et al.*, 2023c). در مطالعه دوی و همکاران (Devi *et al.*, 2023)، تعداد ۱۲۱ ژنوتیپ یولاف تحت شرایط متنوع اقلیمی در شمال غربی هیمالیا به‌منظور ارزیابی پایداری عملکرد دانه با استفاده از مدل رگرسیونی ابرهارت و راسل بررسی شدند و ژنوتیپ‌های JPO-24 و Oat-79 به‌عنوان پایدارترین و بهترین ژنوتیپ‌ها از نظر عملکرد دانه شناسایی شدند.

مواد و روش‌ها

ژنوتیپ‌های مورد بررسی: در این پژوهش، ۲۱ ژنوتیپ یولاف زراعی (جدول ۱)، متعلق به بانک بذر استرالیای جنوبی (SARDI) که در بانک بذر پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه رازی نگهداری می‌شد مورد ارزیابی قرار گرفتند.

خصوصیات طرح آزمایشی و عملیات زراعی: این پژوهش با استفاده از داده‌های حاصل از آزمایش‌های انجام شده در چهار منطقه (کرمانشاه، اسلام آباد غرب، سرپل‌ذهاب و ایلام) و ۱۶ محیط (ترکیب سال-مکان) طی سال‌های ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۴ انجام شد. مشخصات و اطلاعات هر یک از این محیط‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. آزمایش‌ها در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار و در سه شرایط آبی (بدون تنش)، تنش خشکی بعد از گرده‌افشانی و دیم اجرا شدند. هر کرت آزمایشی شامل پنج ردیف به طول دو متر و فاصله خطوط ۲۰ سانتی‌متر، با تراکم کاشت ۴۰۰ بذر در مترمربع بود. تنش خشکی از زمان بعد از گرده‌افشانی آغاز شد و تا مرحله برداشت ادامه یافت، اما در شرایط آبی تا رسیدن فیزیولوژیک در سه نوبت آبیاری انجام شد. در طول اجرای طرح از هیچ نوع کودی استفاده نشد و کنترل علف‌های هرز به‌صورت دستی انجام گرفت.

پژوهش حاضر با هدف گزینش ژنوتیپ‌های یولاف با عملکرد دانه بالا و پایداری در شرایط متنوع محیطی، با استفاده از روش‌های ناپارامتری و پارامتری تک‌متغیره انجام شد. نوآوری این پژوهش در استفاده از یک رویکرد جامع برای تجزیه پایداری عملکرد ژنوتیپ‌های یولاف است که شامل ترکیب روش‌های پارامتری و ناپارامتری می‌شود. این مطالعه با ارزیابی ۲۱ ژنوتیپ یولاف در ۱۶ محیط متنوع، از جمله شرایط نرمال، تنش خشکی بعد از گرده‌افشانی و شرایط دیم، به بررسی اثرات متقابل ژنوتیپ و محیط می‌پردازد. برخلاف بسیاری از مطالعات قبلی که به‌طور اختصاصی بر یکی از این روش‌ها تمرکز کرده‌اند، این پژوهش به‌طور منحصربه‌فرد هر دو رویکرد را به‌کار می‌گیرد تا درک عمیق‌تری از پایداری و عملکرد ژنوتیپ‌ها ارائه دهد. این رویکرد به شناسایی دقیق‌تر ژنوتیپ‌های پایدار کمک کرده و می‌تواند به بهینه‌سازی انتخاب در برنامه‌های به‌نژادی یولاف، به‌ویژه در مواجهه با چالش‌های اقلیمی، منجر شود. ارزیابی ژنوتیپ‌ها در مناطق مختلف ایران همچنین به درک جهانی از عملکرد یولاف تحت شرایط محیطی متنوع می‌افزاید. نتایج این تحقیق می‌تواند به انتخاب ژنوتیپ‌های مناسب برای کشاورزان و تولیدکنندگان منجر شود و در نهایت به ارتقای امنیت غذایی و اقتصادی در بخش کشاورزی یولاف کمک کند.

جدول ۱- شماره، نام و منشأ ژنوتیپ‌های مورد مطالعه یولاف در ۱۳ محیط طی سال‌های زراعی ۱۳۸۸-۱۳۹۴.

Table 1- Name, and origin of the studied oat genotypes across 13 environments during the cropping years (2009-2015).

Genotype No. شماره ژنوتیپ	Genotype name نام ژنوتیپ	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
12	4Zop95	Canada
13	Swan	Australia
14	Kalott	Sweden
15	Tarahumara	Mexico
16	C-1/130	USA
17	UFRGS948886	Brazil
18	Nasta	Finland
19	Brusher	Australia
20	Arnold	Germany
21	Quoll	Australia

اندازه‌گیری صفت عملکرد دانه: با توجه به این‌که

تأکید اصلی در برنامه‌های اصلاحی یولاف زراعی بر انتخاب ارقام پرمحصول با عملکرد پایدار است، صفت عملکرد دانه اندازه‌گیری شد. برای این منظور، دو ردیف کاشت از هر کرت برداشت شد و پس از کوبیدن، وزن کل بذرها به‌عنوان عملکرد دانه محاسبه شد و به واحد کیلوگرم در هکتار تبدیل گردید.

تجزیه و تحلیل داده‌های فنوتیپی: پس از مرتب‌سازی

داده‌ها، تجزیه‌های آماری با استفاده از روش‌های مختلف

انجام شد. این روش‌ها شامل بررسی توزیع نرمال داده‌ها با آزمون کلموگروف-اسمیرنوف (Kolmogrov-Smirnov, Proc Univariate)، تجزیه واریانس ساده، آزمون بارتلت برای ارزیابی همگنی یا یکنواختی واریانس خطاهای آزمایشی و تجزیه واریانس مرکب در ۱۳ محیط با فرض ثابت بودن اثر ژنوتیپ و تصادفی بودن اثر محیط بود. تجزیه‌ها با استفاده از نرم‌افزارهای SPSS نسخه ۲۴ و

SAS نسخه ۹/۱ انجام شدند.

جدول ۲- انواع آزمایش‌های انجام شده در مکان‌ها، محیط‌ها و سال‌های زراعی مختلف در تجزیه پایداری ژنوتیپ‌های مختلف یولاف.

Table 2- Types of experiments conducted across different locations, environments, and cropping years in the stability analysis of different oat genotypes.

Code of the environment	Location of the experiment	Cropping Year	Environment
E1	Kermanshah کرمانشاه	2009-2010	Rainfed دیم
E2	Kermanshah کرمانشاه	2009-2010	Post-anthesis drought stress تنش خشکی بعد از گرده‌افشانی
E3	Kermanshah کرمانشاه	2009-2010	Irrigated (Normal) آبی
E4	Eslamabad-e Gharb اسلام‌آباد غرب	2012-2013	Irrigated (Normal) آبی
E5	Sarpol-e Zahab سرپل ذهاب	2011-2012	Irrigated (Normal) آبی
E6	Sarpol-e Zahab سرپل ذهاب	2011-2012	Rainfed دیم
E7	Kermanshah کرمانشاه	2012-2013	Rainfed دیم
E8	Kermanshah کرمانشاه	2013-2014	Post-anthesis drought stress تنش خشکی بعد از گرده‌افشانی
E9	Kermanshah کرمانشاه	2013-2014	Rainfed دیم
E10	Ilam ایلام	2014-2015	Irrigated (Normal) آبی
E11	Kermanshah کرمانشاه	2014-2015	Rainfed دیم
E12	Kermanshah کرمانشاه	2014-2015	Post-anthesis drought stress تنش خشکی بعد از گرده‌افشانی
E13	Kermanshah کرمانشاه	2014-2015	Irrigated (Normal) آبی
E14	Kermanshah کرمانشاه	2012-2013	Irrigated (Normal) آبی
E15	Ilam ایلام	2014-2015	Rainfed دیم
E16	Eslamabad-e Gharb اسلام‌آباد غرب	2012-2013	Rainfed دیم

همچنین، روش‌های ناپارامتری مانند مجموع رتبه کانگ (RSM)، آماره‌های پایداری هان، نصار و هان، آماره‌های پایداری تنارازو و شاخص برتری فاکس مورد استفاده قرار گرفت. برای تجزیه پایداری با استفاده از روش‌های پارامتری، سه محیط E14، E15 و E16 به دلیل عدم یکنواختی واریانس خطاها حذف و ۱۳ محیط انتخاب شدند. با این حال، در روش‌های ناپارامتری هر ۱۶ محیط ارزیابی شدند. برای تجزیه پایداری، از نرم‌افزارهای SAS، Genostat نسخه ۱۵ و برنامه Excel استفاده شد.

نتایج و بحث

تجزیه پایداری: به منظور ارزیابی پایداری ژنوتیپ‌های یولاف بر اساس عملکرد دانه، از روش‌های پارامتری و ناپارامتری مختلفی استفاده شد. در روش‌های پارامتری تک‌متغیره، شاخص برتری لین و بینز (P_i)، واریانس محیطی رومر (S^2_i)، ضریب تغییرات فرانسویس و کانبرگ (CV_i)، اکوالانس ریک (W^2_i)، واریانس پایداری شوکلا (σ^2_i)، آماره پلستید و پیترسون (θ_i)، شاخص سازگاری هندسی (GAI)، ضریب تبیین پنتوس (R^2_i)، ضریب رگرسیون خطی فیملی و ویلکینسون (b_i)، واریانس انحراف از خط رگرسیون ابره‌ه‌ارت و راسل (S^2_{di}) و ضریب رگرسیون پرکینز و جینکز (β_i) به کار گرفته شد.

ابتدا تجزیه واریانس ساده برای هر محیط به‌طور جداگانه انجام شد و سپس آزمون بارتلت برای بررسی همگنی واریانس‌های خطا صورت گرفت (داده‌ها نمایش داده نشده است). با توجه به انجام آزمایش‌ها در مکان‌ها و سال‌های مختلف، داده‌های تمامی مناطق و سال‌ها در قالب محیط ادغام شده و تجزیه مرکب داده‌ها بر اساس ۱۳ محیط انجام شد. پس از اجرای آزمون بارتلت روی داده‌های این ۱۳ محیط، فرض همگنی واریانس خطا تأیید شد. همچنین، براساس آزمون کولموگروف-اسمیرنوف، توزیع داده‌ها نرمال بود. نتایج جدول تجزیه مرکب (جدول ۳) نشان داد که اثرات اصلی محیط (E)، ژنوتیپ (G) و همچنین اثر متقابل ژنوتیپ × محیط (GEI) در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بودند. بنابراین، شرط انجام تجزیه پایداری و بررسی اثر متقابل ژنوتیپ × محیط برای معرفی ژنوتیپ‌های پایدار یولاف برقرار بود (Kebede *et al.*, 2023a). معنی‌دار بودن اثر محیط نشان‌دهنده اختلاف بین محیط‌های مورد مطالعه بود. اهمیت اثر محیطی نشان می‌دهد که شرایط محیطی مانند نوع خاک، آب و هوا و دیگر عوامل محیطی تأثیر قابل توجهی بر عملکرد ژنوتیپ‌ها دارند (Masoudi *et al.*, 2020). همچنین، اثر معنی‌دار ژنوتیپ نشان می‌دهد که انتخاب ژنوتیپ‌های مناسب می‌تواند به بهبود عملکرد گیاه کمک کند. به‌علاوه، معنی‌دار بودن اثر متقابل ژنوتیپ × محیط نشان‌دهنده پاسخ متفاوت ژنوتیپ‌ها به تغییرات محیطی بود و این امر انتخاب ژنوتیپ‌های برتر را پیچیده می‌کند.

(Mohammadi *et al.*, 2017). در این پژوهش، اثر محیط، اثر ژنوتیپ و اثر متقابل ژنوتیپ × محیط به‌ترتیب ۵۳/۳۷، ۱۴/۱۸ و ۱۴/۷۰ (جدول آورده نشده است) درصد از تغییرات کل عملکرد را به خود اختصاص دادند. بزرگی اثر محیط نشان‌دهنده تأثیر قابل توجه آن در ایجاد تفاوت‌های عملکرد دانه‌های ژنوتیپ‌های یولاف است. تحقیقات اخیر نیز این یافته‌ها را تأیید کردند و بر اهمیت اثر محیط، اثر ژنوتیپ و اثر متقابل ژنوتیپ × محیط در آزمایش‌های پایداری یولاف تأکید دارند. در یک مطالعه، ۴۴/۶ درصد از تغییرات کل عملکرد یولاف به اثرات محیط نسبت داده شد، در حالی که ۲۶/۵ درصد به اثر متقابل ژنوتیپ × محیط و تنها ۲۸/۸ درصد به ژنوتیپ اختصاص یافت (Kebede *et al.*, 2023a). این یافته‌ها بر نقش کلیدی محیط در تعیین نتایج عملکرد تأکید می‌کند. علاوه بر این، مطالعه دیگری نشان داد که ژنوتیپ‌های یولاف در محیط‌های مختلف سازگاری‌های متنوعی از خود نشان می‌دهند، به‌طوری که برخی ژنوتیپ‌ها در شرایط خاص از پایداری و عملکرد بهتری برخوردارند (Sanadya *et al.*, 2024). مهدوی و همکاران (Mahdavi *et al.*, 2020) در پژوهش خود روی ژنوتیپ‌های گندم نیز تأیید کردند که بخش عمده‌ای از تنوع عملکرد به اثرات محیط مربوط است و پس از آن، اثر متقابل ژنوتیپ × محیط نقش مهمی دارد.

جدول ۳- تجزیه واریانس مرکب برای عملکرد دانه ۲۱ ژنوتیپ یولاف در ۱۳ محیط طی سال‌های زراعی ۱۳۹۴-۱۳۸۸.

Table 3- Combined analysis of variance for grain yield of 21 oat genotypes across 13 environments during the 2009-2015 cropping years.

Mean squares میانگین مربعات		
Grain yield عملکرد دانه	df درجه آزادی	SOV منابع تغییر
155134234**	12	Environment (E) محیط
4249846	26	Error 1: R/E خطای ۱: تکرار/محیط
24732337**	20	Genotype (G) ژنوتیپ
2136835**	240	(G × E) ژنوتیپ × محیط
978182	520	Error 2 خطای ۲
4264363	818	Total کل

** : بسیار معنی‌دار ($\alpha=1\%$).

** : Highly significant ($\alpha=1\%$).

است. میانگین عملکرد دانه ژنوتیپ‌ها در همه محیط‌ها ۴۳۶۴ کیلوگرم در هکتار برآورد شد. ژنوتیپ‌های ۱۹، ۷، ۲۱، ۱۵ و ۴ به ترتیب بیش‌ترین عملکرد دانه را داشتند و ژنوتیپ‌های ۱۷، ۶ و ۵ در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. پایین‌ترین میزان عملکرد دانه نیز به ژنوتیپ‌های ۱۱، ۱۴، ۱۸ و ۲۰ تعلق داشت.

شاخص برتری لین و بینز (P_i): در این شاخص، علاوه بر ارزیابی پایداری، عملکرد بالای ژنوتیپ نیز مورد توجه قرار می‌گیرد. در این روش، مدل خاصی برای تعیین ژنوتیپ پایدار ارائه نمی‌شود؛ بلکه هر ژنوتیپ نسبت به ژنوتیپ برتر در هر محیط سنجیده می‌شود (جدول ۴). مقادیر کمتر این شاخص نشان‌دهنده پایداری بیش‌تر ژنوتیپ است. بر این اساس، ژنوتیپ‌های ۱۹، ۷، ۲۱، ۱۵، ۴ و ۶ به ترتیب کم‌ترین میزان P_i را داشتند و میانگین عملکرد دانه آن‌ها بالاتر از میانگین کل بود. بنابراین به‌عنوان مطلوب‌ترین و پایدارترین ژنوتیپ‌ها شناخته

مطالعات مختلف نشان می‌دهد که تجزیه واریانس به‌تنهایی نمی‌تواند به‌طور مؤثر اثر متقابل ژنوتیپ × محیط را تفسیر کند. بنابراین، برای درک بهتر اثر متقابل ژنوتیپ × محیط، استفاده از تجزیه پایداری با روش‌ها و معیارهای مختلف ضروری است. ارزیابی سازگاری ژنوتیپ و پایداری عملکرد در شرایط متنوع برای شناسایی ژنوتیپ‌هایی که عملکرد قابل قبولی در محیط‌های مختلف دارند و از سازگاری وسیعی برخوردارند، اهمیت زیادی دارد. این ارزیابی شامل تخمین آماره‌های پایداری و انتخاب ژنوتیپ‌های برتر بر اساس عملکرد بالا و نوسان عملکرد کم به‌طور همزمان است.

تجزیه پایداری با استفاده از روش‌های پارامتری

تک‌متغیره

میانگین عملکرد ژنوتیپ‌ها در ۱۳ محیط مورد بررسی و نتایج تجزیه پایداری عملکرد دانه یولاف بر اساس روش‌های پارامتری تک‌متغیره در جدول ۴ ارائه شده

شدند. در مقابل، ژنوتیپ‌های ۱۱، ۱۴، ۱۸، ۲۰، ۲ و ۱۶ با بیشترین میزان P_i به‌عنوان ناپایدارترین ژنوتیپ‌ها معرفی شدند (جدول ۴). این نتایج با پژوهش‌های پیشین هم‌خوانی دارد که بر اهمیت شاخص P_i در ارزیابی پایداری ژنوتیپ‌های یولاف تاکید دارند (Kebede et al., 2023b; Kebede et al., 2023c). این پژوهش‌ها نشان داده‌اند ژنوتیپ‌های یولاف با مقادیر P_i کمتر، در محیط‌های مختلف عملکرد بهتری نشان می‌دهند.

واریانس محیطی رومر (S^2_i): ژنوتیپ‌های ۲، ۱۱، ۵ و ۳ به‌ترتیب کمترین میزان S^2_i داشتند و به همین دلیل نسبت به سایر ژنوتیپ‌ها پایدارتر بودند. ژنوتیپ‌های ۱۲، ۱۴، ۱۸، ۱۳، ۹ و ۶ نیز در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. از میان این ژنوتیپ‌ها، ژنوتیپ‌های ۵ و ۳ میانگین عملکرد بالاتری داشتند. بنابراین، بر اساس این شاخص، این دو ژنوتیپ به‌عنوان پایدارترین و با عملکرد بالا انتخاب شدند. همچنین، بیشترین مقدار پارامتر S^2_i مربوط به ژنوتیپ‌های ۱۵، ۱۹، ۷، ۱۰ و ۴ بود که نشان‌دهنده نوسان زیاد عملکرد و پایداری کم این ژنوتیپ‌ها در محیط‌های مورد آزمایش بود (جدول ۴). نتایج این شاخص با یافته‌های مطالعه یولاف که نشان داد ژنوتیپ‌هایی با واریانس محیطی کمتر، عملکرد پایدارتری دارند و حساسیت کمتری نسبت به تغییرات محیطی از خود نشان می‌دهند، هم‌خوانی دارد (Kebede et al., 2023b).

ضریب تغییرات فرانسیس و کانبرگ (CV_i): در این روش، ژنوتیپ‌هایی پایدار شناخته می‌شوند که دارای

کمترین میزان CV_i باشند. بر این اساس، ژنوتیپ‌های ۵، ۲، ۶، ۳، ۱۲، ۱۳، ۹ و ۲۱ به‌ترتیب کمترین مقادیر را به خود اختصاص دادند. با این حال، با توجه به این‌که میانگین عملکرد دانه ژنوتیپ‌های ۳، ۱۲ و ۹ کمتر از میانگین کل بود، ژنوتیپ‌های ۵، ۶، ۱۳ و ۲۱ که عملکرد بالایی داشتند، به‌عنوان پایدارترین ژنوتیپ‌ها با عملکرد مناسب در این روش معرفی شدند. این ژنوتیپ‌ها دارای پایداری بیولوژیکی بالا بودند و عملکرد یکنواختی در محیط‌های مختلف آزمایش نشان دادند. از سوی دیگر، ژنوتیپ‌های ۱۵ و ۱۰ که بیشترین مقدار CV_i را داشتند، به‌عنوان ناپایدارترین ژنوتیپ‌ها شناخته شدند (جدول ۴). پژوهش‌های مشابه روی یولاف نیز نشان داده‌اند که ژنوتیپ‌هایی با مقادیر کمتر CV_i و S^2_i ، عملکرد یکنواخت‌تری در شرایط مختلف محیطی دارند (Kebede et al., 2023b).

اکوالانس ریک (W^2_i) و واریانس پایداری شوکلا (σ^2_i): بر اساس این دو معیار، ژنوتیپی که دارای کمترین مقدار باشد، به‌عنوان ژنوتیپ پایدار شناخته می‌شود. نتایج نشان داد که ژنوتیپ‌های ۱، ۶، ۲۰، ۱۴ و ۳ به‌ترتیب کمترین مقادیر W^2_i و σ^2_i را داشتند و به‌عنوان پایدارترین ژنوتیپ‌ها از نظر این دو شاخص معرفی شدند. به عبارت دیگر، این ژنوتیپ‌ها کمترین واکنش را به تغییرات محیطی نشان دادند. از میان این ژنوتیپ‌ها، میانگین عملکرد دانه ژنوتیپ ۶ (۴۷۵۶ کیلوگرم در هکتار) بیشتر از میانگین کل (۴۳۶۴ کیلوگرم در هکتار) بود. بنابراین، این ژنوتیپ به‌عنوان ژنوتیپ برتر بر اساس این پارامترها

انتخاب شد. همچنین، ژنوتیپ‌های ۱۵، ۱۶ و ۱۹ با بالاترین میزان W_i^2 و σ_i^2 به‌عنوان ناپایدارترین ژنوتیپ‌ها شناخته شدند (جدول ۴). نتایج حاصل از ارزیابی W_i^2 و σ_i^2 نشان داد که این دو روش مشابه یکدیگر هستند و می‌توان از هر یک از این دو معیار به‌صورت جایگزین استفاده کرد. این نتایج با یافته‌های دیگر مطالعات بر روی یولاف (Kebede *et al.*, 2023b; Desheva & Valchinova, 2024) و گیاهان دیگر (Cubukcu *et al.*, 2021; Erdogdu & Esendal, 2021) مطابقت داشت. در واقع، σ_i^2 ترکیبی خطی از W_i^2 است و بنابراین، این دو روش در رتبه‌بندی ژنوتیپ‌ها ارزش یکسانی دارند.

شاخص سازگاری هندسی (GAI): بر اساس میانگین هندسی ژنوتیپ‌ها تعیین می‌شود و ژنوتیپ‌هایی که GAI بالاتری دارند، مطلوب‌تر به شمار می‌آیند. براساس این شاخص، بیشترین مقادیر به‌ترتیب به ژنوتیپ‌های ۱۹، ۷، ۲۱، ۵، ۱۷ و ۴ تعلق داشت که به‌عنوان ژنوتیپ‌های پایدار معرفی شدند. این شاخص نشان می‌دهد که ژنوتیپ‌های با عملکرد بالا نیز پایدار هستند. در مقابل، ژنوتیپ‌های ۱۸، ۱۴، ۲۰ و ۱۱ به‌عنوان ناپایدارترین ژنوتیپ‌ها شناخته شدند (جدول ۴). شاخص GAI به‌ویژه برای شناسایی ژنوتیپ‌هایی که عملکرد بالایی در تمام محیط‌ها دارند، مناسب است و این یافته‌ها با پژوهش‌های پیشین هم‌خوانی دارد. برای مثال، در تحقیقاتی روی گلرنگ (Pourdad, 2011) و گندم دوروم (Mohammadi & Amri, 2008)، نشان داده شد که شاخص GAI همبستگی بالایی با عملکرد دانه دارد و می‌تواند به‌عنوان یک معیار مؤثر برای شناسایی ژنوتیپ‌های پایدار و با عملکرد بالا استفاده شود. همچنین، در تحقیقی روی لوبیا، ژنوتیپ‌های با GAI بالا به‌عنوان ژنوتیپ‌های برتر در محیط‌های مختلف انتخاب شدند (Arya *et al.*, 2022). در پژوهشی روی نیشکر، GAI به‌همراه شاخص P_i

آماره پلستید و پیترسون (θ_i): در این روش ژنوتیپ‌های ۱، ۶، ۲۰، ۱۴ و ۳ به‌عنوان ارقام برتر از نظر پایداری انتخاب شدند زیرا از مقادیر پایین θ_i برخوردار بودند. این به این معناست که این ژنوتیپ‌ها سهم کمتری در اثر متقابل ژنوتیپ $\times$ محیط داشتند. اما به‌دلیل پایین بودن عملکرد ژنوتیپ‌های ۱، ۲۰، ۱۴ و ۳ از میانگین کل، فقط ژنوتیپ ۶ که عملکرد بالاتری از میانگین داشت، به‌عنوان پایدارترین ژنوتیپ معرفی شد. همچنین، ژنوتیپ‌های ۱۵، ۱۶ و ۱۹ با داشتن مقادیر بالای θ_i به‌عنوان ناپایدارترین ژنوتیپ‌ها شناخته شدند (جدول ۴). این نتایج نشان می‌دهد که روش‌های مبتنی بر اثر متقابل ژنوتیپ $\times$ محیط از جمله شاخص‌های θ_i ، W_i^2 و σ_i^2 به خوبی می‌توانند ژنوتیپ‌های پایدار را شناسایی کنند، حتی اگر میانگین عملکرد متفاوت باشد (Pour-Aboughadareh *et al.*, 2019; Desheva &

به‌عنوان شاخص‌هایی شناسایی شدند که بیشترین ارتباط را با عملکرد دانه داشته و برای انتخاب ژنوتیپ‌های پایدار مناسب شناخته شدند (Rea et al., 2020). بنابراین، شاخص GAI یکی از معتبرترین معیارها برای شناسایی ژنوتیپ‌های با عملکرد بالا و پایداری در شرایط محیطی مختلف است. ژنوتیپ‌های با GAI بالا نشان‌دهنده توانایی سازگاری بهتر با شرایط متغیر محیطی هستند و به‌عنوان ژنوتیپ‌های برتر برای برنامه‌های به‌نژادی معرفی می‌شوند. در پژوهش حاضر، علاوه بر استفاده از روش‌های تک‌متغیره مبتنی بر واریانس، از شاخص‌های رگرسیونی نیز برای ارزیابی پایداری ژنوتیپ‌ها و بررسی اثر متقابل ژنوتیپ $\times$ محیط بهره گرفته شد. مدل‌های رگرسیونی با توجه به دارا بودن توانایی در تحلیل دقیق‌تر تغییرات محیطی و تأثیر آن‌ها بر عملکرد ژنوتیپ‌ها، به‌طور گسترده در مطالعات پایداری استفاده می‌شوند. ترکیب این پارامترها با روش‌های مبتنی بر واریانس، امکان شناسایی دقیق‌تر ژنوتیپ‌های پایدار را فراهم می‌کند و به درک بهتری از عملکرد ژنوتیپ‌ها در شرایط مختلف محیطی منجر می‌شود.

ضریب تبیین (تشخیص) پنتوس (R^2_i): این ضریب به‌عنوان معیاری برای برازش مدل رگرسیونی و دقت آن در تجزیه پایداری ژنوتیپ‌ها عمل می‌کند. هرچه مقدار این ضریب بیشتر باشد، اعتبار مدل رگرسیونی بالاتر ارزیابی می‌شود (Pinthus, 1973). نتایج نشان داد که ژنوتیپ‌های ۲ و ۱۵ به‌دلیل داشتن بالاترین مقادیر R^2_i و عملکرد بالاتر از میانگین، از پایداری بیشتری برخوردار

بودند (جدول ۴). مطالعه‌ای روی عدس نشان داد که R^2_i به‌عنوان شاخصی که به‌طور مثبت با دیگر پارامترهای پایداری مانند انحراف از رگرسیون و σ^2_i مرتبط است، در شناسایی ژنوتیپ‌های پایدار موثر است (Karimizadeh et al., 2012). با این حال، باید توجه داشت که R^2_i به‌تنهایی نمی‌تواند شاخصی قطعی برای پایداری ژنوتیپ‌ها باشد و باید در چارچوب سایر مدل‌های رگرسیونی مانند ضریب رگرسیون و انحراف از رگرسیون تفسیر شود.

ضریب رگرسیون خطی فیلی و ویلکینسون (bi):

فیلی و ویلکینسون (Finlay & Wilkinson, 1963) میانگین عملکرد و ضریب رگرسیون ژنوتیپ بر میانگین محیط را به‌عنوان معیارهایی برای ارزیابی پایداری ژنوتیپ‌ها معرفی کردند. بر اساس نتایج جدول ۴، ژنوتیپ‌های ۱، ۶، ۸، ۱۷، ۲۰ و ۲۱ به‌دلیل داشتن ضریب رگرسیون نزدیک به یک، به‌عنوان ژنوتیپ‌های پایدار شناخته شدند. از میان این ژنوتیپ‌ها، ژنوتیپ‌های ۲۱، ۱۷ و ۶ علاوه بر پایداری، عملکرد بالاتری از میانگین کل داشتند و به‌عنوان ژنوتیپ‌های مطلوب برای کشت و به‌نژادی معرفی می‌شوند.

واریانس انحراف از خط رگرسیون ابرهات و راسل

(S^2_{di}): در این پژوهش، از روش ابرهات و راسل (Eberhart & Russell, 1966) برای ارزیابی پایداری ژنوتیپ‌های یولاف استفاده شد. این مدل با بهبود روش فیلی و ویلکینسون، سه پارامتر اصلی شامل میانگین عملکرد، ضریب رگرسیون و S^2_{di} را بررسی می‌کند. بر اساس این مدل، ژنوتیپ‌هایی که ضریب رگرسیون نزدیک

نتایج، ژنوتیپ‌های ۶ و ۲۰ به دلیل داشتن حداقل B_i و کمترین S^2d_i به عنوان پایدارترین شناخته شدند. همچنین، ژنوتیپ ۶ به دلیل داشتن عملکرد بالاتر از میانگین و همچنین برتری نسبت به ژنوتیپ ۲۰، مجدداً به عنوان ژنوتیپ برتر و پایدار انتخاب شد (جدول ۴). مطالعات قبلی نیز تأیید می‌کنند که استفاده از این مدل می‌تواند به طور موثری ژنوتیپ‌های پایدار، برتر و با عملکرد بالا را شناسایی کند (Bajpai & Prabhakaran, 2003).

تجزیه پایداری با استفاده از روش‌های ناپارامتری

آزمون معنی‌داری اثر متقابل ژنوتیپ $\times$ محیط به روش ناپارامتری: برای تعیین معنی‌داری اثر متقابل ژنوتیپ $\times$ محیط برای عملکرد دانه ژنوتیپ‌های یولاف، از روش‌های ناپارامتری بردنکمپ (Bredenkamp, 1974) و دی‌کرون و وان‌درلان (De Kroon & Van der Laan, 1981) استفاده شد (جدول ۵). نتایج نشان داد که فرض صفر مبنی بر عدم وجود اثر متقابل کراس‌اور (دکرون/واندرلان) و عدم وجود اثر متقابل غیرکراس‌اور (بردنکمپ) رد شد. یافته‌های مشابهی توسط محمدی و همکاران (Mohammadi et al., 2007) روی گندم دوروم گزارش شد. روش‌های ناپارامتری به دلیل توانایی در آزمون هر دو نوع اثر متقابل کراس‌اور و غیرکراس‌اور، اطلاعات جامع‌تری نسبت به روش تجزیه واریانس ارائه می‌دهند (Mohammadi et al., 2007).

به یک و S^2d_i کمتری دارند، به عنوان ژنوتیپ‌های پایدار شناسایی می‌شوند. در این پژوهش، ژنوتیپ‌های ۱، ۶ و ۲۰ به دلیل ضریب رگرسیون نزدیک به یک و S^2d_i کمتر به عنوان ژنوتیپ‌های پایدار معرفی شدند. از میان این ژنوتیپ‌ها، ژنوتیپ ۶ علاوه بر پایداری، عملکرد بالاتری نسبت به میانگین کل داشت و به عنوان ژنوتیپ برتر انتخاب شد (جدول ۴). این نتایج با مطالعات مشابه مطابقت دارد. به عنوان مثال، ژنوتیپ‌های ذرت با ضریب رگرسیون نزدیک به یک و S^2d_i کم، به عنوان پایدارترین ژنوتیپ‌ها در محیط‌های مختلف شناسایی می‌شوند (Alwala et al., 2010). همچنین، مطالعات دیگر نشان داد که روش ابرهات و راسل در شناسایی ژنوتیپ‌های پایدار یولاف و با عملکرد بالا موثر است، به ویژه در شرایطی که تنوع محیطی قابل توجه است (Mehraj et al., 2017; Devi et al., 2023).

ضریب رگرسیون پرکینز و جینکز (B_i): پرکینز و جینکز (Perkins & Jinks, 1968) با بهبود مدل ابرهات و راسل، از رگرسیون اثر متقابل ژنوتیپ $\times$ محیط بر شاخص محیطی استفاده کردند. این مدل توانایی ژنوتیپ‌ها در واکنش به تغییرات محیطی را با دقت بیشتری ارزیابی می‌کند و به شناسایی ژنوتیپ‌هایی که پایداری بیشتری در محیط‌های مختلف دارند، کمک می‌کند. در این مدل، هرچه مقدار این آماره برای یک ژنوتیپ کمتر باشد، آن ژنوتیپ پایدارتر است. بر اساس

جدول ۴- آماره‌های پایداری پارامتری تک‌متغیره برای عملکرد دانه ۲۱ ژنوتیپ یولاف در ۱۳ محیط طی سال‌های زراعی ۱۳۹۴-۱۳۸۸.

Table 4- Univariate parametric stability statistics for grain yield of 21 oat genotypes across 13 environments during the 2009-2015 cropping years.

Genotype	Grain yield (kg. ha ⁻¹)	P _i	S ² _i	CV _i	W ² _i	σ ² _i	θ _i	GAI	R ² _i	b _i *	S ² d _i	β _i
1	3914	3734648	3368532	46.89	2250999	169840	454620	3431	28.00	1.14	147459	0.19
2	3760	4792352	1154802	28.58	5772577	494196	608689	3597	68.00	0.63*	170429	-0.31
3	4318	3139243	1980152	32.59	4765547	401443	564632	4115	20.00	0.82	347575	-0.13
4	5003	1491584	4417764	42.01	6192898	532910	627078	4508	41.00	1.29*	333572	0.27
5	4720	2571904	1746525	27.99	7106601	617067	667053	4555	29.00	0.73	456528	-0.22
6	4756	2086046	2394209	32.53	3025732	241197	488515	4466	4.00	0.93	263698	-0.02
7	5719	707479	4925040	38.80	9805094	865612	785112	5242	34.00	1.33*	591484	0.37
8	3912	4020910	3163967	45.46	4945812	418047	572518	3473	2.00	1.05	440345	0.10
9	4293	3132429	2177981	34.38	5834933	499939	611417	4019	12.00	0.84	464660	-0.11
10	4363	2651495	4798963	50.21	8919377	784033	746362	3609	35.00	1.32*	529713	0.36
11	3179	6590011	1467301	38.09	7629686	665245	689938	2938	42.00	0.66*	399000	-0.28
12	4352	3071939	2016584	32.62	6803886	589185	653809	4112	18.00	0.79	504915	-0.16
13	4465	2949832	2166840	32.96	6614587	571749	645527	4237	13.00	0.82	521902	-0.12
14	3197	6285504	2041789	44.69	4676904	393279	560753	2818	17.00	0.83	352435	-0.12
15	5199	1278541	7564272	52.89	21626454	1954421	1302297	4260	61.00	1.67*	760201	0.71
16	3890	4767591	3064888	45.00	18845331	1698265	1180623	3502	6.00	0.80	1609431	-0.15
17	4895	2339411	3500184	38.22	12514489	1115162	903648	4550	0.00	0.99	1137678	-0.04
18	3202	6148165	2140559	45.69	4968490	420135	573510	2789	13.00	0.85	391697	-0.10
19	5865	381302	5634482	40.47	16363223	1469650	1072030	5337	24.00	1.36	1125351	0.41
20	3375	5548960	2696614	48.65	4153233	345046	537843	2908	0.00	0.97	376179	-0.02
21	5268	1197731	3535529	35.69	8131031	711422	711872	4907	1.00	1.08	721861	0.12
Mean	4364											

*نتیجه آزمون t برای فرض $H_0: b_i = 1$ در سطح احتمال ۵٪. P_i: شاخص برتری لین و بینز، S²_i: واریانس محیطی رومر، CV_i: ضریب تغییرات فرانسیس و کانببرگ، W²_i: اکوالانس ریک، σ²_i: واریانس پایداری شوکلا، θ_i: میانگین واریانس‌های پلستید و پیترسون، GAI: شاخص سازگاری هندسی، R²_i: ضریب تبیین پنتوس، b_i: ضریب رگرسیون خطی فینلی و ویلکینسون، S²d_i: واریانس (میانگین مربعات) انحراف از خط رگرسیون ابره‌ارت و راسل و β_i: ضریب رگرسیون پرکینز و جینکر.

*Result of t-test for $H_0: b_i = 1$ hypothesis at the 5% probability level. P_i: Lin and Binn's superiority index, S²_i: Romer's environmental variance, CV_i: Francis and Kannenberg's coefficient of variation, W²_i: Wricke's ecovalence, σ²_i: Shukla's stability variance, θ_i: Plaisted and Peterson's mean variance component, GAI: Geometric adaptability index, R²_i: Pinthus's coefficient of determination, b_i: Finlay and Wilkinson's linear regression coefficient, S²d_i: Eberhart and Russell's variance (mean square) deviation from the linear regression, and β_i: Perkins and Jinks's regression coefficient.

جدول ۵- تجزیه واریانس ناپارامتری برای اثر متقابل ژنوتیپ × محیط ژنوتیپ‌های یولاف در ۱۶ محیط طی سال‌های زراعی ۱۳۹۴-۱۳۸۸.

Table 5- Nonparametric analysis of variance for genotype × environment interaction of oat genotypes across 16 environments during the 2009-2015 cropping years.

منابع تغییر SOV	درجه آزادی DF	Nonparametric methods روش ناپارامتری	
		روش دکرون/واندرلن (اثر متقابل کراس‌اور) De Kroon and Van der Laan method (crossover interaction)	روش بردنکمپ (اثر متقابل غیرکراس‌اور) Bredenkamp method (non- crossover interaction)
		□□	□□
اثر متقابل ژنوتیپ × محیط G × E interaction	300	6045.76**	6536.98**

** : بسیار معنی‌دار ($\alpha=1\%$).

** : Highly significant ($\alpha=1\%$).

نه فقط برای شناسایی ژنوتیپ‌های پایدار کاربرد دارد، بلکه به‌طور قابل اعتمادی ژنوتیپ‌هایی را که دارای عملکرد بالا هستند، انتخاب می‌کند. به‌دلیل ساده بودن محاسبات و توانایی در ارزیابی همزمان پایداری و عملکرد، از سوی محققین و اصلاح‌گران به‌عنوان یکی از بهترین روش‌ها برای انتخاب ژنوتیپ‌های پایدار پیشنهاد شده است (Hameed *et al.*, 2020).

روش ناپارامتری مجموع رتبه کانگ (RSM): برای بررسی پایداری ژنوتیپ‌ها، ابتدا ژنوتیپ‌ها براساس عملکرد دانه رتبه‌بندی شدند؛ به‌طوری که کمترین رتبه به بیشترین عملکرد و بالاترین رتبه به کمترین عملکرد اختصاص یافت. سپس میانگین رتبه و انحراف معیار رتبه برای هر ژنوتیپ محاسبه شد و ژنوتیپ‌هایی که میانگین و انحراف معیار رتبه کمی داشتند، به‌عنوان پایدارترین ژنوتیپ‌ها معرفی شدند. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، ژنوتیپ‌های ۷، ۱۹ و ۲۱ با کمترین میانگین و انحراف معیار رتبه، به‌عنوان پایدارترین ژنوتیپ‌ها انتخاب شدند (جدول ۶). مطالعات پیشین نشان می‌دهد که روش RSM به‌عنوان یکی از بهترین روش‌ها برای شناسایی ژنوتیپ‌های پایدار معرفی شده است. این روش به‌دلیل عدم نیاز به فرضیه‌های پیچیده و استفاده از داده‌های رتبه‌ای، به‌ویژه در شرایط نرمال نبودن داده‌ها، مورد توجه قرار گرفته است (Verma *et al.*, 2018; Amini *et al.*, 2020; Shobeiri *et al.*, 2023). همچنین، این روش

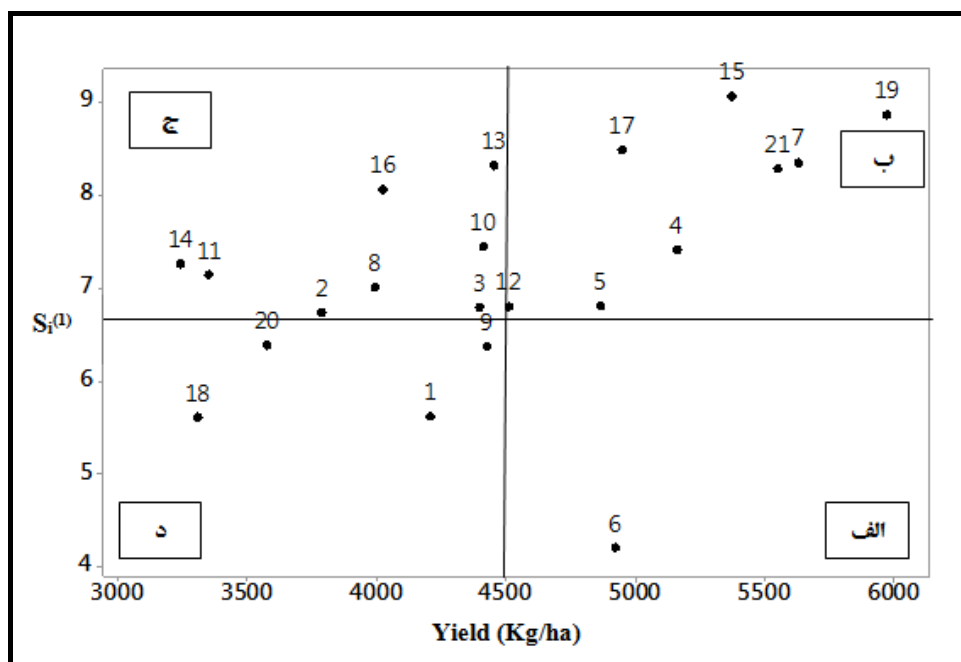
جدول ۶- رتبه‌بندی ژنوتیپ‌های یولاف بر اساس عملکرد دانه در ۱۶ محیط مختلف و میانگین و انحراف معیار رتبه‌های محیط‌ها.

Table 6- Ranking of oat genotypes based on grain yield in 16 different environments the mean and standard deviation of the environments' ranks.

Genotype	Enironment محیط																Mean میانگین رتبه محیط‌ها	Standard انحراف معیار رتبه محیط‌ها
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12	E13	E14	E15	E16	environments' rank	deviation of environments' rank
1	15	11	8	10	12	13	12	12	19	21	18	13	21	4	19	10	13.62	4.85
2	17	20	15	17	16	11	16	18	7	16	10	12	6	20	10	18	14.31	4.40
3	9	14	12	14	7	7	13	17	9	18	7	6	15	17	4	12	11.31	4.39
4	4	4	5	6	3	5	4	6	6	14	9	14	17	5	13	3	7.37	4.54
5	8	13	16	8	8	6	10	9	2	2	1	3	18	8	5	9	7.87	4.85
6	5	7	11	9	11	2	8	8	8	7	11	7	14	6	9	7	8.21	2.80
7	3	3	2	4	1	1	3	10	10	1	5	9	1	13	2	5	4.65	3.84
8	12	10	7	15	18	17	7	19	15	8	13	17	13	11	17	17	13.50	4.00
9	13	8	20	12	10	4	14	14	5	17	8	18	3	15	7	8	11.00	5.15
10	7	6	4	5	14	12	9	16	17	11	20	20	8	14	18	13	12.00	5.22
11	19	21	21	21	16	15	20	11	16	19	16	16	12	14	14	19	17.06	3.25
12	10	9	6	11	15	16	17	13	3	5	6	8	10	7	11	11	9.89	4.01
13	16	12	13	16	6	3	15	7	12	10	2	5	9	18	8	14	10.31	4.89
14	21	18	17	19	21	19	19	15	14	12	15	21	19	21	16	21	18.00	2.87
15	2	2	1	3	5	14	5	4	21	9	19	11	16	3	3	6	7.37	6.59
16	14	16	9	20	13	18	21	1	4	13	14	10	20	10	12	15	13.12	5.54
17	11	15	18	7	4	9	1	5	13	9	4	4	2	19	1	4	7.87	5.85
18	15	17	14	18	20	21	18	20	20	20	17	19	7	16	21	20	17.87	3.48
19	1	1	3	1	2	8	6	3	1	4	12	2	5	2	15	1	4.18	4.19
20	20	19	19	13	17	20	11	21	18	15	21	15	11	9	20	16	16.56	3.88
21	6	5	10	2	9	10	2	2	11	6	3	1	4	1	6	2	5.00	3.44

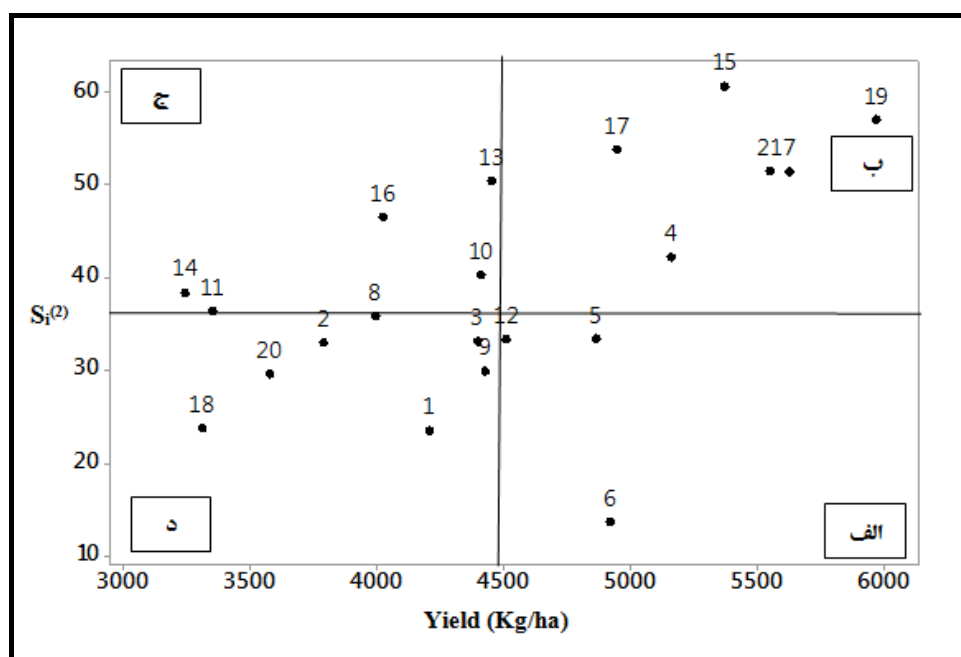
Table 7- Nonparametric stability statistics for grain yield of 21 oat genotypes across 16 environments during the 2009-2015 cropping years.

[illegible]



شکل ۱- نمودار پراکنش ژنوتیپ‌های مختلف یولاف بر اساس میانگین عملکرد دانه و پارامتر پایداری $S_i^{(1)}$.

Figure 1- Scatter plot of different oat genotypes based on the mean grain yield and $S_i^{(1)}$ stability parameter.



شکل ۲- نمودار پراکنش ژنوتیپ‌های مختلف یولاف بر اساس میانگین عملکرد دانه و پارامتر پایداری $S_i^{(2)}$.

Figure 2- Scatter plot of different oat genotypes based on the mean grain yield and $S_i^{(2)}$ stability parameter.

روش ناپارامتری هان و نصار و هان: برای محاسبه این پارامترها (جدول ۷)، به ژنوتیپ‌های با بیشترین عملکرد، کمترین رتبه و به ژنوتیپ‌های با کمترین عملکرد، بزرگترین رتبه اختصاص داده شد. برای تعیین معنی‌داری پارامترهای $S_i^{(1)}$ و $S_i^{(2)}$ از آماره‌های $Z_i^{(1)}$ و $Z_i^{(2)}$ پیشنهاد شده توسط نصار و هان (Nassar & Huehn, 1987) استفاده شد. از آنجایی که مقادیر مجموع $Z_i^{(1)}$ از مقدار χ^2 جدول ($\chi^2_{0.05, df=20}=31.41$) و مقادیر مجموع $Z_i^{(2)}$ از مقدار χ^2 جدول ($\chi^2_{0.05, df=20}=31.41$) بیشتر بودند، اختلاف معنی‌داری بین ژنوتیپ‌ها از نظر پارامترهای پایداری $S_i^{(1)}$ و $S_i^{(2)}$ مشاهده شد. بنابراین، بر اساس این معیارها، بین سطوح پایداری ژنوتیپ‌های یولاف در ۱۶ محیط ارزیابی شده، تفاوت معنی‌داری وجود داشت. برای بررسی انفرادی وضعیت پایداری ژنوتیپ‌ها، آزمون $Z_i^{(1)}$ و $Z_i^{(2)}$ برای هر ژنوتیپ انجام شد. نتایج نشان داد که از نظر پارامتر $S_i^{(1)}$ ، ژنوتیپ ۶ و از نظر پارامتر $S_i^{(2)}$ ، ژنوتیپ‌های ۶ و ۱۵ به‌طور معنی‌داری نسبت به سایر ژنوتیپ‌ها متفاوت بودند زیرا مقادیر Z آن‌ها از مقدار χ^2 جدول ($\chi^2_{0.05, df=1}=3.84$) بیشتر بود. پارامترهای نصار و هان، تغییرات رتبه ژنوتیپ‌ها در محیط‌های مختلف را بررسی می‌کنند. ژنوتیپ‌هایی که رتبه آن‌ها در محیط‌های مختلف کمتر دچار تغییر شود، به‌عنوان ژنوتیپ‌های پایدار شناخته می‌شوند. بر اساس پارامترهای $S_i^{(1)}$ و $S_i^{(2)}$ ، ژنوتیپ‌های ۱، ۶، ۹، ۱۸ و ۲۰ به‌دلیل داشتن مقادیر کمتر این پارامترها، به‌عنوان ژنوتیپ‌های پایدار انتخاب شدند. از میان این ژنوتیپ‌ها،

ژنوتیپ ۶ همچنین عملکرد دانه بالاتری نسبت به میانگین کل داشت.

این نتایج با مطالعات پیشین هم‌خوانی دارد که نشان می‌دهد روش‌های ناپارامتری نصار و هان می‌توانند پایداری ژنوتیپ‌ها را به‌طور موثری در محیط‌های مختلف ارزیابی کنند (Pour-Aboughadareh et al., 2019; Arya et al., 2022; Desheva & Valchinova, 2024). طبق آماره‌های $S_i^{(3)}$ و $S_i^{(6)}$ ارائه شده توسط هان (Huehn, 1990)، ژنوتیپ‌های با کمترین مقادیر این آماره‌ها به‌عنوان پایدار در نظر گرفته می‌شوند. بر اساس $S_i^{(3)}$ ، ژنوتیپ‌های ۱، ۶ و ۱۸ و بر اساس $S_i^{(6)}$ ، ژنوتیپ‌های ۱، ۶، ۱۸ و ۲۰ از پایداری بیشتری نسبت به سایر ژنوتیپ‌ها برخوردار بودند.

نمودار پراکنش ژنوتیپ‌های مختلف یولاف بر اساس میانگین عملکرد دانه و پارامترهای پایداری $S_i^{(1)}$ و $S_i^{(2)}$ به‌ترتیب در شکل‌های ۱ و ۲ نمایش داده شده است. این نمودارها با استفاده از خطوط عمودی و افقی به چهار ناحیه مجزا تقسیم شده‌اند. در شکل ۱، قسمت "الف" شامل ژنوتیپ‌هایی با عملکرد بالاتر از میانگین کل و مقادیر پارامتر پایداری کمتر از متوسط است. در قسمت "ب" ژنوتیپ‌هایی با عملکرد بالاتر از میانگین کل و مقادیر پارامتر پایداری بیشتر از متوسط قرار دارند. قسمت "ج" مربوط به ژنوتیپ‌هایی است که عملکردی کمتر از میانگین کل و مقادیر پارامتر پایداری بزرگ‌تر از متوسط دارند و در قسمت "د" ژنوتیپ‌هایی با عملکرد کمتر از میانگین کل و مقادیر پارامتر پایداری کمتر از متوسط قرار

گرفته‌اند (Kaya & Taner, 2003). بر اساس شکل ۱، ژنوتیپ ۶ در ناحیه "الف" قرار گرفت. این ژنوتیپ از نظر پایداری و عملکرد دانه وضعیت مطلوب‌تری داشته است. در ناحیه "ب"، ژنوتیپ‌های ۴، ۵، ۷، ۱۵، ۱۷، ۱۹ و ۲۱ قرار گرفتند که به‌عنوان ژنوتیپ‌های ناپایدار، یا به عبارتی حساس به شرایط محیطی، اما با متوسط عملکرد بالا در محیط‌های مختلف شناخته شدند. در ناحیه "ج"، ژنوتیپ‌های ۱۳، ۱۶، ۸، ۱۰، ۱۱ و ۱۴ قرار گرفتند و به‌عنوان ژنوتیپ‌های ناپایدار با عملکرد کمتر از متوسط شناسایی شدند. ژنوتیپ‌های ۱، ۹، ۱۸ و ۲۰ نیز به‌عنوان ژنوتیپ‌هایی با پایداری بالا و پتانسیل عملکرد پایین در ناحیه "د" قرار گرفتند. بر اساس شکل ۲، ژنوتیپ‌های ۶، ۵ و ۱۲ در ناحیه‌ای با عملکرد و پایداری بالا قرار گرفتند. ژنوتیپ‌های ۴، ۷، ۱۵، ۱۷، ۱۹ و ۲۱ در ناحیه "ب"، ژنوتیپ‌های ۱۳، ۱۰، ۱۶، ۸، ۱۱ و ۱۴ در ناحیه "ج"، و ژنوتیپ‌های ۱، ۲، ۳، ۸، ۹، ۱۸ و ۲۰ در ناحیه "د" جای گرفتند. به‌طور کلی، بر اساس این نمودارها، ژنوتیپ‌های ۶ به‌عنوان ژنوتیپ‌هایی با عملکرد بالا و پایداری مطلوب شناخته می‌شوند.

روش‌های ناپارامتری تنارازو و شاخص برتری فاکس:

مقادیر معیارهای معرفی شده توسط تنارازو (Thennarasu, 1995) و نتایج روش طبقه‌بندی فاکس و همکاران (Fox et al., 1990) در جدول ۷ ارائه شده است.

بر اساس آماره‌های تنارازو، ژنوتیپ‌هایی که کمترین مقادیر را دارند به‌عنوان ژنوتیپ‌های پایدار در نظر گرفته

می‌شوند. طبق معیار پایداری $NP_i^{(1)}$ ، ژنوتیپ‌های ۱، ۶، ۱۸ و ۲۰ به‌عنوان پایدارترین و ژنوتیپ‌های ۷، ۱۳، ۱۵، ۱۷، ۱۹ و ۲۱ به‌عنوان ناپایدارترین ژنوتیپ‌ها تعیین شدند. بر اساس آماره $NP_i^{(2)}$ ، ژنوتیپ‌های ۱، ۲، ۱۱، ۱۴، ۱۸ و ۲۰ با کمترین مقادیر به‌عنوان پایدارترین و ژنوتیپ‌های ۴، ۷، ۱۵، ۱۹ و ۲۱ با بالاترین مقادیر به‌عنوان ناپایدارترین معرفی شدند. طبق آماره $NP_i^{(3)}$ ، ژنوتیپ‌های ۱، ۲، ۸، ۹، ۱۱، ۱۴، ۱۸ و ۲۰ پایدار و ژنوتیپ‌های ۷، ۱۵، ۱۹ و ۲۱ ناپایدار بودند همچنین، در آماره $NP_i^{(4)}$ ، ژنوتیپ‌های ۱، ۲، ۱۱، ۱۴، ۱۸ و ۲۰ پایدار و ژنوتیپ‌های ۴، ۷، ۱۵، ۱۷، ۱۹ و ۲۱ ناپایدار تشخیص داده شدند. به‌طور کلی، ژنوتیپ‌های ۱، ۱۸ و ۲۰ در هر چهار معیار پایداری به‌عنوان پایدارترین انتخاب شدند، در حالی که ژنوتیپ‌های ۷، ۱۵، ۱۹ و ۲۱ ناپایدارترین بودند. ژنوتیپ ۱ با وجود عملکرد بالاتر نسبت به ژنوتیپ ۱۸، از پایداری کمتری برخوردار بود، که می‌تواند ناشی از تفاوت‌های ژنتیکی و واکنش‌های مختلف به شرایط محیطی باشد. در مقابل، ژنوتیپ ۱۸ که از پایداری بیشتری برخوردار بود، دارای عملکرد دانه کمتر از ژنوتیپ ۱ بود. این یافته‌ها با مطالعات قبلی هم‌خوانی دارد که نشان داده‌اند ژنوتیپ‌های پایدار ممکن است در عملکرد کلی دانه رتبه بالاتری نداشته باشند، اما برای شرایط محیطی ناپایدار گزینه مناسبی هستند (Khazaei et al., 2021).

در پارامترهای معرفی شده توسط فاکس و همکاران (Fox et al., 1990)، معیار بیشینه (TOP) درصد دفعات

به‌نژادی برای حذف یا اصلاح این ژنوتیپ‌ها باشد و به بهبود عملکرد جمعیت‌های زراعی کمک کند.

محققان دیگری نیز از روش‌های ناپارامتری تنارازو و شاخص فاکس برای انتخاب ژنوتیپ‌های پایدار در گیاهان مختلف، از جمله یولاف، استفاده کردند و تأکید کردند که این روش‌ها می‌توانند به‌عنوان جایگزینی مؤثر برای روش‌های پارامتری به کار گرفته شوند (Awoke & Sharma, 2016; Amini *et al.*, 2020; Arya *et al.*, 2022; Saremirad & Taleghani, 2022; Desheva & Valchinova, 2024).

نتیجه‌گیری کلی

نتایج حاصل از تجزیه واریانس به روش‌های پارامتری و ناپارامتری حاکی از وجود اثر متقابل ژنوتیپ × محیط معنی‌دار برای عملکرد دانه یولاف بود. این اثر متقابل نشان‌دهنده اهمیت بالای شرایط محیطی و توانایی ژنوتیپ‌ها در تطبیق با این شرایط برای دستیابی به عملکرد بهینه است. بنابراین، برای شناسایی ژنوتیپ‌های پایدار و با عملکرد بالا، از روش‌های مختلف پارامتری تک‌متغیره و ناپارامتری استفاده شد. نتایج تجزیه و تحلیل آماره‌های تک‌متغیره پایداری نشان داد که ژنوتیپ ۶ به‌دلیل داشتن پایداری و عملکرد دانه بالا، به‌عنوان ژنوتیپ برتر شناسایی شد. در روش‌های ناپارامتری مانند روش مجموع رتبه، ژنوتیپ‌های ۷، ۱۹ و ۲۱ نیز به‌عنوان ژنوتیپ‌های پایدار با عملکرد مطلوب شناسایی شدند. در حالی که روش‌های نصار و هان نیز مجدداً ژنوتیپ ۶ را به‌عنوان پایدارترین ژنوتیپ معرفی کردند. همچنین، پارامترهای تنارازو نشان داد که ژنوتیپ‌های ۱، ۶، ۱۸ و

قرارگیری یک ژنوتیپ در میان ژنوتیپ‌های برتر در محیط‌های مختلف را محاسبه می‌کند. معیارهای متوسط (MID) و کمینه (LOW) نیز به‌ترتیب درصد دفعات قرارگیری ژنوتیپ‌ها در میان ژنوتیپ‌های با عملکرد متوسط و ضعیف را اندازه‌گیری می‌کنند. بر اساس شاخص TOP، ژنوتیپ‌های ۴، ۷، ۱۵، ۱۹ و ۲۱ در اکثر محیط‌ها به‌عنوان ژنوتیپ‌های با عملکرد بالا و پایداری مطلوب شناسایی شدند (جدول ۷). این نتایج به‌ویژه در ارزیابی برنامه‌های به‌نژادی حائز اهمیت است، زیرا این ژنوتیپ‌ها می‌توانند به‌عنوان کاندیداهای مناسب برای تولید در محیط‌های متنوع انتخاب شوند. در مقابل، ژنوتیپ‌های ۱۱، ۱۴ و ۲۰ که هرگز در میان ژنوتیپ‌های با عملکرد بالا قرار نگرفتند، نشان‌دهنده عدم سازگاری این ژنوتیپ‌ها با شرایط محیطی مورد بررسی است. در مطالعات مختلف، به همبستگی بین آماره TOP و عملکرد بالا اشاره شده است. به‌طوری که در بیشتر موارد، ژنوتیپ‌های پایدار بر اساس آماره TOP از نظر میانگین عملکرد نیز بالا بوده‌اند، که با نتایج مطالعه حاضر همسو است (Arya *et al.*, 2022; Saremirad & Taleghani, 2022). طبق شاخص MID، ژنوتیپ‌های ۱ و ۶ به‌عنوان ژنوتیپ‌های پایدار با عملکرد متوسط ساخته شدند که نشان‌دهنده توانایی این ژنوتیپ‌ها در حفظ عملکرد مناسب تحت شرایط متنوع است که در کشاورزی پایدار اهمیت دارد. همچنین، طبق معیار LOW، ژنوتیپ‌های ۲، ۱۱، ۱۴، ۱۸ و ۲۰ به‌عنوان ژنوتیپ‌های پایدار با عملکرد پایین در نظر گرفته شدند (جدول ۷)، که می‌تواند راهگشای برنامه‌های

۲۰ نسبت به سایر ژنوتیپ‌ها از وضعیت بهتری برخوردار بودند. علاوه بر این، با استفاده از شاخص TOP، ژنوتیپ‌های ۴، ۷، ۱۵، ۱۹ و ۲۱ به‌عنوان پایدارترین ژنوتیپ‌ها با عملکرد بالا شناخته شدند، در حالی که طبق شاخص MID، ژنوتیپ‌های ۱ و ۶ به‌عنوان پایدارترین ژنوتیپ‌ها با عملکرد متوسط معرفی گردیدند. در مجموع، ژنوتیپ ۶ (GA Mitchell) با توجه به عملکرد بالاتر از میانگین و پایداری بالاتر در بسیاری از پارامترهای مورد بررسی، به‌عنوان ژنوتیپ برتر شناسایی شد و می‌تواند گزینه‌ای مناسب برای آزمایش‌های به‌زراعی و توسعه ارقام جدید با عملکرد مطلوب و پایداری بالا در شرایط مختلف اقلیمی باشد. به‌منظور پیشبرد برنامه‌های اصلاحی یولاف و افزایش کارایی آن‌ها، پیشنهاد می‌شود که آزمایش‌های مزرعه‌ای گسترده‌تری در مناطق دیگر با شرایط آب و هوایی مختلف انجام شود تا عملکرد و پایداری ژنوتیپ‌های برتر در محیط‌های واقعی به‌طور جامع‌تری ارزیابی گردد. علاوه بر این، انجام مطالعات ژنتیکی پیشرفته، نظیر تجزیه‌های ژنومی و QTL mapping، به‌منظور شناسایی مکان‌های ژنی مرتبط با پایداری و عملکرد برتر می‌تواند به تقویت انتخاب ژنوتیپ‌های مقاوم کمک کند. استفاده از این ژنوتیپ‌های شناسایی‌شده در برنامه‌های اصلاحی آینده، به‌ویژه برای تولید ارقامی با سازگاری بالا و عملکرد مطلوب در شرایط متنوع اقلیمی، بسیار حائز اهمیت است. همچنین، به‌کارگیری فناوری‌های انتخاب به کمک نشانگر (MAS: Marker-Assisted Selection) برای شناسایی و تثبیت صفات مطلوب می‌تواند رویکردی مؤثر برای بهبود مستمر عملکرد و پایداری یولاف در برنامه‌های اصلاحی آینده باشد.

References

- Abyar, S., Navabpour, S., Karimizadeh, R., Nasrollahnejad Ghomi, A. A., Kiani, G., & Gholizadeh, A. 2021. Evaluation of genotype $\times$ environment interaction and grain yield stability of different bread wheat genotypes using non-parametric methods. *Cereal Research*, 11(2), 89-104. <https://doi.org/10.22124/cr.2021.20461.1687>. (In Persian)
- Alwala, S., Kwolek, T., McPherson, M., Pellow, J., & Meyer, D. 2010. A comprehensive comparison between Eberhart and Russell joint regression and GGE biplot analyses to identify stable and high yielding maize hybrids. *Field Crops Research*, 119(2-3), 225-230. <https://doi.org/10.1016/J.FCR.2010.07.010>
- Amini, A., Tabatabaee, M. T., Akbari Moghadam, H., Ravari, S. Z., Amin Azarm, D., & Tajalli, H. 2020. Evaluation of grain yield and its stability in bread wheat genotypes in saline regions of Iran. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 51(4), 191-202. <https://doi.org/10.22059/ijfcs.2020.290344.654649>. (In Persian)
- Arya, R. K., Verma, A., & Vandana. 2022. Biplot analysis of non-parametric measures of stability for long term evaluation of fababean genotypes. *Electronic Journal of Plant Breeding*, 13(2), 350-360. <https://doi.org/10.37992/2022.1302.055>

- Awoke, S., & Sharma, M. K. 2016. Parametric and non-parametric methods to describe genotype by environment interaction and grain yield stability of bread wheat. *Statistics and Applications*, 14(1-2), 9-29.
- Bajpai, P. K., & Prabhakaran, V. T. 2003. Simultaneous testing of genotype $\times$ environment interaction and stability for more than one trait. *Indian Journal of Genetics and Plant Breeding*, 63(1), 11-14.
- Bredenkamp, J. 1974. Nonparametric prüfung von wechselwirkungen. *Psychologische Beiträge*, 16, 398-416.
- Cubukcu, P., Kocatürk, M., Ilker, E., Kadiroğlu, A., Vurarak, Y., Şahin, Y., Karakuş, M., Akgün Yildirim, Ü., Göksoy, A., & Sincik, M. 2021. Stability analysis of some soybean genotypes using parametric and non-parametric methods in multienvironments. *Turkish Journal of Field Crops*, 26(2), 262–271. <https://doi.org/10.17557/tjfc.1033363>
- De Kroon, J., & Van der Laan, P. 1981. Distribution-free test procedures in two-way layouts: a concept of rank-interaction. *Statistica Neerlandica*, 35(4), 189-213. <https://doi.org/10.1111/J.1467-9574.1981.TB00730.X>
- Desheva, G., & Valchinova, E. 2024. Evaluation of yield stability and adaptability of oat genotypes (*Avena sativa* L.). *Poljoprivreda*, 30(1), 3-12. <https://doi.org/10.18047/poljo.30.1.1>
- Devi, R., Sood, V. K., & Arora, A. 2023. Stability analysis for seed yield and related traits of oat (*Avena sativa* L.) under varied conditions of North-Western Himalayas. *International Journal of Environment and Climate Change*, 13(11), 2409-2418. <https://doi.org/10.9734/ijecc/2023/v13i113407>
- 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>
- Eberhart, S. A., & Russell, W. A. 1966. Stability parameters for comparing varieties. *Crop Science*, 6(1), 36-40. <https://doi.org/10.2135/cropsci1966.0011183X000600010011x>
- Erdogdu, Y., & Esendal, E. 2021. Multi-environment trial analysis by parametric and non-parametric stability parameters for seed yield in winter rapeseed (*Brassica napus* L.) genotypes. *Turkish Journal of Field Crops*, 26(1), 71–78. <https://doi.org/10.17557/tjfc.943928>
- FAOSTAT, 2022. Food and Agriculture Organization of the United Nations-Statistic Division. <https://www.fao.org/faostat/en/#data:QC>.
- Finlay, K. W., & Wilkinson, G. N. 1963. The analysis of adaptation in a plant breeding programme. *Australian Journal of Agricultural Research*, 14(6), 742-754. <https://doi.org/10.1071/AR9630742>
- Fox, P. N., Skovmand, B., Thompson, B. K., Braun, H. J., & Cormier, R. 1990. Yield and adaptation of hexaploid spring triticale. *Euphytica*, 47, 57-64. <https://doi.org/10.1007/BF00040364>
- Francis, T. R., & Kannenberg, L. W. 1978. Yield stability studies in short-season maize: I. A descriptive method for grouping genotypes. *Canadian Journal of Plant Science*, 58(4), 1029-1034. <https://doi.org/10.4141/cjps78-157>
- Grundy, M. M. L., Quint, J., Rieder, A., Ballance, S., Dreiss, C. A., Cross, K. L., Gray, R., Bajka, B. H., Butterworth, P. J., Ellis, P. R., & Wilde, P. J. 2017. The impact of oat

- structure and β -glucan on in vitro lipid digestion. *Journal of Functional Foods*, 38, 378–388. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2017.09.011>
- Hameed, M., Shah, S. H., & Khan, H. H. 2020. A nonparametric analysis for stability of wheat genotypes tested in Southern Punjab, Pakistan. *European Online Journal of Natural and Social Sciences*, 9(1), 153-163. <https://european-science.com/eojnss/article/view/5922>
- Huehn, M. 1990. Non-parametric measures of phenotypic stability: Part 1. Theory. *Euphytica*, 47, 189-194. <https://doi.org/10.1007/BF00024241>
- Huhn, M., & Leon, J. 1995. Nonparametric analysis of cultivar performance trials: Experimental results and comparison of different procedures based on ranks. *Agronomy Journal*, 87(4), 627-632. <https://doi.org/10.2134/AGRONJ1995.00021962008700040004X>
- Kang, M. S. 1991. Modified rank-sum method for selecting high-yielding, stable crop genotypes. *Cereal Research Communications*, 19(3), 361-364.
- Karimizadeh, R., Mohammadi, M., Shefazadeh, M. K., Mahmoodi, A. A., Rostami, B., & Karimpour, F. 2012. Relationship among and repeatability of ten stability indices for grain yield of food lentil genotypes in Iran. *Turkish Journal of Field Crops*, 17(1), 51-61.
- Kaya, Y., & Taner, S. 2003. Estimating genotypic ranks by nonparametric stability analysis in bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *Central Europe Agriculture Journal*, 4(1), 47-53.
- Kebede, G., Worku, W., Jifar, H., & Feyissa, F. 2023a. GGE biplot analysis of genotype by environment interaction and grain yield stability of oat (*Avena sativa* L.) in Ethiopia. *Agrosystems, Geosciences & Environment*, 6(3), e20410. <https://doi.org/10.1002/agg2.20410>
- Kebede, G., Worku, W., Jifar, H., & Feyissa, F. 2023b. 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>
- Kebede, G., Worku, W., Jifar, H., & Feyissa, F. 2023c. Stability analysis for fodder yield of oat (*Avena sativa* L.) genotypes using univariate statistical models under diverse environmental conditions in Ethiopia. *Ecological Genetics and Genomics*, 29, 100202. <https://doi.org/10.1016/j.egg.2023.100202>
- Khazaei, A., Golzardi, F., Torabi, M., Fyzbakhsh, M. T., Azari Nasrabad, A., Nazari, L., Ghasemi, A., & Motaghi, M. 2021. Evaluation of the yield stability of grain sorghum genotypes using AMMI analysis in different regions of Iran. *Cereal Research*, 11(1), 77-88. <https://doi.org/10.22124/CR.2021.19921.1675>. (In Persian)
- Kiliç, H. 2012. Assessment of parametric and non-parametric methods for selecting stable and adapted spring bread wheat genotypes in multi-environments. *Journal of Animal & Plant Sciences*, 22(2), 390–398.
- Lin, C. S., & Binns, M. R. 1988. A method of analyzing cultivar $\times$ location $\times$ year experiments: A new stability parameter. *Theoretical and Applied Genetics*, 76, 425-430. <https://doi.org/10.1007/bf00265344>
- Mahdavi, A. M., Babaeian Jelodar, N., Farshadfar, E., & Bagheri, N. 2020. Evaluation of stability and adaptation of bread wheat genotypes using univariate statistics parameters and AMMI. *Plant Genetic Researches*, 7(1), 19-32. <http://dx.doi.org/10.52547/pgr.7.1.2>

- Mao, H., Xu, M., Ji, J., Zhou, M., Li, H., Wen, Y., Wang, J., & Sun, B. 2022. The utilization of oat for the production of wholegrain foods: Processing technology and products. *Food Frontiers*, 3(1), 28–45. <https://doi.org/10.1002/fft2.120>
- Masoudi, B., Abbasali, M., Aien, A., & Saif Amiri, S. 2020. Evaluation of sesame yield stability using statistical parameters and GGE biplot graphical methods. *Journal of Crop Production*, 13(3), 71-84. <https://doi.org/10.22069/ejcp.2021.17753.2306>
- Mehraj, U., Abidi, I., Ahmad, M., Zaffar, G., Dar, Z. A., Rather, M. A., & Lone A. A. 2017. Stability analysis for physiological traits, grain yield and its attributing parameters in oats (*Avena sativa* L.) in the Kashmir Valley. *Electronic Journal of Plant Breeding*, 8(1), 59-62. <https://www.ejplantbreeding.org/index.php/EJPB/article/view/1210>
- Moghaddaszadeh, M., Asghari Zakaria, R., Hassanpanah, D., & Zare, N. 2019. Nonparametric stability analysis of tuber yield in potato (*Solanum tuberosum* L.) genotype. *Journal of Crop Breeding*, 10(28), 50-63. <http://dx.doi.org/10.29252/jcb.10.28.50>. (In Persian)
- Mohammadi, R., & Amri, A. 2008. Comparison of parametric and non-parametric methods for selecting stable and adapted durum wheat genotypes in variable environments. *Euphytica*, 159, 419-432. <https://doi.org/10.1007/s10681-007-9600-6>
- Mohammadi, R., Abdulahi, A., Haghparast, R., Aghaee, M., & Rostee, M. 2007. Interpreting genotype $\times$ environment interactions for durum wheat grain yield using nonparametric methods. *Euphytica*, 157, 239-251. doi.org/10.1007/s10681-007-9417-3
- Mohammadi, R., Armion, M., Zadhasan, E., Ahmadi, M. M., & Amri, A. 2017. The use of Ammi model for interpreting genotype $\times$ environment interaction in durum wheat. *Experimental Agriculture*, 54(5), 670–683. <https://doi.org/10.1017/S0014479717000308>
- Nassar, R., & Huehn, M. 1987. Studies on estimation of phenotypic stability: Tests of significance for nonparametric measures of phenotypic stability. *Biometrics*, 43, 45-53. <https://doi.org/10.2307/2531947>
- Perkins, J. M., & Jinks, J. L. 1968. Environmental and genotype-environmental components of variability III. Multiple lines and crosses. *Heredity*, 23, 339–356. <https://doi.org/10.1038/hdy.1968.48>
- Pinthus, M. J. 1973. Estimate of genotypic value: A proposed method. *Euphytica*, 22, 121-123. <https://doi.org/10.1007/BF00021563>
- Plaisted, R. L., & Peterson, L. C. 1959. A technique for evaluating the ability of selections to yield consistently in different locations or seasons. *American Potato Journal*, 36, 381-385. <https://doi.org/10.1007/BF02852735>
- Pour-Aboughadareh, A., Yousefian, M., Moradkhani, H., Poczai, P., & Siddique, K. H. M. 2019. STABILITYSOFT: A new online program to calculate parametric and non-parametric stability statistics for crop traits. *Applications in Plant Sciences*, 7(1), e01211. <https://doi.org/10.1002/aps.3.1211>
- Pourdad, S. S. 2011. Repeatability and relationships among parametric and non-parametric yield stability measures in safflower (*Carthamus tinctorius* L.) genotypes. *Crop Breeding Journal*, 1(2), 109-118. <https://doi.org/10.22092/CBJ.2011.100360>

- Rea, R., Sousa-Vieira, O. D., Briceño, R., Díaz, A., & George, J. 2020. Simultaneous selection indices for yield and stability in sugarcane. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 37(2), 67-77.
- Romer, T. H. 1917. Sind die ertragsreichsten Sorten ertragssicherer. *DGL-Mitt*, 32(1), 87-89.
- Sanadya, S. K., Sood, V. K., Sharma, G., Enyew, M., & Katna, G. 2024. Adaptation of oat genotypes in organic and conventionally managed fields in the northwestern Himalayas. *Agronomy Journal*, 116(2), 433-445. <http://dx.doi.org/10.1002/agj2.21542>
- Saremirad, A., & Taleghani, D. 2022. Utilization of univariate parametric and non-parametric methods in the stability analysis of sugar yield in sugar beet (*Beta vulgaris* L.) hybrids. *Journal of Crop Breeding*, 14(43), 49-63. <http://dx.doi.org/10.52547/jcb.14.43.49>. (In Persian)
- Shobeiri, S. S., Pezeshkpour, P., & Sadeghzadeh Ahari, D. 2023. Non-Parametric Stability Analysis of Yield in Lentil Genotypes. *Crop Production Journal*, 16(3), 49-68. <http://dx.doi.org/10.22069/ejcp.2024.20804.2551> (In Persian)
- Shukla, G. K. 1972. Some statistical aspects of partitioning genotype environmental components of variability. *Heredity*, 29, 237-245. <https://doi.org/10.1038/hdy.1972.87>
- Thennarasu, K. 1995. On certain non-parametric procedures for studying genotype-environment interactions and yield stability. Ph.D. thesis, PJ School, IARI, New Delhi, India.
- Verma, A., Kumar, V., Kharab, A. S., & Singh, G. P. 2018. Comparative performance of parametric and non-parametric measures for analyzing $G \times E$ interactions of grain yield for dual purpose barley genotypes. *Electronic Journal of Plant Breeding*, 9(3), 846-855. <https://doi.org/10.5958/0975-928X.2018.00105.9>
- Wricke, G. 1962. Evaluation method for recording ecological differences in field trials. *Z Pflanzenzucht*, 47, 92-96.