Vol. 7, No. 2, Autumn & Winter, 2026, p. 253-266

Plant Production and Genetics

https://doi.org/10.22034/PLANT.2026.145823.1201

Identification of spring bread wheat genotypes with high yield and desirable stability in Golestan province

Saeed Bagherikia[1], Habiballah Soughi[1], Manoochehr Khodarahmi[*2], Faramarz Sayyedi[1]

1. Horticulture Crops Research Department, Golestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Gorgan, Iran
2. Seed and Plant Improvement Institute (SPII), Agricultural Research, Education and ExtensionOrganization (AREEO), Karaj, Iran

[*]Corresponding Author Email: m.khodarahmi@areeo.ac.ir

Received: 07-05-2026 **revised**: 05-06-2026 **Accepted**: 22-06-2026

Abstract

Introduction: Wheat is one of the most important crops in the world and plays a fundamental role in ensuring national food security. In Iran, it is also considered the main focus of agricultural self-sufficiency policies. Grain yield in wheat is a quantitative trait influenced by genotype, environment, and genotype × environment (G × E) interaction. This interaction makes the selection of high-yielding and stable genotypes difficult for breeders. To evaluate stability, various parametric and non-parametric methods have been developed, each with its own advantages and limitations. In addition, the multivariate GGE biplot method is an efficient tool for simultaneous analysis of genotype performance and stability. The objective of this study was to investigate the genotype × environment interaction and to identify stable spring bread wheat genotypes using parametric and non-parametric approaches. GGE biplot software

Materials and Methods: In this study, 23 spring bread wheat genotypes were evaluated over two cropping years (2019–2020 and 2020–2021) at two agricultural research stations, Gorgan and Gonbad (Golestan Province, Iran), using a randomized complete block design with three replications. Grain yield was measured after uniform agronomic management and harvesting using a plot combine harvester. After testing homogeneity of variances, a combined analysis of variance was performed using SAS software, and due to the significance of genotype × environment interaction, stability analyses were conducted. Parametric and non-parametric stability indices were calculated using STABILITYSOFT software. Graphical analysis of genotype × environment interaction was performed using GGE biplot4 software.

Results: The combined analysis of variance for grain yield showed that the genotype × environment interaction was statistically significant. Stability analysis based on univariate parametric (Eberhart and Russell, Wricke's ecovalence, Shukla's variance, and Plaisted's stability index) and non-parametric statistics (Nassar and Huhn's, Thennarasu's, and Kang's rank-sum methods) indicated that genotype 4 was the most stable across all environments. Genotype 15 was also identified among the top three stable genotypes based on most parametric and non-parametric indices. Multivariate analysis using the GGE biplot model confirmed these findings, indicating that genotypes 4 and 15 were the most stable and best adapted genotypes with high mean yield performance. The ideal genotype biplot also showed that these two genotypes had superior stability and yield performance compared to other genotypes and exhibited high general adaptability across all tested environments. Plaisted's stability index

Conclusion: The results of this study demonstrated that genotype × environment interaction had a substantial effect on wheat grain yield variation, highlighting the necessity of stability evaluation under different environmental conditions. Comparison of parametric and non-parametric stability indices showed that genotype 4 was identified as the most stable genotype across most criteria, while genotype 15 was also ranked among the superior stable genotypes. Multivariate GGE biplot analysis further confirmed the superiority of these two genotypes in terms of both stability and general adaptability. Moreover, genotypes 4 and 15 can be considered valuable resources in wheat breeding programs and promising candidates for the development and release of new high-yielding and stable cultivars.

Keywords: Genotype × environment interaction, Ideal genotype, Nonparametric statistics, Yield stability

Citation: Bagherikia, S., Soughi, H., Khodarahmi, M., & Sayyedi, F. (2026). Identification of spring bread wheat genotypes with high yield and desirable stability in golestan province. *Plant Production and Genetics*, *7*(2), 253-266. https://doi.org/10.22034/plant.2026.145823.1201

Copyrights:
Copyrights rights for this article is retained by the author (s), with publication rights granted to Plant Production and Genetics. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

جلد۷، شماره۲، پاییز و زمستان ۱۴۰۵، صفحات ۲۶۶-۲۵۳

تولید و ژنتیک گیاهی

https://doi.org/10.22034/PLANT.2026.145823.1201

شناسایی ژنوتیپ‌های گندم نان بهاره با عملکرد بالا و پایداری مطلوب در استان گلستان

سعید باقری کیا[۱]، حبیب اله سوقی[۱]، منوچهر خدارحمی*[۲]، فرامرز سیدی[۱]

۱. بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی گلستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، گرگان، ایران

۲. مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران

*ایمیل نویسنده مسئول: m.khodarahmi@areeo.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۱۷ **تاریخ بازنگری:** ۱۴۰۵/۰۳/۱۵ **تاریخ پذیرش:** ۱۴۰۵/۰۴/۰۱

چکیده

مقدمه: گندم به‌عنوان یکی از مهم‌ترین محصولات جهان، نقش اساسی در تأمین امنیت غذایی کشورها دارد و در ایران نیز محور اصلی سیاست‌های خودکفایی کشاورزی محسوب می‌شود. عملکرد دانه گندم یک صفت کمی است که تحت تأثیر ژنوتیپ، محیط و اثر متقابل ژنوتیپ × محیط قرار دارد. این اثر متقابل، انتخاب ژنوتیپ‌های پرمحصول و پایدار را برای به‌نژادگران دشوار می‌سازد. برای ارزیابی پایداری، روش‌های پارامتری و ناپارامتری متعددی توسعه یافته‌اند که هر یک مزایا و محدودیت‌های خاص خود را دارند. همچنین، روش چندمتغیره GGEبای‌پلات ابزاری کارآمد برای تحلیل همزمان عملکرد و پایداری ژنوتیپ‌ها است. این پژوهش با هدف بررسی اثر متقابل ژنوتیپ × محیط و شناسایی ژنوتیپ‌های پایدار گندم بهاره نان با بهره‌گیری از روش‌های پارامتری و ناپارامتری انجام شد.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش، ۲۳ ژنوتیپ گندم نان بهاره طی دو سال زراعی (۱۴۰۰-۱۳۹۹ و ۱۴۰۱-۱۴۰۰) در دو ایستگاه تحقیقات کشاورزی گرگان و گنبد (استان گلستان) در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار ارزیابی شدند. عملکرد دانه پس از اجرای عملیات زراعی یکنواخت و برداشت با کمباین آزمایشی اندازه‌گیری شد. پس از تأیید همگنی واریانس‌ها، تجزیه واریانس مرکب با نرم‌افزار SAS انجام و به‌دلیل معنی‌دار بودن اثر متقابل ژنوتیپ × محیط، تجزیه پایداری صورت گرفت. شاخص‌های پایداری پارامتری و ناپارامتری با استفاده از نرم‌افزار STABILITYSOFT محاسبه شدند. برای انجام تجزیه گرافیکی اثرمتقابل ژنوتیپ × محیط از نرم‌افزار GGE biplot4 استفاده شد.

نتایج: تجزیه واریانس مرکب عملکرد دانه نشان داد که اثرمتقابل ژنوتیپ × محیط از نظر آماری معنی‌دار است. تجزیه پایداری با استفاده از شاخص‌های تک متغیره پارامتری (اِبرهارت و راسل، اکوالانس ریک، واریانس شوکلا، پلاستد) و ناپارامتری (آماره‌های نصار و هان، تناراسو و مجموع رتبه‌های کانگ) بیانگر آن بود که ژنوتیپ ۴ پایدارترین ژنوتیپ در میان تمام محیط‌ها بود. همچنین ژنوتیپ ۱۵ نیز بر اساس اغلب شاخص‌های پارامتری و ناپارامتری در میان سه ژنوتیپ پایدار قرار گرفت. نتایج تحلیل چندمتغیره با استفاده از مدل GGE بای‌پلات نیز این یافته‌ها را تأیید کرد، به‌طوری‌که ژنوتیپ‌های ۴ و ۱۵ به‌عنوان پایدارترین و سازگارترین ژنوتیپ‌ها با متوسط عملکرد بالا شناسایی شدند. نتایج بای‌پلات ژنوتیپ فرضی ایده‌آل نیز نشان داد این دو ژنوتیپ از نظر پایداری و میانگین عملکرد نسبت به سایر ژنوتیپ‌ها برتری داشته و از سازگاری عمومی بالایی در تمامی محیط‌های مورد ارزیابی برخوردار بودند.

نتیجه‌گیری: نتایج این پژوهش نشان داد که اثر متقابل ژنوتیپ × محیط سهم قابل‌توجهی در تغییرات عملکرد دانه گندم داشته و لزوم ارزیابی پایداری ژنوتیپ‌ها را در شرایط محیطی مختلف تأیید می‌کند. مقایسه شاخص‌های پارامتری و ناپارامتری پایداری نشان داد که ژنوتیپ ۴ در اکثر معیارهای مورد استفاده به‌عنوان پایدارترین ژنوتیپ شناخته شد و ژنوتیپ ۱۵ نیز در زمره ژنوتیپ‌های برتر از نظر پایداری قرار گرفت. نتایج تجزیه چندمتغیره GGE بای‌پلات نیز بر برتری این دو ژنوتیپ از نظر پایداری و سازگاری عمومی تأکید کرد. همچنین، ژنوتیپ‌های ۴ و ۱۵ علاوه بر پایداری مطلوب، از عملکرد دانه بالایی برخوردار بودند. بنابراین، این دو ژنوتیپ می‌توانند به‌عنوان منابع ارزشمند در برنامه‌های به‌نژادی گندم و گزینه‌های مناسب برای معرفی ارقام جدید با عملکرد بالا و پایداری مطلوب مورد استفاده قرار گیرند.

کلید واژگان: آمار ناپارامتری، اثرمتقابل ژنوتیپ × محیط ، پایداری عملکرد، ژنوتیپ ایده‌آل

منبع: باقری کیا، س.، سوقی ، ح.، خدارحمی، م.، و سیدی، ف. (۱۴۰۵). شناسایی ژنوتیپ‌های گندم نان بهاره با عملکرد بالا و پایداری مطلوب در استان گلستان، *مجله تولید و ژنتیک گیاهی*، ۷ (۲)، ۲۶۶-۲۵۳. https://doi.org/10.22034/plant.2026.145823.1201

CC BY

مقدمه

گندم یکی از مهم‌ترین محصولات زراعی جهان است که نقش اساسی در تأمین امنیت غذایی دارد. این محصول استراتژیک به‌عنوان منبع اصلی انرژی و تغذیه انسان، جایگاه ویژه‌ای در نظام‌های کشاورزی و اقتصاد کشورها دارد. امروزه گندم یکی از سه محصول راهبردی برتر جهان (در کنار برنج و ذرت) به شمار می‌آید که بخش بزرگی از کالری و پروتئین مورد نیاز جمعیت سیاره را تأمین می‌کند (Poehlman, 2013). هرگونه نوسان در تولید، ذخایر یا قیمت جهانی گندم می‌تواند بر بازارهای جهانی، اقتصاد ملی کشورها و ثبات سیاسی آن‌ها تأثیرگذار باشد. بنابراین، گندم علاوه بر نقش تغذیه‌ای، دارای اهمیت ژئوپلیتیکی و راهبردی در سطح بین‌المللی است (Summers & Goodman, 2020). در ایران، پیوند با گندم عمیق و تاریخی است. نان، قلب سفره ایرانی است و گندم، محور اصلی سیاست‌های خودکفایی در بخش کشاورزی کشور تلقی می‌شود. گندم با اختصاص بیشترین سطح زیر کشت در میان محصولات زراعی، نقش تعیین‌کننده‌ای در اقتصاد کشاورزان و اشتغال‌زایی روستایی دارد. دولت ایران همواره با اجرای سیاست‌هایی مانند خرید تضمینی، سعی در تشویق کشاورزان و تأمین ذخایر راهبردی ملی داشته است (Mazari, 2019).

عملکرد دانه به‌عنوان یک صفت کمی، تحت کنترل پلی‌ژنیک بوده و به‌شدت تحت تأثیر اثرمتقابل ژنوتیپ × محیط (GEI) قرار دارد. مدیریت این اثرمتقابل، چالش اصلی به‌نژادگران برای گزینش ژنوتیپ‌های پایدار و پرمحصول است (Yan *et al*., 2010; Vaezi *et al*., 2019). از این رو، ارزیابی سازگاری ارقام در محیط‌های مختلف از طریق مدل‌های آماری، گامی ضروری در برنامه‌های به‌نژادی است.

برای سنجش پایداری ژنوتیپی، از روش‌های مختلفی استفاده می‌شود که آن‌ها را می‌توان به دو دسته کلی پارامتری و ناپارامتری تقسیم کرد که روش‌های پارامتری خود شامل رویکردهای تک‌متغیره و چندمتغیره می‌شوند (Elias *et al*., 2016).

در تحلیل‌های پارامتری، معیارهای تک‌متغیره نظیر ضریب تغییرات ژنوتیپی (CV)، اکوالانس ریک (Wi^2) و واریانس شوکلا (σi^2) برای سنجش پایداری به کار می‌روند (Elias *et al*., 2016). در میان رویکردهای چندمتغیره، مدل‌های رگرسیون خطی فینلی و ویلکنسون (Finlay & Wilkinson, 1963) و ابرهارت و راسل (Eberhart & Russell, 1966) به‌دلیل کاربرد در توصیف واکنش ژنوتیپ‌ها به تغییرات محیطی و تفکیک سازگاری عمومی از اختصاصی، همچنان جایگاه ویژه‌ای در تحلیل‌های به‌نژادی دارند. اگرچه روش‌هایی نظیر ریک (Wricke, 1962) به‌دلیل فقدان توزیع آماری محدودیت‌هایی دارند، اما مدل‌های رگرسیون به‌عنوان ابزاری پرکاربرد در شناسایی پایداری ژنوتیپی پذیرفته شده‌اند.

در کنار روش‌های پارامتری، تحلیل‌های ناپارامتری بر پایه رتبه‌بندی عملکرد ژنوتیپ‌ها در محیط‌های مختلف استوارند (Huehn, 1990; Nassar & Huehn, 1987). از شاخص‌های پرکاربرد در این دسته می‌توان به آماره‌های هان (Huehn, 1990) و نصار و هان (Nassar & Huehn, 1987)، آماره تناراسو (Thennarasu, 1995) و مجموع رتبه‌های کانگ (Kang, 1988) اشاره کرد که به شناسایی ژنوتیپ‌هایی با کمترین نوسان رتبه‌ای در محیط‌های متنوع کمک می‌کنند. آماره‌های تک متغیره پارامتری و ناپارامتری به‌طور گسترده برای تعیین پایداری فنوتیپی و تفسیر اثرمتقابل ژنوتیپ × محیط در برنامه‌های به‌نژادی استفاده می‌شوند. این روش‌ها برای ارزیابی پایداری عملکرد در بسیاری از غلات مانند گندم نان (Jafari Abyar *et al*., 2021; Nazarabadi *et al*., 2025) ، گندم دوروم (Karimizadeh *et al*., 2021) و جو (Khalili & Pour-Aboughadareh, 2016) به کار رفته‌اند.

روش GGE بای‌پلات یک روش پارامتری چندمتغیره قدرتمند است که به‌طور گسترده در تجزیه و تحلیل اثرمتقابل ژنوتیپ × محیط به کار می‌رود که بر اساس تجزیه به مولفه‌های اصلی (PCA) عمل می‌کند (Kang, 2002). این روش برخلاف برخی تحلیل‌های دیگر، اثر اصلی ژنوتیپ و اثرمتقابل ژنوتیپ × محیط را از هم جدا نمی‌کند، بلکه هر دو را به‌طور همزمان با استفاده از نمودارهای گرافیکی بررسی می‌کند (Yan & Kang, 2002). این رویکرد به محققان در شناسایی ژنوتیپ‌هایی که هم پتانسیل بالایی دارند و هم در محیط‌های مختلف عملکرد پایداری از خود نشان می‌دهند، کمک شایانی می‌کند و مشخص می‌سازد که کدام ژنوتیپ در کدام محیط یا گروهی از محیط‌ها بهترین عملکرد را دارد. کارایی این روش در مطالعات چند محیطی برای انتخاب ارقام و لاین‌های برتر گندم نان

Esmaeilzadeh Moghaddam *et al.*, 2018;) (Khodarahmi *et al.*, 2021)، گندم دوروم (Mohammadi *et al.*, 2016; Najafi Mirak *et al.*, 2018a)، جو (Ghazvini *et al.*, 2022) و سورگوم (Feyzbakhsh & Khazaei, 2025) به اثبات رسیده است.

با توجه به اینکه شاخص‌های پایداری پارامتری و ناپارامتری هر کدام دارای مزایا و محدودیت‌های منحصر به فردی در ارزیابی پایداری عملکرد ژنوتیپ‌ها و تحلیل اثرمتقابل ژنوتیپ × محیط هستند، بسیاری از به‌نژادگران ترجیح می‌دهند از ترکیبی از هر دو رویکرد بهره ببرند (Awoke & Sharma, 2016). در برنامه‌های به‌نژادی گندم، هدف اصلی معمولاً افزایش عملکرد دانه در ژنوتیپ‌های جدیدی است که علاوه بر عملکرد بالا، در شرایط محیطی متغیر نیز پایداری لازم را داشته باشند. بنابراین، پژوهش حاضر با هدف بررسی اثرمتقابل ژنوتیپ × محیط بر عملکرد دانه و شناسایی پایدارترین ژنوتیپ‌های گندم بهاره نان، با استفاده از روش‌های پارامتری (تک‌متغیره و چندمتغیره) و ناپارامتری انجام شد.

مواد و روش‌ها

مواد گیاهی و شرایط اجرای آزمایش

در این پژوهش تعداد ۲۳ ژنوتیپ گندم نان بهاره (با احتساب ارقام تیرگان و کلاته به‌عنوان شاهد) در دو سال زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ و ۱۴۰۱-۱۴۰۰ در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در دو ایستگاه تحقیقات کشاورزی گرگان و گنبد مورد بررسی قرار گرفتند. مشخصات جغرافیایی ایستگاه‌های تحقیقاتی مذکور در جدول ۱ و شماره و شجره ژنوتیپ‌های مورد ارزیابی در جدول ۲ به نمایش در آمده است.

میزان بذر مصرفی در کلیه کرت‌ها بر اساس تراکم ۳۵۰ دانه در متر مربع بر مبنای وزن هزار دانه ارقام محاسبه شد. مساحت هر کرت ۸ متر مربع (عرض ۱/۲ طول ۶/۶۷ متر) بود که با استفاده از ماشین کاشت آزمایشات کشت انجام شد. میزان کودهای شیمیایی مصرفی بر اساس خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه تعیین شد. بر این اساس کود سولفات پتاسیم ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار، کود سوپر فسفات تریپل ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار، کود اوره ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار (به‌صورت یکبار پایه و سه بار سرک) و سولفات روی ۳۰ کیلوگرم در هکتار به خاک اضافه گردیدند. کنترل شیمیایی علف‌های هرز باریک برگ و پهن برگ با استفاده از علف‌کش تیفیس به نسبت ۳۵ گرم در هکتار انجام شدکه در مرحله پنجه‌دهی پذیرفت. عملیات فنی زراعی به بطور یکسان برای همه تیمارها در طول دوره رشد انجام شد. در صورت نیاز پس از کاشت جهت سبز شدن بذور سریعا آبیاری انجام می‌شد. در طول فصل رشد نیز با توجه به نیاز آبی گیاه، آبیاری انجام شد. برداشت محصول در پایان هر سال زراعی با استفاده از کمباین آزمایشی مدل وینتراشتایگر (اتریش) انجام شد. مساحت برداشت هر کرت ۶ مترمربع (۱/۲ متر عرض و ۵ متر طول) بود. پس از برداشت عملکرد دانه هر کرت آزمایشی با استفاده از ترازوی دیجیتال اندازه‌گیری شدند.

جدول ۱- ویژگی‌های جغرافیایی و هواشناسی مکان‌های اجرای آزمایش

مکان	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	میانگین دمای سالیانه (°C)	میانگین بارندگی سالیانه (mm)	ارتفاع از سطح دریا (m)	میانگین ساعات آفتابی در روز (hr)
گرگان	۵۴° ۲۵′ E	۳۶° ۵۴′ N	۱۷/۸	۵۲۳	۵	۶/۱
گنبد	۵۵° ۱۳′ E	۳۷° ۱۶′ N	۱۸/۶	۴۶۳	۴۵	۶/۶

جدول ۲- شماره و شجره ژنوتیپ‌های گندم نان

شماره No	شجره Pedigree
۱	Tirgan (Check cultivar)
۲	Kalateh (Check cultivar)
۳	Morvarid/Yang//VOROBEY
۴	KACHU//WBLL1*2/BRAMBLING/3/KACHU/KIRITATI
۵	KACHU//WBLL1*2/BRAMBLING*2/3/KACHU/KIRITATI
۶	KACHU//WBLL1*2/BRAMBLING*2/3/KACHU/KIRITATI
۷	KACHU//WBLL1*2/BRAMBLING*2/3/KACHU/KIRITATI
۸	ONIX/KBIRD*2//KFA/2*KACHU
۹	KACHU/SAUAL*2/3/KINGBIRD #1//INQALAB 91*2/TUKURU
۱۰	KACHU/SAUAL*2/3/KINGBIRD #1//INQALAB 91*2/TUKURU
۱۱	UP2338*2/SHAMA/3/MILAN/KAUZ//CHIL/CHUM18/4/UP2338*2/SHAMA*2
۱۲	MUTUS*2/TECUE #1/3/KINGBIRD #1//INQALAB 91*2/TUKURU
۱۳	MUCUY/3/PBW343*2/KUKUNA*2//FRTL/PIFED
۱۴	KFA/2*KACHU/3/PBW343*2/KUKUNA*2//FRTL/PIFED/4/KFA
۱۵	NELOKI//SOKOLL/EXCALIBUR
۱۶	MUCUY
۱۷	NELOKI//SOKOLL/EXCALIBUR
۱۸	BAJ #1*2/PREMIO
۱۹	KACHU #1/3/C80.1/3*BATAVIA//2*WBLL1/4/KACHU/8/TACUPETO F2001
۲۰	SAUAL/MUTUS/4/KACHU #1//WBLL1*2/KUKUNA/3/BRBT1*2/KIRITATI
۲۱	BABAX/LR42//BABAX/3/ER2000/7/CNO79//PF70354/MUS/3/PASTOR
۲۲	BAJ #1*2/PREMIO
۲۳	BAVIS #1*2/PREMIO

تجزیه‌های آماری

پس از انجام آزمون بارتلت و پی بردن به همگنی واریانس خطاهای آزمایشـــی در محیط‌های مختلف، تجزیه واریانس مرکب با ا ستفاده از نرم افزار SAS9.4 انجام شد و با توجه معنی‌دار بودن اثرمتقابل ژنوتیپ × محیط تجزیه پایداری عملکرد برای ژنوتیپ‌ها مورد بررسی انجام شد.

هفت آماره پایداری پارامتری تک متغیره شامل مؤلفه واریانس میانگین (θ_i; Plaisted & Peterson, 1959)، مؤلفه واریانس اثرمتقابل ژنوتیپ × محیط ($\theta_{(i)}$; Plaisted, 1960)؛ اکوالانس ریک (W_i^2 ;Wricke, 1962) ؛ ضریب رگرسیون (b_i; Finlay & Wilkinson, 1963)، انحراف از رگرسیون (S_{di}^2; Eberhart & Russell, 1966)، واریانس پایداری شوکلا (σi^2; Shukla, 1972) و ضریب تغییرات (CV; Francis & Kannenberg, 1978) مطابق معادلات زیر محاسبه شدند.

$$\theta_i = \left(\frac{p}{2*(p-1)*(q-1)}\right)\times\sum_{j=1}^{q}\left(x_{ij}-\bar{x}_{i.}-\bar{x}_{.j}+\bar{x}_{..}\right)^2 + \frac{\left(\Sigma\Sigma\left(x_{ij}-\bar{x}_{i.}-\bar{x}_{.j}+\bar{x}_{..}\right)^2\right)}{2*(p-2)*(q-1)}$$

$$\theta_i = -\frac{-p}{(p-1)(p-2)(q-1)}\times\sum_{j=1}^{q}\left(x_{ij}-\bar{x}_{i.}-\bar{x}_{.j}+\bar{x}_{..}\right)^2 + \frac{SSGE}{(p-2)(q-1)}$$

$$W_i^2 = \Sigma\left(X_{ij}-\bar{X}_{i.}-\bar{X}_{.j}+\bar{X}_{..}\right)^2$$

$$b_i = 1+\frac{\Sigma_i\left(X_{ij}-\bar{X}_{i.}-\bar{X}_{.j}+\bar{X}_{..}\right)\left(\bar{X}_{.j}-\bar{X}_{..}\right)}{\Sigma_j\left(\bar{X}_{.j}-\bar{X}_{..}\right)^2}$$

$$S_{\{di\}}^2 = \left(\frac{1}{q-2}\right)\times\left[\Sigma_i\left(X_{ij}-\bar{X}_{i.}-\bar{X}_{.j}+\bar{X}_{..}\right)-(b_i-1)^2\times\Sigma_j\left(\bar{X}_{.j}-\bar{X}_{..}\right)^2\right]$$

$$\sigma_i^2 = \left(\frac{p}{(p-2)(q-1)}\right)\times W_i^2-\left(\frac{\Sigma W_i^2}{(p-1)(p-2)(q-1)}\right)$$

$$CV_i = \left(\frac{SD_x}{\bar{X}}\right) \times 100$$

در این معادلات p، q، X_{ij}، $X_{i.}$، $X_{.j}$، $X_{..}$، Wi^2 و SD_x به‌ترتیب تعداد ژنوتیپ‌ها، تعداد محیط‌ها، عملکرد دانه رقم iدر محیط j، میانگین عملکرد دانه رقم i، میانگین عملکرد دانه محیط j، میانگین کل، آماره اکولانس ریک و انحراف معیار میانگین عملکرد برای هر ژنوتیپ در محیط‌های مختلف هستند.

$$S_i^{(1)} = 2\sum_{j}^{n-1} \frac{\sum_{j\prime=j+1}^{n} |r_{ij} - r_{ij}'|}{[N(N-1)]}$$

$$S_i^{(2)} = \frac{\sum_{j=1}^{n} (r_{ij} - \bar{r}_{i\cdot})^2}{(N-1)}$$

$$S_i^{(3)} = \frac{\sum_{j=1}^{n} |r_{ij} - r'_{ij}|^2}{\bar{r}_{i\cdot}}$$

$$S_i^{(6)} = \frac{\sum_{j=1}^{n} |r_{ij} - \bar{r}_{i\cdot}|}{\bar{r}_{i\cdot}}$$

KR رتبه عملکرد هر لاین + رتبه واریانس پایداری هر لاین در این معادلات، r_{ij}، $\bar{r}_{i\cdot}$ و N به‌ترتیب نشان‌دهنده رتبه تصحیح نشده ژنوتیپ iام در محیط jام، میانگین رتبه آن ژنوتیپ در تمام محیط‌ها و تعداد کل محیط‌ها است. همچنین، $r_{ij}*$، M_{di}، $M_{di}*$ نیز به‌ترتیب بیانگر رتبه تصحیح شده ژنوتیپ iام در محیط jام، میانه رتبه‌های تصحیح نشده و میانه رتبه‌های تصحیح شده برای ژنوتیپ iام در تمام محیط‌ها می‌باشند.

کلیه شاخص‌های پایداری پارامتریک و ناپارامتریک با استفاده از نرم‌افزار آنلاین STABILITYSOFT (Pour-Aboughadareh *et al.*, 2019) محاسبه شدند. پس از محاسبهٔ شاخص‌های پایداری، برای بررسی روابط میان پارامترهای مختلف پایداری و عملکرد دانهٔ ژنوتیپ‌ها، نقشه حرارتی (Heat Map) و بای‌پلات دو مؤلفه اول (PC1 و PC2) در تجزیه به مؤلفه‌های اصلی به وسیله نرم افزار مذکور ترسیم شدند.

در این پژوهش همچنین تجزیه پایداری با استفاده از روش پارامتری چند متغیره GGE بای‌پلات نیز انجام شد. مدل GGE بای‌پلات بر مبنای مقادیر ویژه تفکیک پذیر برای دو مؤلفه اول بر اساس رابطه استوار است (Yan & Kang, 2002).

$$Y_{ij} - \mu - \beta j = g_{i1}e_{1j} + g_{i2}e_{12} + e_{ij}$$

در رابطه بالا، Y_{ij} میانگین عملکرد ژنوتیپ iام در محیط jام، μ میانگین کل، β_j میانگین اثر محیط jام، g_{il} و e_{1j} مقادیر

چندین آماره پایداری ناپارامتری نیز شـــامل آماره‌های هان ($S^{(1,2)}$; Huehn, 1990)، نصـــار و هان ($S^{(3,6)}$; Nassar & Huehn, 1987)، تناراسو ($NP^{(1-4)}$; Thennarasu, 1995) و مجموع رتبه‌های کانگ (KR; Kang, 1988) برای بررســـی پایداری عملکرد دانه ژنوتیپ های گندم مورد برر سی قرار گرفت که با استفاده از معادلات زیر محاسبه شدند:

$$NP^{(1)} = \left(\frac{1}{N}\right) \times \sum_{j=1}^{n} |r_{ij}* - M_{di}*|$$

$$NP^{2} = \left(\frac{1}{N}\right) \times \frac{\sum_{j=1}^{n} |r_{ij}* - M_{di}*|}{M_{di}}$$

$$NP^{(3)} = \frac{\sqrt{\frac{\Sigma(r_{ij}* - \bar{r}_{i\cdot}*)^2}{N}}}{\bar{r}_{i\cdot}}$$

$$NP^{(4)} = \left(\frac{2}{N(N-1)}\right) \times \frac{\sum_{j=1}^{n-1}\sum_{j\prime=j+1}^{n} |r_{ij}* - r_{ij\prime}*|}{\bar{r}_{i\cdot}}$$

اولیه برای ژنوتیپ iام و محیط jام و g_{i2} و e_{2j} مقادیر ثانویه برای برای ژنوتیپ iام و محیط jام و در نهایت e_{ij} مقدار باقیمانده است که بوسیله آثار اولیه و ثانویه توجیه نمی‌شود. برای انجام تجزیه گرافیکی اثرمتقابل ژنوتیپ × محیط از نرم‌افزار GGE biplot4 استفاده شد.

نتایج و بحث

با انجام تجزیه واریانس مرکب برای صفت عملکرد دانه مشخص شد که اثر ژنوتیپ، محیط و اثرمتقابل ژنوتیپ × محیط از نظر آماری معنی‌دار است (جدول ۳). معنی‌دار بودن اثرات ساده ژنوتیپ و محیط نیز نشان دهنده تنوع ژنتیکی کافی بین مواد ژنتیکی و محیط‌های مختلف در این آزمایش است. معنی‌دار بودن اثرمتقابل ژنوتیپ × محیط نشان می‌دهد که ژنوتیپ‌ها در محیط‌های متفاوت پاسخ‌های متفاوتی از خود نشان داده‌اند؛ در واقع عملکرد ژنوتیپ‌ها از محیطی به محیط دیگر متفاوت بوده است و اجازه تجزیه پایداری عملکرد و ارزیابی سازگاری ژنوتیپ‌ها را داریم. اختصاص عمده تغییرات به واریانس اثرمتقابل ژنوتیپ × محیط (۳۳ درصد) ناشی از نوسان عملکرد ژنوتیپ‌ها از محیطی به محیط دیگر است. در تطابق با نتایج پژوهش حاضر، اثر معنی‌دار ژنوتیپ، محیط و اثرمتقابل ژنوتیپ × محیط در گندم توسط پژوهشگران متعددی گزارش شده است (Khodarahmi *et al.*, 2021; Karimizadeh *et al.*, 2021; Mohammadi *et al.*, 2025).

جدول ۳- تجزیه واریانس مرکب عملکرد دانه ژنوتیپ‌های گندم نان

منبع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	سهم از مجموع مربعات کل (٪)
محیط	۳	۱۴/۸۶	۴۹/۵۰*	۱۴
بلوک درون محیط	۸	۷/۱۶	۰/۹۰	۷
ژنوتیپ	۲۲	۱۲/۰۰	۰/۵۵**	۱۱
ژنوتیپ×محیط	۶۶	۳۴/۴۵	۰/۵۲**	۳۳
خطا	۱۷۶	۳۶/۰۲	۰/۲۰	-
ضریب تغییرات (٪)	۹/۱۷			

* و ** به‌ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد است.

آماره‌های تک متغیره پارامتری و ناپارامتری تجزیه پایداری

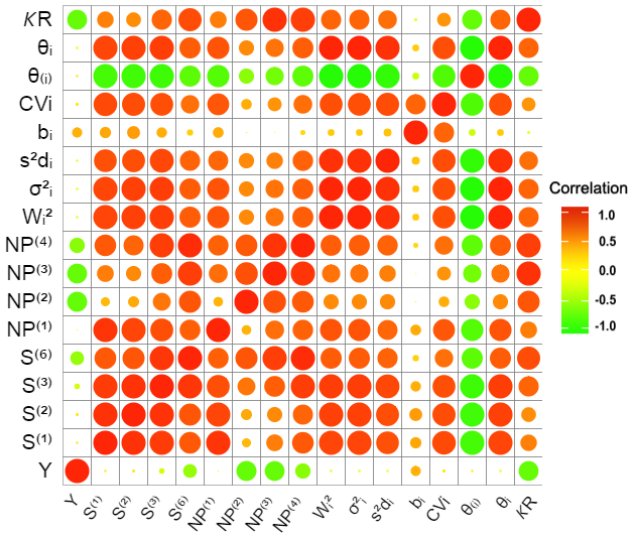
مقادیر عملکرد دانه و آماره‌های پارامتری و ناپارامتری پایداری برای عملکرد دانه لاین‌های امید بخش در جدول ۴ نمایش داده شده است. میانگین عملکرد دانه ۲۳ ژنوتیپ‌ها مورد مطالعه، ۴/۹۴۱ تن در هکتار بود. به‌طوری که ژنوتیپ ۲۳ با عملکرد ۵/۲۴۴ تن در هکتار و ژنوتیپ ۲۰ با عملکرد ۴/۶۱۵ تن در هکتار به به‌ترتیب بیشترین و کمترین عملکرد دانه را داشتند. بر اساس آماره ابرهارت و راسل (۱۹۶۶) ژنوتیپ‌هایی با عملکرد دانه بالا، شیب رگرسیون برابر با یک (bi=1) و حداقل انحراف از خط رگرسیون (S^2_{di}) به‌عنوان ژنوتیپی با پایداری بالا در نظر گرفته می‌شوند. از این رو ژنوتیپ ۴ با ضریب رگرسیون ۱/۱۶ و انحراف از رگرسیون نزدیک به صفر پایدارترین ژنوتیپ بود. آماره‌های واریانس ریک (W_i^2)، واریانس شوکلا (σ^2_i) و پلاستد ($\theta_{(i)}$) روندی مشابه را در شناسایی ژنوتیپ‌های پایدار نشان دادند. به‌طوری که در هر سه روش ژنوتیپ‌های ۴، ۲۰ و ۱۵ به‌عنوان پایدارترین ژنوتیپ و ژنوتیپ‌های ۱۶، ۶ و ۱۲ به‌عنوان ناپایدارترین ژنوتیپ‌ها شناسایی شدند. روند مشابه این سه آماره تجزیه پایداری در سایر مطالعات مرتبط با غلات گزارش شده است (Ghazvini *et al.*, 2018; Vaezi *et al.*, 2019). بر اساس روش ضریب تغییرات (CV) سه ژنوتیپ ۲۲، ۱۵ و ۱۴ به‌عنوان پایدارترین ژنوتیپ و ژنوتیپ‌های ۱۶، ۶ و ۱۱ به‌عنوان ناپایدارترین ژنوتیپ‌ها شناسایی شدند. روش پلاستد و پترسون (θ_i) روند متفاوتی از پایداری عملکرد ژنوتیپ‌ها نسبت به سایر روش‌های فوق نشان داد به‌طوری که ژنوتیپ‌های ۱۶، ۶ و ۱۲ به‌عنوان پایدارترین ژنوتیپ و ژنوتیپ‌های ۴، ۲۰ و ۱۵ به‌عنوان ناپایدارترین ژنوتیپ‌ها شناسایی شدند. پژوهشی به‌منظور ارزیابی پایداری عملکرد دانه ۱۹ ژنوتیپ پیشرفته گندم به‌همراه رقم شاهد دهدشت انجام شد و در آن با استفاده از روش‌های پارامتری تک‌متغیره شامل اکوالانس ریک، ضریب تغییرات، واریانس پایداری شوکلا و شاخص پلیستد و پترسون، چهار ژنوتیپ به‌عنوان ژنوتیپ‌های پایدار از نظر عملکرد معرفی شدند (Karimizadeh *et al.*, 2021). همچنین در مطالعه‌ای دیگر، ۱۸ لاین امیدبخش گندم به‌همراه دو رقم شاهد ارزیابی شدند و با بهره‌گیری از آماره‌هایی نظیر واریانس محیطی، ضریب تغییرات، اکوالانس ریک، واریانس شوکلا، انحراف از خط رگرسیون و شاخص برتری، ژنوتیپ D-96-18 به‌عنوان ژنوتیپی با عملکرد بالا و پایداری مناسب معرفی شد (Najafi Mirak *et al.*, 2018b). چندین آماره پایداری ناپارامتری شامل آماره‌های نصار و هان ($S^{(1-6)}$)، آماره‌های تناراسو ($NP^{(1-4)}$) و مجموع رتبه‌های کانگ (KR) برای بررسی پایداری عملکرد دانه ژنوتیپ‌های گندم بهاره مورد استفاده قرار گرفت (جدول ۴). بر اساس دو آماره $S^{(1)}$ و $S^{(2)}$ ژنوتیپ‌های شمار ۴، ۲۰ و ۲۲ به‌ترتیب در رتبه اول تا سوم قرار گرفتند و به‌عنوان پایدارترین ژنوتیپ‌ها شناسایی شدند. دو آماره $S^{(3)}$ و $S^{(6)}$ نیز تقریبا روند مشابهی در شناسایی پایدارترین ژنوتیپ‌ها نشان دادند و ژنوتیپ‌های ۴ و ۱۵ به‌عنوان پایدارترین ژنوتیپ‌ها شناسایی کردند. با استفاده از آماره ناپارامتری $NP^{(1)}$، ژنوتیپ‌های ۱، ۲۰ و ۱۳ و بر اساس آماره $NP^{(2)}$ ژنوتیپ‌های شماره ۱۳، ۱۵ و ۱۰ پایدارترین ژنوتیپ از نظر عملکرد دانه بودند. همچنین از نظر آماره‌های $NP^{(3)}$ و $NP^{(4)}$ ژنوتیپ ۴، ۱۵ و ۱۳ به‌عنوان پایدارترین ژنوتیپ معرفی شدند. بر اساس آماره KR نیز ژنوتیپ‌های ۴، ۱۵، ۱۳ و ۲۳ پایدارترین ژنوتیپ‌ها بودند. این آماره‌های ناپارامتری به‌طور گسترده‌ای در مطالعات پیشین برای شناسایی ژنوتیپ‌های پایدار گندم و جو مورد استفاده قرار گرفته است (Ghazvini *et al.*, 2018; Najafi Mirak *et al.*, 2018b; Mohammadi *et al.*, 2025).

جدول ۴- میانگین عملکرد و آماره‌های پارامتری و ناپارامتری برای ۲۳ ژنوتیپ گندم نان

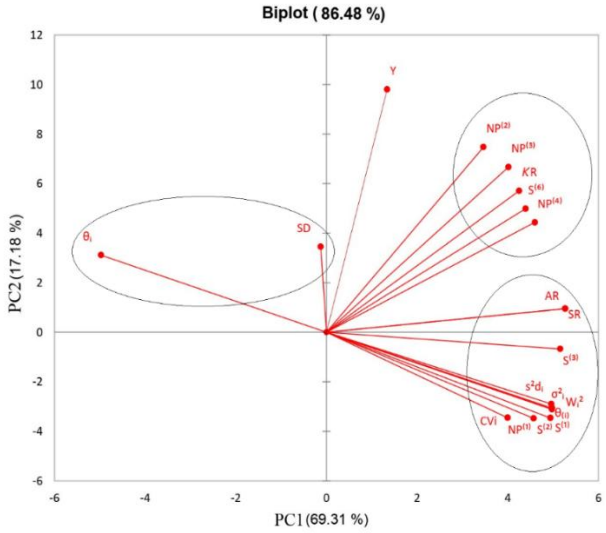
Genotype	Y	$S^{(1)}$	Z_1	$S^{(2)}$	Z_2	$S^{(3)}$	$S^{(6)}$	$NP^{(1)}$	$NP^{(2)}$	$NP^{(3)}$	$NP^{(4)}$	W_i^2	σ^2_i	s^2d_i	b_i	CVi	$\theta_{(i)}$	θ_i	*K*R
G1	۵/۱۷۵	۷/۸۳	۰/۰۰۵	۳۸/۲۵	۰/۰۵	۷/۷۸	۱/۱۵	۷/۰۰	۰/۴۰	۰/۵۰	۰/۵۳	۰/۴۸	۰/۱۷	۰/۰۴	۲/۰۶	۱۱/۷۲	۰/۱۷	۰/۱۷	۱۹
G2	۵/۱۰۲	۸/۳۳	۰/۰۶۸	۴۳/۳۳	۰/۰۰	۱۰/۰۰	۱/۳۸	۵/۷۵	۰/۴۴	۰/۵۲	۰/۶۴	۰/۴۵	۰/۱۵	۰/۰۴	۱/۸۸	۱۱/۲۷	۰/۱۷	۰/۱۷	۱۹
G3	۴/۷۱۲	۷/۶۷	۰/۰۰۰	۳۵/۶۷	۰/۱۰	۱۲/۵۹	۲/۱۲	۵/۵۰	۰/۶۶	۰/۷۴	۰/۹۰	۰/۳۳	۰/۱۱	۰/۰۴	۰/۵۹	۷/۴۰	۰/۱۷	۰/۱۵	۳۰
G4	۵/۲۴۲	۲/۵۰	۳/۸۷۶	۴/۲۵	۲/۲۳	۰/۷۴	۰/۴۱	۰/۵۰	۰/۳۶	۰/۰۵	۰/۱۴	۰/۰۰	-۰/۰۱	۰/۰۰	۱/۱۶	۵/۶۸	۰/۱۸	۰/۰۹	۳
G5	۴/۷۳۸	۹/۶۷	۰/۵۹۳	۶۴/۶۷	۰/۶۰	۲۱/۵۶	۲/۶۷	۷/۰۰	۰/۹۶	۰/۸۴	۱/۰۷	۰/۷۳	۰/۲۶	۰/۰۹	۱/۷۴	۱۳/۴۶	۰/۱۷	۰/۲۲	۳۷
G6	۴/۶۹۹	۱۰/۱۷	۰/۹۲۳	۷۰/۹۲	۱/۰۲	۲۳/۰۰	۲/۵۴	۶/۵۰	۰/۹۷	۰/۸۵	۱/۱۰	۱/۴۳	۰/۵۱	۰/۲۰	۰/۷۷	۱۵/۲۴	۰/۱۶	۰/۳۴	۴۳
G7	۴/۸۶۹	۶/۱۷	۰/۳۲۲	۲۵/۵۸	۰/۴۸	۷/۴۹	۱/۶۶	۵/۷۵	۰/۴۵	۰/۵۶	۰/۶۰	۰/۲۴	۰/۰۸	۰/۰۲	۱/۶۶	۹/۹۴	۰/۱۸	۰/۱۳	۱۹
G8	۴/۸۳۸	۹/۰۰	۰/۲۶۵	۴۸/۶۷	۰/۰۳	۱۶/۲۲	۲/۴۴	۶/۲۵	۰/۶۱	۰/۷۱	۱/۰۰	۰/۳۱	۰/۱۱	۰/۰۴	۱/۱۵	۹/۰۱	۰/۱۷	۰/۱۴	۲۳
G9	۵/۰۶۴	۹/۳۳	۰/۴۱۳	۵۸/۶۷	۰/۳۰	۱۲/۵۷	۱/۷۱	۵/۷۵	۰/۳۸	۰/۵۰	۰/۶۷	۰/۵۰	۰/۱۸	۰/۰۷	۰/۸۱	۹/۰۴	۰/۱۷	۰/۱۸	۲۴
G10	۴/۹۴۱	۶/۶۷	۰/۱۴۲	۲۸/۳۳	۰/۳۵	۷/۳۹	۱/۲۲	۴/۰۰	۰/۳۳	۰/۴۷	۰/۵۸	۰/۳۰	۰/۱۰	۰/۰۴	۱/۴۹	۹/۷۰	۰/۱۸	۰/۱۴	۲۰
G11	۵/۱۸۳	۸/۳۳	۰/۰۶۸	۵۰/۰۰	۰/۰۵	۸/۸۲	۱/۱۸	۶/۷۵	۰/۳۷	۰/۴۲	۰/۴۹	۰/۵۹	۰/۲۱	۰/۰۸	۱/۴۸	۱۱/۰۳	۰/۱۷	۰/۱۹	۲۰
G12	۴/۷۸۷	۹/۱۷	۰/۳۳۵	۵۲/۹۲	۰/۱۱	۱۴/۷۷	۱/۹۵	۶/۵۰	۰/۵۴	۰/۷۵	۰/۸۵	۰/۸۴	۰/۳۰	۰/۰۵	-۰/۵۹	۷/۷۰	۰/۱۷	۰/۲۴	۳۷
G13	۴/۹۵۶	۶/۰۰	۰/۳۹۹	۲۹/۳۳	۰/۳۰	۶/۷۷	۱/۲۳	۳/۰۰	۰/۲۷	۰/۳۴	۰/۴۶	۰/۲۶	۰/۰۹	۰/۰۳	۰/۳۸	۵/۴۲	۰/۱۸	۰/۱۴	۱۷
G14	۴/۶۲۳	۴/۸۳	۱/۱۶۰	۱۶/۲۵	۱/۰۹	۶/۲۹	۱/۴۸	۴/۵۰	۰/۶۹	۰/۷۶	۰/۶۲	۰/۳۲	۰/۱۱	۰/۰۱	-۰/۰۸	۳/۷۶	۰/۱۷	۰/۱۵	۳۱
G15	۵/۱۸۲	۵/۳۳	۰/۷۸۵	۲۰/۳۳	۰/۷۹	۳/۴۹	۰/۷۴	۳/۲۵	۰/۳۰	۰/۱۹	۰/۳۰	۰/۱۱	۰/۰۳	۰/۰۱	۰/۵۰	۳/۵۹	۰/۱۸	۰/۱۱	۷
G16	۵/۰۷۶	۱۴/۰۰	۵/۸۸۴	۱۴۷/۰	۱۴/۹۹	۳۵/۲۸	۳/۳۶	۱۰/۲۵	۰/۸۴	۰/۸۲	۱/۱۲	۱/۴۵	۰/۵۲	۰/۱۵	۲/۳۹	۱۶/۸۶	۰/۱۶	۰/۳۴	۳۱
G17	۵/۱۱۲	۸/۱۷	۰/۰۳۹	۴۰/۲۵	۰/۰۲	۷/۹۲	۱/۲۵	۶/۵۰	۰/۳۵	۰/۴۶	۰/۵۴	۰/۴۵	۰/۱۶	۰/۰۶	۰/۵۷	۷/۸۰	۰/۱۷	۰/۱۷	۱۹
G18	۵/۰۳۷	۷/۸۳	۰/۰۰۵	۴۰/۲۵	۰/۰۲	۹/۴۷	۱/۳۷	۵/۰۰	۰/۳۴	۰/۴۶	۰/۶۱	۰/۳۵	۰/۱۲	۰/۰۴	۱/۵۲	۹/۹۶	۰/۱۷	۰/۱۵	۲۱
G19	۴/۹۵۱	۱۱/۶۷	۲/۳۵۳	۸۶/۳۳	۲/۵۳	۲۰/۷۲	۲/۴۰	۸/۲۵	۰/۵۴	۰/۶۷	۰/۹۳	۰/۸۰	۰/۲۸	۰/۰۹	۱/۹۶	۱۳/۷۰	۰/۱۷	۰/۲۳	۳۲
G20	۴/۶۱۵	۳/۸۳	۲/۱۳۰	۱۰/۲۵	۱/۶۱	۴/۹۲	۱/۷۶	۲/۵۰	۰/۸۸	۰/۵۷	۰/۶۱	۰/۱۰	۰/۰۳	۰/۰۱	۰/۵۷	۴/۴۸	۰/۱۸	۰/۱۱	۲۵
G21	۴/۷۶۶	۸/۶۷	۰/۱۵۰	۴۸/۶۷	۰/۰۳	۱۶/۲۲	۲/۴۴	۷/۲۵	۰/۷۷	۰/۸۶	۰/۹۶	۰/۶۷	۰/۲۴	۰/۰۹	۰/۴۳	۹/۷۱	۰/۱۷	۰/۲۱	۳۵
G22	۴/۷۳۲	۴/۶۷	۱/۳۰۲	۱۵/۰۰	۱/۱۹	۵/۲۹	۱/۲۹	۳/۷۵	۰/۵۰	۰/۵۵	۰/۵۵	۰/۱۲	۰/۰۴	۰/۰۱	۰/۳۷	۳/۲۱	۰/۱۸	۰/۱۱	۲۳
G23	۵/۲۴۴	۸/۵۰	۰/۱۰۵	۴۶/۹۲	۰/۰۱	۸/۴۰	۱/۳۷	۶/۵۰	۰/۳۳	۰/۴۲	۰/۵۱	۰/۵۱	۰/۱۸	۰/۰۵	۰/۱۹	۶/۸۳	۰/۱۷	۰/۱۸	۱۷

روابط آماره‌های پارامتری و ناپارامتری پایداری

نتایج ضرایب همبستگی به صورت نقشه حرارتی در شکل ۱ نمایش داده شده است. رابطه بین عملکرد دانه با آماره‌های $NP^{(2)}$، $NP^{(3)}$، $NP^{(4)}$ وKR منفی و معنی‌دار بود. همچنین رابطه بین KR با θ_i، CV، S^2_{di}، W_i^2، σ^2_i، $NP^{(1-4)}$ و $S^{(1,2,3,6)}$ مثبت و معنی‌دار بود. رابطه بین (W_i^2) و (σ^2_i) با همه آماره‌های پارامتری و ناپارامتری به جز $\theta_{(i)}$ و bi مثبت و معنی‌دار بود. به منظور درک بهتر رابطه بین آماره‌های پارامتری و ناپارامتری پایداری با عملکرد ژنوتیپ‌ها، تجزیه به مولفه‌های اصلی نیز انجام شد (شکل ۲). نتایج نشان داد که دو مولفه اول به‌ترتیب ۶۹/۳۱ و ۱۷/۱۸ درصد تغییرات و در مجموع ۸۶/۴۸ درصد کل تغییرات را توجیه کردند. شکل بای‌پلات نشان داد معیارهای پارامتری و ناپارامتری مورد بررسی، نسبت به میانگین کل عملکرد ۲۳ ژنوتیپ گندم در سه گروه متمایز قرار گرفتند. آماره‌های $NP^{(2)}$، $NP^{(3)}$، $NP^{(4)}$، KR **و** $S^{(6)}$ در یک گروه قرار گرفتند و همبستگی بالایی با عملکرد دانه داشتند. گروه دوم شامل معیارهایی مانند CV، $NP^{(1)}$، $S^{(1,2,3)}$، θ_i، S^2_{di}، W_i^2، σ^2_i، SR و AR بودند که همبستگی ضعیفی با عملکرد داشتند. وجود آمارهای که مرتبط با واریانس هستند در این گروه دور از انتظار نبود زیرا ژنوتیپ‌هایی عملکرد بالاتری دارند که محیط مختلف واریانس کمتر و در واقع پایداری بیشتری داشته باشند. گروه سوم هم شامل دو آماره SD و θ_i بود که همبستگی آن‌ها با عملکرد دانه به‌ترتیب قوی و ضعیف بود (شکل ۲). در سایر مطالعات مرتبط نیز همبستگی ضعیف بین عملکرد دانه و آماره‌های مرتبط با واریانس گزارش شده است (Mut *et al.*, 2009; Vaezi *et al.*, 2019). پژوهش‌های پیشین نیز نتایج مشابهی گزارش کرده‌اند به‌طوری که Ghazvini و همکاران (۲۰۱۸) نیز با مطالعه ۲۰ ژنوتیپ جو همبستگی مثبت و قوی بین برخی آماره مانند S^2_{di}، W_i^2، σ^2_i و $\theta_{(i)}$ مشاهده کردند که با نتایج این پژوهش مطابقت دارد. همچنین Kaya و Turkoz (۲۰۱۶) نیز همبستگی بالایی را میان سه آماره ناپارامتری $S^{(1)}$ ، $S^{(2)}$ و $S^{(3)}$ در گندم گزارش کرده‌اند.



شکل ۱- همبستگی بین عملکرد دانه و آماره‌های پایداری پارامتری و ناپارامتری مختلف

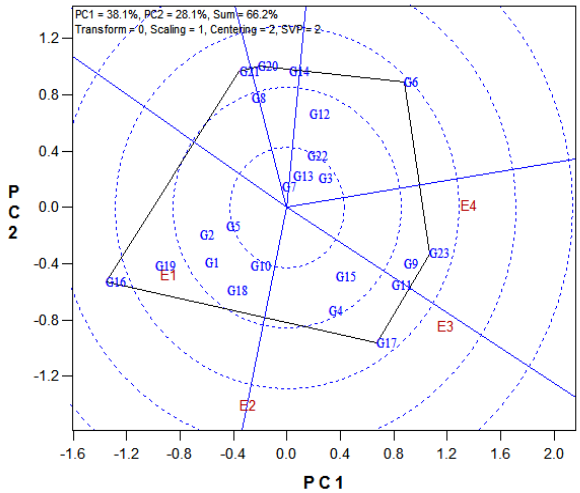


شکل ۲- نمودار بای‌پلات تجزیه به مولفه‌های اصلی برای ارتباط عملکرد دانه و آماره‌های پایداری پارامتری و ناپارامتری مختلف

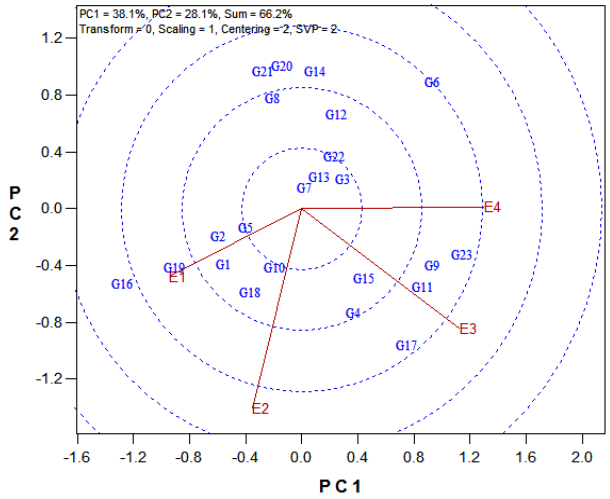
تجزیه پایداری ژنوتیپ‌ها به روش GGE-biplot

نتایج حاصل از روش گرافیکی GGE-biplot نشان داد که دو مؤلفه اصلی اول و دوم درمجموع ۶۶/۲ درصد از تغییرات داده‌ها را توجیه کردند که بیانگر اعتبار نسبتا بالای بای‌پلات به دست آمده در توجیه تغییرات مربوط به ژنوتیپ و اثرمتقابل ژنوتیپ × محیط بود (شکل ۳). نمایش چندضلعی اثرمتقابل ژنوتیپ × محیط در آزمایش‌های چندمحیطی، یکی از کارآمدترین رویکردها برای شناسایی الگوهای تعامل ژنوتیپ‌ها با محیط‌ها و تفسیر ساختار بای‌پلات و همچنین بررسی امکان وجود خوشه‌های محیطی در یک منطقه محسوب می‌شود (Yan *et al.*, 2000). در این نمایش، ژنوتیپ‌هایی که در رأس چندضلعی قرار می‌گیرند، به‌عنوان ژنوتیپ‌های دارای بیشینه عملکرد در یک یا چند محیط شناخته می‌شوند؛ زیرا فاصله آن‌ها از مرکز بای‌پلات بیشترین مقدار است (Yan & Kang, 2002). تحلیل این نمودار نشان داد که ژنوتیپ ۱۶ در محیط‌های E1 وE2 ، ژنوتیپ ۱۷ در محیط E3 و ژنوتیپ ۲۳ در محیط E4 بالاترین عملکرد دانه را داشتند. این ژنوتیپ‌ها در مجموع به‌عنوان ژنوتیپ‌های برتر و دارای سازگاری عمومی یا خصوصی مطلوب طبقه‌بندی شدند (شکل ۳).

در بای‌پلات شکل ۴، کسینوس زاویه بین بردارهای محیطی به‌عنوان شاخصی از همبستگی بین محیط‌ها به‌کار می‌رود (Yan & Kang, 2002). بر اساس نمودار ارائه‌شده، زاویه بزرگ‌تر از ۹۰ درجه بین بردارهای محیط‌های سال اول (E1 و E2) با سال دوم (E3 و E4) نشان‌دهنده همبستگی ضعیف و در نتیجه رفتار مستقل محیط‌های دو سال نسبت به یکدیگر است (Yan & Rajcan, 2002).



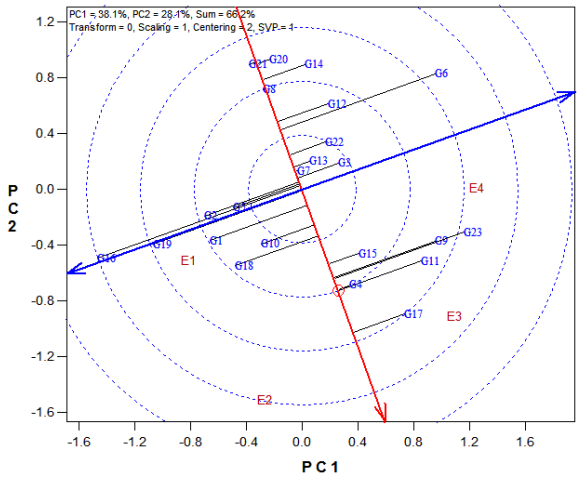
شکل ۳- چند ضلعی GGE بای‌پلات برای تعیین ژنوتیپ‌های برتر در هر محیط



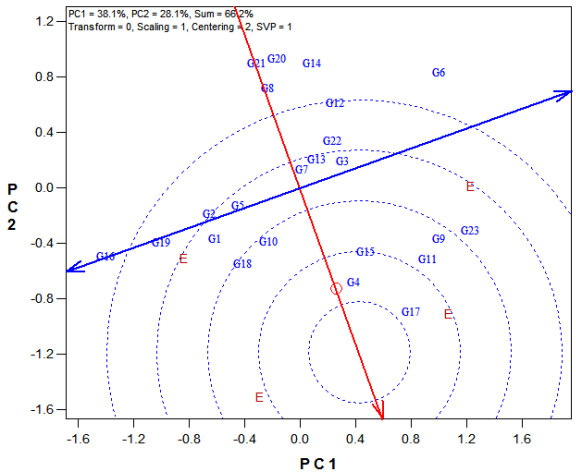
شکل ۴- بای‌پلات نمودار همبستگی بین محیط‌های مورد بررسی برای ژنوتیپ‌های گندم نان

برای ارزیابی هم‌زمان عملکرد و پایداری ژنوتیپ‌ها از نمودار مختصات محیط متوسط (Average-environment coordination) استفاده شد (شکل ۵). در این نمودار، محور افقی که از مبدأ مختصات و نقطه میانگین محیط عبور می‌کند، شاخصی از عملکرد ژنوتیپ‌ها بوده و محور عمودی که بر محور عملکرد عمود است، میزان نوسان ژنوتیپ‌ها و در نتیجه پایداری آن‌ها را نشان می‌دهد (Yan *et al.*, 2000). بر اساس محور عملکرد، ژنوتیپ‌های ۱۷، ۴، ۱۱، ۹، ۲۳ و ۱۵ به‌عنوان ژنوتیپ‌های پربازده شناسایی شدند. همچنین فاصله کمتر ژنوتیپ‌ها از محور پایداری نشان داد که در میان ژنوتیپ‌های پربازده، ژنوتیپ‌های ۴ و ۱۵ از پایداری و سازگاری وسیع‌تری برخوردار بودند (شکل ۵).

کاربرد دیگر روش گرافیکی GGE-biplot، مقایسه ژنوتیپ‌های مورد مطالعه با ژنوتیپ ایده‌آل است. ژنوتیپی ایده‌آل است که دارای بیشترین عملکرد و سازگاری بوده و از نظر مکانی در مرکز دایره‌های هم‌مرکز بای‌پلات قرار دارد و میزان مطلوبیت ژنوتیپ‌ها به فاصله آن‌ها از مرکز بستگی دارد (Yan, 2001). بر این اساس، ژنوتیپ‌های ۴، ۱۵ و ۱۷ به‌عنوان مطلوب‌ترین ژنوتیپ‌ها شناسایی شدند (شکل ۶). استفاده از نمودار ژنوتیپ ایده‌آل فرضی به‌منظور مقایسه ژنوتیپ‌های گندم و جو با ژنوتیپ ایده‌آل نشان داده است که این روش ابزاری کارآمد و مؤثر برای شناسایی ژنوتیپ‌های دارای عملکرد بالا و پایداری مطلوب محسوب می‌شود (Khodarahmi *et al.*, 2021; Bakhtiar *et al.*, 2021; Latifi *et al.*, 2024; Barati *et al.*, 2025).



شکل ۵- بای‌پلات مختصات محیط متوسط (AEC) برای گزینش هم‌زمان عملکرد و پایداری ژنوتیپ‌های گندم نان



شکل ۶- بای‌پلات مقایسه ژنوتیپ‌ها با ژنوتیپ ایده‌آل برای میانگین عملکرد دانه و پایداری

نتیجه‌گیری کلی

نتایج تجزیه واریانس مرکب برای عملکرد دانه ۲۳ ژنوتیپ گندم بهاره نان نشان داد که اثرمتقابل ژنوتیپ × محیط از نظر آماری معنی‌دار بود و بیشترین تغییرات را نسبت به واریانس کل توجیه می‌کرد. نتایج تجزیه پایداری بر اساس آماره‌های پارامتری و ناپارامتری نشان داد که ژنوتیپ ۴ با استفاده از آماره‌های پارامتری ابرهارت و راسل (bi و S^2_{di})، اکوالانس ریک (W_i^2)، واریانس شوکلا (σ^2_i)، پلا ستد ($\theta_{(i)}$) و آماره‌های ناپارامتری نصار و هان ($S^{(1)}$، $S^{(2)}$، $S^{(3)}$ و $S^{(6)}$)، تناراسو ($NP^{(3)}$ و $NP^{(4)}$) و مجموع رتبه‌های کانگ (KR) به‌عنوان پایدارترین ژنوتیپ شناسایی شد. همچنین ژنوتیپ ۱۵ بر اساس آماره‌های پارامتری با استفاده از آماره‌های اکوالانس ریک (W_i^2)، واریانس شوکلا (σ^2_i)، پلاستد ($\theta_{(i)}$)، ضریب تغییرات (CV) و آماره‌های ناپارامتری نصار و هان ($S^{(3)}$ و $S^{(6)}$)، تناراسو ($NP^{(2)}$ $NP^{(3)}$ و $NP^{(4)}$) و مجموع رتبه‌های کانگ (KR) جزو سه ژنوتیپ پایدار بود. بر اساس نتایج تجزیه پایداری با استفاده از روش چند متغیره GGE بای‌پلات، دو ژنوتیپ ۴ و ۱۵ به‌عنوان پایدارترین ژنوتیپ‌ها شناسایی شدند. به‌طوری که بررسی هم‌زمان سازگاری عمومی و عملکرد ژنوتیپ‌ها با استفاده از بای‌پلات مختصات محیط متوسط نشان داد که ژنوتیپ‌های ۱۷، ۴، ۱۱، ۹، ۲۳ و ۱۵ سازگارتر بوده و دارای بالاترین عملکرد بودند که از میان آن‌ها، ژنوتیپ‌های ۴ و ۱۵ دارای عملکرد دانه پایدارتری بودند. بر اساس بای‌پلات ژنوتیپ فرضی ایده‌آل، ژنوتیپ‌های ۴ و ۱۵ ازنظر هر دو عامل پایداری و میانگین عملکرد دانه، بهتر از سایر ژنوتیپ‌ها بودند و سازگاری عمومی بالایی در همه محیط های موردبررسی داشتند. امید است در آینده‌ای نزدیک از این‌های برتر شناسایی شده در این پژوهش رقمی جدید معرفی گردد.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

سپاسگزاری

مقاله حاضر از پروژه مصوب مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر به شماره ۹۹۱۲۳۳-۱۴۶-۰۳-۰۳-۰۰تهیه شده است. از همکاران پروژه غلات در مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان گلستان به جهت همکاری صمیمانه آن‌ها در انجام این پژوهش تقدیر و تشکر می‌شود.

منابع

Abyar, S., Navabpour, S., Karimizadeh, R., Nasrollahnejad Ghomi, A. A., Kiani, G., & Gholizadeh, A. (2021). Evaluation of genotype × environment interaction and grain yield stability of different bread wheat genotypes using non-parametric methods. *Cereal Research*, *11*(2), 89–104. (In Persian). https://doi.org/10.22124/cr.2021.20461.1687

Awoke, S., & Sharma, M. K. (2016). Parametric and non-parametric methods to describe genotype × environment interaction and grain yield stability of bread wheat. *Statistics and Applications*, *14*(1–2), 9–29.

Bakhtiar, F., Sharsoda, N., & Bagherikia, S. (2021). Evaluation of grain yield and some important agronomic traits in spring wheat international nurseries in moderate climate regions of Iran. *Applied Agricultural Research, 4*(33), 40-61. (In Persian). https://doi.org/10.22092/aj.2021.125628.1387

Barati, A., Pour-Aboughadareh, A., Zali, H., Gholipour, A., Koohkan, S., Shahbazihomounlo, K., … & Kheirgoo, M. (2025). Identification of high-yielding and stable barley genotypes for warm climates in Iran using the GGE

biplot method. *Iranian Journal of Genetics and Plant Breeding*, *14*(1), 1–8. https://doi.org/10.30479/ijgpb.2024.20098.1368

Eberhart, S. T., & Russell, W. A. (1966). Stability parameters for comparing varieties. *Crop Science*, *6*(1), 36–40. https://doi.org/10.2135/cropsci1966.0011183X000600010011x

Elias, A. A., Robbins, K. R., Doerge, R. W., & Tuinstra, M. R. (2016). Half a century of studying genotype × environment interactions in plant breeding experiments. *Crop Science*, *56*(5), 2090–2105. https://doi.org/10.2135/cropsci2015.01.0061

Esmaeilzadeh Moghaddam, M., Tahmasebi, S., Lotf Ali Ayeneh, Gh. A., Akbari Moghadam, H., Mahmoudi, Kh., Sayyahfar, M., Tabib Ghaffari, S. M., & Zali, H. (2018). Evaluation of grain yield stability of bread wheat (*Triticum aestivum* L.) promising lines in warm and dry regions of Iran. *Iranian Journal of Crop Sciences*, *20*(1), 270–283. (In Persian). https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.15625540.1397.20.1.5.8

Feyzbakhsh, M. T., & Khazaei, A. (2025). Interaction of genotype × environment on new hybrids yield of forage sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) using GGE biplot method. *Plant Production and Genetics*, *6*(1), 87–100. (In Persian). https:// 10.22034/PLANT.2025.143212.1151

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. http://dx.doi.org/10.1071/AR9630742

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*, 1029–1034. https://doi.org/10.4141/cjps78-157

Ghazvini, H., Bagherikia, S., Pour-Aboughadareh, A., Sharifalhossaini, M., Razavi, S. A., Mohammadi, S., … & Khakizade, G. (2022). GGE biplot analysis of promising barley lines in the cold regions of Iran. *Journal of Crop Improvement*, *36*(4), 461–472. https://doi.org/10.1080/15427528.2021.1977448

Ghazvini, H., Pour-Aboughadareh, A., Sharifalhosseini, M., Razavi, S. A., Mohammadi, S., Ghasemi Kalkhoran, M., & Khakizadeh, G. (2018). Phenotypic stability analysis of barley promising lines in the cold regions of Iran. *Crop Breeding Journal*, *8*, 17–29. https://doi.org/10.22092/cbj.2019.127226.1037

Huehn, M. (1990). Nonparametric measures of phenotypic stability. Part 1: Theory. *Euphytica*, *47*, 189–194. https://doi.org/10.1007/BF00024241

Jafari Nazarabadi, T., Nasrollahnezhad Ghomi, A. A., Kordenaeej, A., & Zenalinezhad, K. (2025). Evaluation of grain yield stability and allelic diversity of glutenin subunits with low molecular weight in advanced lines of bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *Journal of Plant Production Research*, *32*(2), 41–57. (In Persian). https://doi.org/10.22069/jopp.2024.22278.3131

Kang, M. S. (1988). A rank-sum method for selecting high-yielding, stable corn genotypes. *Cereal Research Communications*, *16*, 113–115. http://www.jstor.org/stable/23782771.

Kang, M. S. (2002). Genotype–environment interaction: Progress and prospects. In M. S. Kang (Ed.), *Quantitative genetics, genomics, and plant breeding* (pp. 221–243). CABI International, UK. https://doi.org/10.1079/9780851996011.0221

Karimizadeh, R., Hosseinpour, T., Sharifi, P., Jafarby, J. A., Shahbazi Homonlo, K., & Keshavarzi, K. (2021). Evaluation of grain yield stability of durum wheat genotypes using parametric and non-parametric methods. *Plant Genetic Research*, *8*(1), 115–132. (In Persian). https://doi.org/ 10.52547/pgr.8.1.8

Kaya, Y., & Turkoz, M. (2016). Evaluation of genotype by environment interaction for grain yield in durum wheat using non-parametric stability statistics. *Turkish Journal of Field Crops*, *21*(1), 51–59. https://doi.org/10.17557/tjfc.48198

Khalili, M., & Pour-Aboughadareh, A. (2016). Parametric and non-parametric measures for evaluating yield stability and adaptability in barley doubled haploid lines. *Journal of Agricultural Science and Technology*, *18*(3), 789–803. https://doi.org/20.1001.1.16807073.2016.18.3.20.2

Khodarahmi, M., Soughi, H., Jafarby, J., Khavarinejad, M. S., & Khanzadeh, H. (2021). Stability analysis of bread wheat genotypes using GGE biplot method in Caspian Sea regions. *Journal of Crop Breeding*, *13*(40), 83–90. (In Persian). https://doi.org/10.52547/jcb.13.40.83

Latifi, P., Najaphy, A., & Zarei, L. (2024). GGE biplot analysis of genotype × environment interaction in barley genotypes. *Plant Production and Genetics*, *5*(1), 47–64. (In Persian). https://doi.org/10.22034/PLANT.2024.141045.1090

Mazari, F. B. (2019). Iran's agricultural policy and the food security conundrum. *Journal for Iranian Studies*, *7*(18), 67.

Mohammadi, M., Karimizadeh, R., Hosseinpour, T., Ghojogh, H., Shahbazi, K., & Sharifi, P. (2025). Use of parametric and non-parametric methods for genotype × environment interaction analysis in bread wheat genotypes. *Plant Genetic Research*, 2, 1–12. https://doi.org/10.29252/pgr.4.2.75

Mohammadi, R., Armion, M., Sadeghzadeh, B., Golkari, S., Khalilzadeh, G. H., Ahmadi, H., Abedi-Asl, G. H., & Eskandari, M. (2016). Assessment of grain yield stability and adaptability of rainfed durum wheat breeding lines. *Applied Field Crops Research*, *29*(4), 25–42. (In Persian). https://doi.org/10.22092/aj.2017.102141.1037

Mut, Z., Aydin, N., Bayramoğlu, H. O., & Özcan, H. (2009). Interpreting genotype × environment interaction in bread wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes using nonparametric measures. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, *33*(2), 127–137. https://doi.org/10.3906/tar-0803-28

Najafi Mirak, T., Dastfal, M., Andarzian, B., Farzadi, H., Bahari, M., & Zali, H. (2018a). Evaluation of durum wheat cultivars and promising lines for yield and yield stability in warm and dry areas using AMMI model and GGE biplot. *Journal of Crop Breeding*, *10*(28), 1–12. (In Persian). https://doi.org/10.29252/jcb.10.28.1

Najafi Mirak, T., Dastfal, M., Andarzian, B., Farzadi, H., Bahari, M., & Zali, H. (2018b). Stability analysis of grain yield of durum wheat promising lines in warm and dry areas using parametric and non-parametric methods. *Journal of Crop Production and Processing*, *8*(2), 79–96. (In Persian). https://doi.org/10.29252/jcpp.8.2.79

Nassar, R., & Huehn, M. (1987). Studies on estimation of phenotypic stability: Tests of significance for non-parametric measures of phenotypic stability. *Biometrics*, *43*, 45–53. https://doi.org/10.1007/BF00024241

Plaisted, R. L. (1960). A shorter method for evaluating the ability of selections to yield consistently over locations. *American Potato Journal*, *37*, 166–172. https://doi.org/10.1007/BF02855271

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

Poehlman, J. M. (2013). *Breeding field crops.* Springer Science & Business Media, USA.

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), e1211. https://doi.org/10.1002/aps3.1211

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

Summers, C., & Goodman, S. (2020). Weaponizing Wheat. *Georgetown Journal of International Affairs, 21*, 62–70. https://www.jstor.org/stable/27088143

Thennarasu, K. (1995). On certain non-parametric procedures for studying genotype–environment interactions and yield stability. *Indian Journal of Genetics and Plant Breeding, 60*, 433–439.

Vaezi, B., Pour-Aboughadareh, A., Mehraban, A., Hossein-Pour, T., Mohammadi, R., Armion, M., & Dorri, M. (2018). The use of parametric and nonparametric measures for selecting stable and adapted barley lines. *Archives of Agronomy and Soil Science*, *64*(5), 597–611. https://doi.org/10.1080/03650340.2017.1369529

Vaezi, B., Pour-Aboughadareh, A., Mohammadi, R., Mehraban, A., Hossein-Pour, T., Koohkan, E., & Siddique, K. H. M. (2019). Integrating different stability models to investigate genotype × environment interactions and identify stable and high-yielding barley genotypes. *Euphytica*, *215*(4), 63. https://doi.org/10.1007/s10681-019-2386-5

Wricke, G. (1962). Über eine Methode zur Erfassung der ökologischen Streubreite in Feldversuchen. *Zeitschrift für Pflanzenzüchtung*, *47*, 92–96.

Yan, W. (2001). GGEbiplot—A Windows application for graphical analysis of multi-environment trial data and other types of two-way data. *Agronomy Journal*, *93*(5), 1111–1118. https://doi.org/10.2134/agronj2001.9351111x

Yan, W., & Kang, M. S. (2002). *GGE biplot analysis: A graphical tool for breeders, geneticists, and agronomists* (p. 288). CRC Press.

Yan, W., & Rajcan, I. (2002). Biplot analysis of test sites and trait relations of soybean in Ontario. *Crop Science*, *42*(1), 11–20. https://doi.org/10.2135/cropsci2002.1100

Yan, W., Frégeau-Reid, J., Pageau, D., Martin, R., Mitchell-Fetch, J., Etienne, M., Rowsell, J., Price, M. P., & de Haan, B. (2010). Identifying essential test locations for oat breeding in eastern Canada. *Crop Science*, *50*(2), 504–515. https://doi.org/10.2135/cropsci2009.03.0133