

Evaluation of bread wheat genotypes tolerance to seed aging at germination stage using quantitative stress tolerance indices

Sima Fatanatvash¹, Hadi Alipour^{2*}, Reza Darvishzadeh³, Mahdi Ghiyasi⁴

¹ Ph.D. student, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran, Email: sima.fatanat@yahoo.com

² Corresponding author, Faculty Member, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran, Email: ha.alipour@urmia.ac.ir

³ Faculty Member, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran, Email: r.darvishzadeh@urmia.ac.ir

⁴ Faculty Member, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran, Email: m.ghiasi@urmia.ac.ir

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Full Paper	Background and Objectives: Wheat, as one of the main food sources in the world, plays an important role in ensuring food security. In this context, the quality of wheat seeds is a key factor in the success of cultivation and achieving optimal yield in the field. One of the most important factors that can reduce seed quality is seed aging. This phenomenon occurs over time and as a result of seeds being exposed to unfavorable environmental conditions such as high temperature and humidity, especially during storage, and causes a decrease in germination capacity and weakness in the initial growth of seedlings. The aim of this study was to evaluate the viability of bread wheat genotypes using tolerance indices under accelerated aging conditions.
Article history: Received: 2025-7-13 Accepted: 2025-10-20	Materials and Methods: In this study, 228 bread wheat genotypes, including landraces and cultivars, were investigated as a factorial experiment in a completely randomized design under accelerated aging treatment at four levels of zero, 48, 72 and 96 hours in 2022-2023 year. Germination percentage was measured as an index of seed yield, and the response of genotypes to aging stress was evaluated using quantitative tolerance indices such as STI, GMP, YSI, MP, HAR, SSI, TOL, and the new WGMI index. Data analysis was performed using statistical methods of correlation coefficient, principal component analysis (PCA), and cluster analysis. Data correlation analysis was performed using SPSS version 26 software. Cluster analysis dendrograms (heatmaps) were prepared using the gplots, d3heatmap, and dendextend packages, and principal component analysis biplots were prepared using the factoextra and FactoMineR packages in R software version 4.3.2
Keywords: Aging stress seed quality WGMI index wheat	Results: Boxplot results showed that there was a significant statistical difference between different levels of accelerated aging in most of the indices ($P < 0.0001$). Based on all the studied indices except TOL and SSI, a significant decrease in germination percentage was observed with increasing aging time. The results of correlation analysis showed that indices such as STI, GMP, HAR, MP and YSI had a positive and significant correlation with performance under stress and effectively

identified resistant genotypes. In contrast, TOL and SSI indices showed a negative correlation with germination percentage under stress and helped identify sensitive genotypes. Based on the results of cluster analysis at accelerated aging levels of 48 and 72 hours, bread wheat genotypes were classified into three main groups in terms of the studied indices and based on germination percentage. At the accelerated aging level of 96 hours, the genotypes were placed in two main groups. The genotypes of the first group were identified as the best and most resistant genotypes to seed aging in all three stress levels. Based on the WGMI index, genotypes with stable and balanced performance in all aging stress levels were well distinguished. Based on the results obtained, the cultivars ALVAND, FONG and KARAJI, along with the landraces 626215, 627410, 626978, 627849, 624944, 627414, 623090 and 624846, are introduced as the most resistant genotypes to seed aging.

Conclusion: The findings of this study showed that the simultaneous use of different stress tolerance indices and multivariate statistical methods as an effective and accurate tool could help identify and select genotypes tolerant to seed aging. The genotypes identified in this study can be used as suitable parents in breeding programs to improve traits related to seed viability. These genotypes can also be used in genomic evaluation programs to identify genes and QTLs affecting seed vigor.

Cite this article: Fatanatvash, S., Alipour, H., Darvishzadeh, R., Ghiyasi, M. 2025. Evaluation of bread wheat genotypes tolerance to seed aging at germination stage using quantitative stress tolerance indices. *Crop Production Journal*, 18 (3), 83-102.



© The author(s)



[10.22069/ejcp.2025.23869.2696](https://doi.org/10.22069/ejcp.2025.23869.2696)

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources



ارزیابی تحمل ژنوتیپ‌های گندم نان به پیری بذر در مرحله جوانه‌زنی با شاخص‌های کمی تحمل

سیما فطانت‌وش^۱، هادی علی‌پور^{۲*}، رضا درویش‌زاده^۳، مهدی قیاسی^۴

^۱ دانشجوی دکتری، گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران. رایانامه: sima.fatanat@yahoo.com

^۲ نویسنده مسئول، عضو هیأت علمی، گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران. رایانامه: ha.alipour@urmia.ac.ir

^۳ عضو هیأت علمی، گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران. رایانامه: r.darvishzadeh@urmia.ac.ir

^۴ عضو هیأت علمی، گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران. رایانامه: m.ghiasi@urmia.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی- پژوهشی	سابقه و هدف: گندم به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین منابع غذایی در جهان، نقش مهمی در تأمین امنیت غذایی ایفا می‌کند. در این میان، کیفیت بذر گندم از عوامل کلیدی در موفقیت کشت و دستیابی به عملکرد مطلوب در مزرعه به‌شمار می‌رود. یکی از مهمترین عواملی که می‌تواند کیفیت بذر را کاهش دهد، پیری بذر است. این پدیده به‌مرور زمان و در نتیجه قرار گرفتن بذرها در شرایط نامطلوب محیطی مانند دما و رطوبت بالا به‌ویژه هنگام ذخیره‌سازی رخ می‌دهد و باعث کاهش توان جوانه‌زنی و ضعف در رشد اولیه گیاهچه‌ها می‌شود. هدف این مطالعه ارزیابی توان زنده‌مانی ژنوتیپ‌های گندم نان پیرو پیری تسریع‌شده با استفاده از شاخص‌های تحمل بود.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۴/۲۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۷/۲۹	مواد و روش‌ها: در این مطالعه، تعداد ۲۲۸ ژنوتیپ گندم نان شامل توده‌های بومی و ارقام زراعی بصورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی تحت تیمار پیری تسریع‌شده در چهار سطح صفر، ۴۸، ۷۲ و ۹۶ ساعت در سال ۱۴۰۱-۱۴۰۲ مورد بررسی قرار گرفتند. درصد جوانه‌زنی به‌عنوان شاخص عملکرد بذر اندازه‌گیری شد و با استفاده از شاخص‌های کمی تحمل از قبیل STI، TOL، SSI، HAR، MP، YSI، GMP و شاخص نوین WGMI واکنش ژنوتیپ‌ها به تنش پیری ارزیابی گردید. تجزیه و تحلیل داده‌ها با روش‌های آماری ضریب همبستگی، تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA) و تجزیه خوشه‌ای انجام شد. تجزیه همبستگی داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۶ انجام شد. دندروگرام تجزیه خوشه‌ای (هیت‌مپ) با استفاده از پکیج‌های dendextend، d3heatmap، gplots و نمودارهای بای‌پلات تجزیه به مؤلفه‌های اصلی با پکیج‌های FactoMineR و factoextra در نرم‌افزار RStudio نسخه ۴،۳،۲ تهیه شدند.
واژه‌های کلیدی: تنش پیری کیفیت بذر شاخص WGMI گندم	یافته‌ها: نتایج نمودار جعبه‌ای نشان داد که در اغلب شاخص‌ها بین سطوح مختلف پیری تسریع شده اختلاف آماری معنی‌دار وجود دارد ($P < 0/0001$). بر اساس تمامی شاخص‌های مورد مطالعه بجز TOL و SSI با افزایش مدت زمان پیری کاهش قابل ملاحظه‌ای در نمود جوانه‌زنی مشاهده شد. نتایج تجزیه همبستگی نشان داد که شاخص‌هایی نظیر STI، GMP، HAR، MP و YSI همبستگی مثبت و معنی‌داری با عملکرد تحت تنش داشتند و به‌طور مؤثری ژنوتیپ‌های

مقاوم را شناسایی کردند. در مقابل، شاخص‌های TOL و SSI با درصد جوانه‌زنی تحت تنش همبستگی منفی نشان دادند و به شناسایی ژنوتیپ‌های حساس کمک نمودند. بر اساس نتایج تجزیه خوشه‌ای در سطوح پیری تسریع شده ۴۸ و ۷۲ ساعت، ژنوتیپ‌های گندم نان از لحاظ شاخص‌های مورد مطالعه و بر پایه‌ی درصد جوانه‌زنی در سه گروه اصلی طبقه‌بندی شدند. در سطح پیری تسریع شده ۹۶ ساعت ژنوتیپ‌ها در دو گروه اصلی قرار گرفتند. ژنوتیپ‌های گروه اول در هر سه سطح تنش، به‌عنوان برترین و مقاوم‌ترین ژنوتیپ‌ها نسبت به پیری بذر شناسایی شدند. بر اساس شاخص WGMI ژنوتیپ‌هایی با عملکرد پایدار و متعادل در کلیه سطوح تنش پیری به‌خوبی تفکیک شدند. براساس نتایج به دست آمده، ارقام الوند، فونگ و کرج ۱ در کنار توده‌های بومی ۶۲۶۲۱۵، ۶۲۷۴۱۰، ۶۲۶۹۷۸، ۶۲۷۸۴۹، ۶۲۴۹۴۴، ۶۲۷۴۱۴، ۶۲۳۰۹۰ و ۶۲۴۸۴۶ به‌عنوان مقاوم‌ترین ژنوتیپ‌ها به پیری بذر معرفی می‌شوند.

نتیجه‌گیری: یافته‌های این پژوهش نشان داد که استفاده هم‌زمان از شاخص‌های مختلف تحمل تنش و روش‌های آماری چندمتغیره به‌عنوان ابزاری مؤثر و دقیق، توانست به شناسایی و انتخاب ژنوتیپ‌های متحمل به پیری بذر کمک کند. ژنوتیپ‌های شناسایی شده در این مطالعه می‌توانند به‌عنوان والدین مناسب در برنامه‌های اصلاح نژاد برای بهبود صفات مرتبط با ماندگاری بذر به کار گرفته شوند. این ژنوتیپ‌ها همچنین می‌توانند در برنامه‌های ارزیابی ژنومی جهت شناسایی ژن‌ها و QTL‌های مؤثر بر بنیه بذر مورد استفاده قرار گیرند.

استناد: فطانت وش، سیما؛ علی‌پور، هادی؛ درویش‌زاده، رضا، قیاسی، مهدی. (۱۴۰۴). ارزیابی تحمل ژنوتیپ‌های گندم نان به پیری بذر در مرحله جوانه‌زنی با شاخص‌های کمی تحمل. *مجله تولید گیاهان زراعی*، ۱۸ (۳)، ۸۳-۱۰۲.



[10.22069/ejcp.2025.23869.2696](https://doi.org/10.22069/ejcp.2025.23869.2696)

© نویسندگان

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان



مقدمه

غلات از دیرباز نقشی اساسی در تأمین نیازهای غذایی انسان ایفا کرده‌اند. در میان غلات، گندم به‌عنوان پرکشت‌ترین محصول زراعی در جهان و غذای اصلی اکثر کشورهای دارای اقلیم معتدل، بین ۲۰ تا ۵۰ درصد از کل انرژی دریافتی جمعیت‌های انسانی را تأمین می‌نماید (۱). استفاده از بذرهای باکیفیت در نظام‌های تولید زراعی از عوامل اصلی افزایش بهره‌وری محصول، پایداری عملکرد و حفظ تنوع ژنتیکی به شمار می‌رود (۲ و ۳). جوانه‌زنی بذر و بقاء گیاهچه از مراحل کلیدی در تجدید جمعیت و استمرار گونه‌های گیاهان دانه‌دار، به‌ویژه گندم، محسوب می‌گردند (۴). این دو مرحله به‌شدت تحت تأثیر عوامل غیرزیستی مانند دما، نور و رطوبت، و عوامل زیستی مانند مداخلات انسانی و عفونت‌های بیماری‌زا قرار می‌گیرند (۵ و ۶).

یکی از عوامل اصلی کاهش کیفیت بذر گندم در دوره ذخیره‌سازی، پیری بذر است که منجر به کاهش قابلیت زیستی و درصد جوانه‌زنی بذر می‌شود (۷). پیری بذر تحت تأثیر عواملی مانند دما و رطوبت قرار دارد، که این عوامل می‌توانند سرعت کاهش کیفیت بذر را افزایش دهند (۸). اگرچه پدیده پیری بذر می‌تواند تحت شرایط طبیعی و به‌مرور زمان اتفاق افتد، اما برای مطالعه و غربال‌گری ژنوتیپ‌ها، معمولاً از روش پیری تسریع‌شده (Accelerated Aging; AA) استفاده می‌شود (۹). این روش، شرایط تخریبی بذر را از طریق اعمال دما و رطوبت بالا در مدت زمان کوتاه، شبیه‌سازی کرده و تفاوت‌های ژنتیکی در مقاومت به پیری را نمایان می‌سازد.

محققان اصلاح نباتات معتقدند که برای افزایش بهره‌وری و توسعه ارقام مقاوم و سازگار در شرایط محیطی دشوار، لازم است صفاتی که در مواجهه با تنش‌های غیرزیستی باعث بهبود عملکرد محصول

می‌شوند، شناسایی و مورد استفاده قرار گیرند (۱۰). این صفات علاوه بر تأثیر بر عملکرد کلی محصول، به‌عنوان معیارهای کلیدی در فرآیند انتخاب و اصلاح‌نژاد اهمیت دارند. تنش‌های غیرزیستی می‌توانند در تمامی مراحل رشد گیاه، از جوانه‌زنی تا رشد کامل و پر شدن دانه اثرگذار باشند (۱۱) و این در حالی است که جوانه‌زنی، به‌عنوان یک مرحله کلیدی در چرخه زندگی گیاه، اغلب به‌عنوان یک گام ضروری برای افزایش تولید نادیده گرفته می‌شود (۱۲). تضمین سطح سبز یکنواخت با جوانه‌زنی سریع و مداوم، گامی مهم برای بهبود تولید تجاری محصول گندم است (۱۳). پیری بذر به‌عنوان یکی از چالش‌های مهم غیرزیستی، نقش قابل توجهی در کاهش جوانه‌زنی و کیفیت بذر ایفا می‌کند؛ بنابراین، باید در برنامه‌های اصلاح نژاد مورد توجه ویژه قرار گیرد.

شاخص‌های متعددی توسط محققین برای ارزیابی عکس‌العمل گیاهان در شرایط تنش مورد استفاده قرار گرفته است. از جمله این شاخص‌ها می‌توان به شاخص حساسیت به تنش^۱ SSI (۱۴)، شاخص تحمل^۲ TOL (۱۵)، شاخص میانگین بهره‌وری^۳ MP (۱۵)، شاخص میانگین هندسی بهره‌وری^۴ GMP (۱۶)، شاخص تحمل به تنش^۵ STI (۱۶)، شاخص پایداری عملکرد^۶ YSI (۱۷) و شاخص میانگین هارمونیک^۷ HAR (۱۸) اشاره کرد. در مطالعات متعددی، MP، GMP و STI به‌عنوان مناسب‌ترین شاخص‌ها برای گزینش ژنوتیپ‌ها در شرایط تنش شناسایی شده‌اند (۱۰، ۱۹ و ۲۰). با این حال، بسیاری

¹ Stress Susceptibility Index

² Tolerance Index

³ Mean Productivity

⁴ Geometric Mean Productivity

⁵ Stress Tolerance Index

⁶ Yield Stability Index

⁷ Harmonic Mean

از این شاخص‌ها پیچیدگی‌های خاص خود را دارند و ممکن است اطلاعات دقیقی درباره توانایی تولید ژنوتیپ‌های مقاوم به تنش ارائه ندهند. تمرکز اصلی در برنامه‌های اصلاح نباتات بر شناسایی ژنوتیپ‌های با عملکرد بالا و مقاوم به تنش است. در این راستا، شاخص میانگین هندسی وزنی^۱ WGMI به‌عنوان روشی مناسب برای شناسایی این ژنوتیپ‌ها معرفی شده است (۲۱). اگرچه این شاخص‌ها عمدتاً برای ارزیابی عملکرد گیاهان تحت تنش خشکی توسعه یافته‌اند و در مطالعات متعددی برای بررسی دقیق‌تر اثرات این تنش به‌کار رفته‌اند (۱۰، ۲۲، ۲۳ و ۲۴)، اما قابلیت استفاده آن‌ها در ارزیابی پاسخ گیاه یا بذر به سایر تنش‌های غیرزیستی نظیر پیری بذر نیز وجود دارد. در مطالعه حاضر، این شاخص‌ها که بر اساس درصد جوانه‌زنی محاسبه شدند، به منظور ارزیابی توان زنده‌مانی ژنوتیپ‌های گندم تحت شرایط پیری تسریع شده به‌کار گرفته شده‌اند، تا بتوان توانایی ژنوتیپ‌ها را در تحمل به این تنش مهم بررسی و آنها را گروه‌بندی نمود. این رویکرد می‌تواند ابزاری موثر برای شناسایی ارقام مقاوم به پیری بذر و بهبود برنامه‌های اصلاح نژاد باشد.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش، با هدف غربال ژنوتیپ‌های گندم نان از نظر واکنش به پیری بذر، مجموعه‌ای شامل ۲۲۸ نمونه متنوع، مشتمل بر ۱۶۱ توده بومی از نقاط مختلف کشور و ۶۷ رقم زراعی، انتخاب و مورد ارزیابی قرار گرفتند (جدول تکمیلی ۱). آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی و با سه تکرار در آزمایشگاه بذر دانشکده کشاورزی دانشگاه ارومیه در سال ۱۴۰۱-۱۴۰۲ اجرا شد. فاکتورهای مورد بررسی شامل ژنوتیپ و پیری تسریع

شده در چهار سطح به مدت‌های ۰، ۴۸، ۷۲ و ۹۶ ساعت بودند. فرآیند پیری تسریع شده با خیساندن بذور در محلول ۱۰ درصد هیپوکلریت سدیم به مدت دو دقیقه آغاز شد. پس از آن، بذور با دقت و سه بار با آب مقطر شستشو شدند تا هر گونه اثر ماده ضدعفونی کننده از بین برود. سپس، تعداد ۳۰۰ بذر از هر ژنوتیپ در پارچه‌های توری بسته بندی شده و داخل دسیکاتور که کف آن‌ها با مقدار مشخصی آب مقطر پر شده بود (بدون تماس مستقیم بذر با آب)، برای حفظ رطوبت نزدیک به ۱۰۰ درصد، قرار گرفتند. دسیکاتور پس از مهر و موم شدن با پارافیل، به مدت زمان‌های مختلف (صفر، ۴۸، ۷۲ و ۹۶ ساعت) در دمای ۴۵ درجه سانتی‌گراد درون ژرمیناتور قرار گرفت (۲۵ و ۲۶).

برای سنجش کیفیت جوانه‌زنی پس از سپری شدن تیمارهای پیری، آزمون استاندارد جوانه‌زنی بر اساس پروتکل انجمن بین‌المللی آزمون بذر (International Seed Testing Association; ISTA) انجام گرفت. در این آزمایش، سه تکرار ۲۵ تایی از بذور هر تیمار و هر ژنوتیپ روی دو لایه کاغذ صافی در پتری‌دیش‌های ۱۰ سانتی‌متری، به روش بین کاغذ قرار داده شدند و با آب مقطر آبیاری شدند. پتری‌دیش‌ها به مدت ۸ روز در دمای بهینه ۲۰ درجه سانتی‌گراد تحت شرایط کنترل شده داخل ژرمیناتور قرار گرفتند (۲۷). شمارش بذور جوانه‌زده به صورت روزانه انجام شد و ظهور ریشه‌چه به طول حداقل دو میلی‌متر به عنوان معیار جوانه‌زنی بذر لحاظ گردید (۲۸). درصد جوانه‌زنی به‌عنوان یکی از شاخص‌های پایه، بر اساس دستورالعمل (ISTA 2008) اندازه‌گیری شد (۲۹). سپس با استفاده از داده‌های به‌دست‌آمده در محیط‌های نرمال و سطوح مختلف پیری، شاخص‌های مختلف تحمل به پیری محاسبه و بر این اساس ژنوتیپ‌های متحمل از حساس جدا شدند. شاخص‌های کمی

¹ Weighted Geometric Mean

۲۶ انجام شد. دندروگرام تجزیه خوشه‌ای (هیت‌مپ) با استفاده از پکیج‌های `gplots`، `d3heatmap`، `dendextend` و نمودارهای بای‌پلات تجزیه به مؤلفه‌های اصلی با پکیج‌های `factoextra` و `FactoMineR` در نرم‌افزار RStudio نسخه ۴٫۳٫۲ تهیه شدند. در تجزیه خوشه‌ای و رسم `Heatmap` از روش `Ward` استفاده شد.

تحمل براساس درصد جوانه‌زنی ژنوتیپ‌ها در شرایط نرمال (۰ ساعت، Y_p) و شرایط تنش شامل سه سطح پیری تسریع شده (۴۸، ۷۲ و ۹۶ ساعت، Y_s) و همچنین میانگین درصد جوانه‌زنی ژنوتیپ‌ها در این شرایط محاسبه شدند. جزئیات شاخص‌ها و روش محاسبه آن‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

برای ترسیم نمودارهای جعبه‌ای، از پلتفرم آنلاین

<https://www.bioinformatics.com.cn/en>

استفاده شد. تجزیه همبستگی با نرم‌افزار SPSS نسخه

جدول ۱- شاخص‌های کمی برای ارزیابی تحمل به پیری بذر در ژنوتیپ‌های گندم نان

Table 1. Quantitative indices for evaluating seed aging tolerance in bread wheat genotypes

شاخص	فرمول	منبع
Index	Formula	Reference
شدت تنش	$SI = 1 - \left[\frac{Y_s}{Y_p} \right]$	(۱۴)
شاخص حساسیت به تنش	$SSI = \frac{1 - \frac{Y_s}{Y_p}}{SI}$	(۱۴)
شاخص تحمل	$TOL = Y_p - Y_s$	(۱۵)
میانگین بهره‌وری	$MP = \frac{Y_s + Y_p}{2}$	(۱۵)
شاخص تحمل به تنش	$STI = \frac{Y_s \times Y_p}{Y_p^2}$	(۱۶)
میانگین هندسی بهره‌وری	$GMP = \sqrt{(Y_s \times Y_p)}$	(۱۶)
شاخص پایداری عملکرد	$YSI = \frac{Y_s}{Y_p}$	(۱۷)
میانگین هارمونیک	$HAR = \frac{2(Y_p \times Y_s)}{Y_p + Y_s}$	(۱۸)
شاخص میانگین هندسی وزنی	$WGMI = \text{Antilog} \frac{\sum W \log X}{\sum W}$	(۲۱)

Y_s : عملکرد تحت شرایط تنش، Y_p : عملکرد تحت شرایط نرمال، Y_s : میانگین عملکرد در شرایط تنش، Y_p : میانگین عملکرد در شرایط نرمال، W : وزن، X : مقدار.

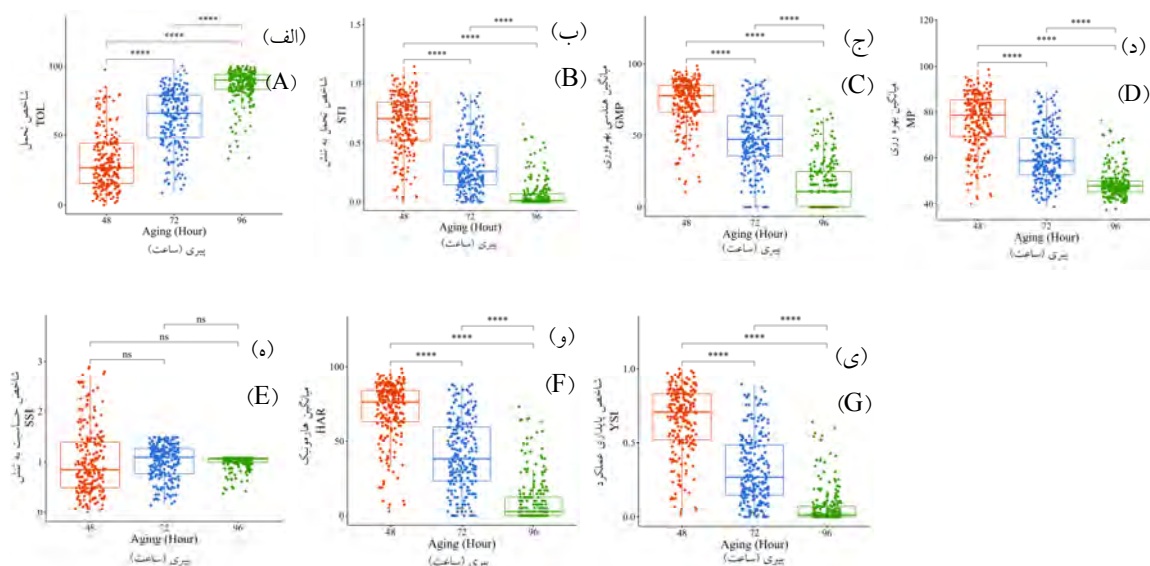
شاخص‌ها، تفاوت‌های آماری معنی‌دار بین سطوح مختلف پیری وجود دارد. شاخص TOL که نشان‌دهنده اختلاف عملکرد بین شرایط نرمال و تنش است، به‌طور معنی‌داری از ۴۸ به ۹۶ ساعت افزایش یافت ($P < 0.0001$). این افزایش بیانگر کاهش تحمل ژنوتیپ‌ها و افزایش حساسیت عملکرد (درصد جوانه‌زنی) به تنش شدیدتر پیری در سطح ۹۶ ساعت است. در مقابل، شاخص‌های STI ، GMP و MP که

نتایج و بحث

تغییرات شاخص‌های تحمل به پیری تسریع‌شده TOL ، STI ، GMP ، MP ، SSI ، HAR و YSI در ژنوتیپ‌های گندم نان، در سه سطح زمانی ۴۸، ۷۲ و ۹۶ ساعت بررسی شدند (شکل ۱). در این تحلیل شاخص‌ها، براساس درصد جوانه‌زنی (GP) در شرایط نرمال و تحت شرایط تنش پیری محاسبه شدند. نتایج نمودارهای جعبه‌ای نشان داد که در اغلب

همخوانی داشت. آن‌ها نیز گزارش کردند که ثبات نسبی مقادیر SSI در شرایط مختلف تنش، نشان‌دهنده حساسیت کمتر این شاخص نسبت به نوسانات عملکرد بوده و بیانگر آن است که SSI تغییرات کمتری نسبت به سایر شاخص‌ها دارد (۳۴). برای شاخص‌های HAR و YSI نیز روندی مشابه STI مشاهده شد، به‌طوری که در پیری ۴۸ ساعت میانگین بالاتر و در پیری ۹۶ ساعت افت چشمگیر نشان دادند. این روند کاهش نشان می‌دهد که افزایش مدت زمان پیری منجر به کاهش کارایی و ثبات در درصد جوانه‌زنی ژنوتیپ‌ها می‌شود. در مجموع، نتایج این بخش تأکید می‌کند که افزایش مدت زمان تنش پیری، تأثیر منفی معنی‌دار بر عملکرد جوانه‌زنی و پایداری ژنوتیپ‌ها دارد.

همگی نشان‌دهنده عملکرد و پایداری ژنوتیپ‌ها در شرایط تنش و نرمال هستند، در سطح ۴۸ ساعت بالاترین میانگین را داشتند و با افزایش مدت زمان پیری، به‌ویژه در ۹۶ ساعت، کاهش شدیدی نشان دادند ($P < 0.0001$). این کاهش معنی‌دار نشان‌دهنده افت عمومی توان جوانه‌زنی ژنوتیپ‌ها با تشدید شرایط پیری است. تحقیقات در سایر گیاهان مانند کلزا (۳۰)، لوبیا (۳۱)، یونجه (۳۲) و ذرت (۳۳) نشان دهنده کاهش شاخص‌های جوانه‌زنی با افزایش دوره پیری تسریع شده است. شاخص SSI برخلاف سایر شاخص‌ها، در هیچ‌یک از سطوح زمانی تفاوت معنی‌داری نشان نداد، که می‌تواند ناشی از پایداری نسبی نرخ کاهش درصد جوانه‌زنی در میان ژنوتیپ‌ها باشد. این نتایج با نتایج مطالعه‌ی خوجم‌لی و همکاران (۲۰۲۱) در جو تحت تنش خشکی انتهای دوره



شکل ۱- نمودار جعبه‌ای شاخص‌های تحمل برپایه درصد جوانه‌زنی در سطوح پیری تسریع شده ۴۸، ۷۲ و ۹۶ ساعت.

Figure 1. Box plot of tolerance indices based on germination percentage at accelerated aging levels of 48, 72, and 96 hours.

از پیری تسریع شده (۴۸، ۷۲ و ۹۶ ساعت) نشان داد که مقادیر شاخص‌هایی نظیر STI، GMP، MP، HAR و YSI در تمامی سطوح تنش، ارتباط مثبت و

تحلیل همبستگی شاخص‌های تحمل تنش: بررسی ضرایب همبستگی بین درصد جوانه‌زنی و شاخص‌های مختلف تحمل تنش در سه سطح زمانی

منفی قوی و معنی‌داری با درصد جوانه‌زنی تحت تنش نشان دادند. به‌ویژه در سطح پیری ۹۶ ساعت، درصد جوانه‌زنی در این سطح دارای ضریب همبستگی بسیار قوی و منفی با شاخص SSI (-0.999) و شاخص TOL (-0.907) بود که مقادیر بالا در این شاخص‌ها نشان‌دهنده حساسیت بیشتر ژنوتیپ‌ها به تنش پیری است. همچنین، مشاهده شد که همبستگی بین درصد جوانه‌زنی در شرایط نرمال (GP 0h) با درصد جوانه‌زنی تحت تنش و شاخص‌های تحمل تنش، ضعیف یا غیرمعنی‌دار است. این موضوع نشان می‌دهد که انتخاب ژنوتیپ‌ها تنها بر اساس عملکرد در شرایط نرمال می‌تواند گمراه‌کننده باشد و ارزیابی دقیق در شرایط تنش واقعی ضروری است.

بسیار معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد با درصد جوانه‌زنی تحت تنش داشتند. همچنین بین شاخص‌های فوق همبستگی مثبت و معنی‌داری مشاهده شد (جداول ۲، ۳ و ۴). همبستگی معنی‌دار بین این شاخص‌ها نشان می‌دهد که می‌توان از آن‌ها به‌عنوان مبنایی مؤثر برای شناسایی و انتخاب ژنوتیپ‌های متحمل استفاده کرد. این شاخص‌ها ابزارهای مناسبی برای غربالگری ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی و سایر تنش‌های غیرزیستی به‌ویژه در مراحل حساس رشد مانند جوانه‌زنی به‌شمار می‌روند (۳۴). این شاخص‌ها با بالا بردن دقت انتخاب، امکان شناسایی ژنوتیپ‌هایی با عملکرد پایدار در شرایط تنش را فراهم می‌آورند. از سوی دیگر، شاخص‌های TOL و SSI در هر سه سطح تنش پیری، همبستگی

جدول ۲- ضرایب همبستگی بین شاخص‌های تحمل تنش در صفت درصد جوانه‌زنی تحت تنش پیری تسریع شده ۴۸ ساعت

Table 2. Correlation coefficients between stress tolerance indices in the germination percentage trait under 48-hour accelerated aging stress

	درصد جوانه‌زنی در سطح نرمال GP 0h	درصد جوانه‌زنی در ۴۸ ساعت GP 48h	شاخص تحمل TOL	شاخص تحمل به تنش STI	میانگین هندسی بهره‌وری GMP	میانگین بهره‌وری MP	شاخص حساسیت به تنش SSI	میانگین هارمونیک HAR	شاخص پایداری عملکرد YSI
GP 48h	0.447**								
شاخص تحمل TOL	-0.235**	-0.975**							
شاخص تحمل به تنش STI	0.545**	0.992**	-0.941**						
میانگین هندسی بهره‌وری GMP	0.522**	0.983**	-0.937**	0.982**					
میانگین بهره‌وری MP	0.604**	0.983**	-0.917**	0.996**	0.983**				
شاخص حساسیت به تنش SSI	-0.298**	-0.965**	0.974**	-0.939**	-0.929**	-0.921**			
میانگین هارمونیک HAR	0.489**	0.984**	-0.947**	0.979**	0.999**	0.977**	-0.937**		
شاخص پایداری عملکرد YSI	0.328**	0.990**	-0.993**	0.963**	0.964**	0.949**	-0.975**	0.971**	

GP0h: درصد جوانه‌زنی در سطح نرمال، GP 48h: درصد جوانه‌زنی در سطح ۴۸ ساعت، TOL: شاخص تحمل، STI: شاخص تحمل به تنش، GMP:

میانگین هندسی بهره‌وری، MP: میانگین بهره‌وری، SSI: شاخص حساسیت به تنش، HAR: میانگین هارمونیک و YSI: شاخص پایداری عملکرد

جدول ۳- ضرایب همبستگی بین شاخص‌های تحمل به تنش در صفت درصد جوانه‌زنی تحت تنش پیری تسریع شده ۷۲ ساعت
Table 3. Correlation coefficients between stress tolerance indices in the germination percentage trait under 72-hour accelerated aging stress

شاخص	شاخص	شاخص	شاخص	میانگین	میانگین	شاخص	میانگین	شاخص
پایداری	حساسیت به	میانگین	تحمل به	هندسی	بهره‌وری	تحمل به	میانگین	پایداری
عملکرد	تنش	بهره‌وری	تنش	بهره‌وری	MP	SSI	HAR	YSI
				GMP				
درصد	درصد	درصد	درصد	درصد	درصد	درصد	درصد	درصد
جوانه‌زنی	جوانه‌زنی	جوانه‌زنی	جوانه‌زنی	جوانه‌زنی	جوانه‌زنی	جوانه‌زنی	جوانه‌زنی	جوانه‌زنی
در صفر	در ۷۲	در ۷۲	در ۷۲	در ۷۲	در ۷۲	در ۷۲	در ۷۲	در ۷۲
ساعت	ساعت	ساعت	ساعت	ساعت	ساعت	ساعت	ساعت	ساعت
GP 0h	GP 72h	GP 72h	GP 72h	GP 72h	GP 72h	GP 72h	GP 72h	GP 72h
GP 72h	0.266**							
شاخص تحمل								
TOL	-0.028	-0.971**						
شاخص تحمل به تنش								
STI	0.321**	0.997**	-	0.954**				
میانگین هندسی بهره‌وری								
GMP	0.332**	0.964**	-	0.917**	0.963**			
میانگین بهره‌وری								
MP	0.464**	0.977**	-	0.899**	0.987**	0.959**		
شاخص حساسیت به تنش								
SSI	-0.195**	-0.994**	0.982**	-0.985**	-0.951**	-0.956**		
میانگین هارمونیک								
HAR	0.297**	0.986**	-	0.949**	0.983**	0.990**	0.971**	-0.978**
شاخص پایداری عملکرد								
YSI	0.205**	0.997**	-	0.983**	0.988**	0.959**	0.961**	-0.997**
								0.982**

GP0h: درصد جوانه‌زنی در سطح نرمال، GP 72h: درصد جوانه‌زنی در سطح ۷۲ ساعت، TOL: شاخص تحمل، STI: شاخص تحمل به تنش، GMP: میانگین هندسی بهره‌وری، MP: میانگین بهره‌وری، SSI: شاخص حساسیت به تنش، HAR: میانگین هارمونیک و YSI: شاخص پایداری عملکرد

جدول ۴- ضرایب همبستگی بین شاخص‌های تحمل به تنش در صفت درصد جوانه‌زنی تحت تنش پیری تسریع شده ۹۶ ساعت
Table 4. Correlation coefficients between stress tolerance indices in the germination percentage trait under 96-hour accelerated aging stress

شاخص	شاخص	شاخص	شاخص	میانگین	میانگین	شاخص	میانگین	شاخص
پایداری	حساسیت به	میانگین	تحمل به	هندسی بهره‌وری	بهره‌وری	تحمل به	میانگین	پایداری
عملکرد	تنش	بهره‌وری	تنش	بهره‌وری	MP	SSI	HAR	YSI
				GMP				
درصد جوانه‌زنی	درصد جوانه‌زنی	درصد جوانه‌زنی	درصد جوانه‌زنی	درصد جوانه‌زنی	درصد جوانه‌زنی	درصد جوانه‌زنی	درصد جوانه‌زنی	درصد جوانه‌زنی
زنی در صفر	زنی در ۹۶	زنی در ۹۶	زنی در ۹۶	زنی در ۹۶	زنی در ۹۶	زنی در ۹۶	زنی در ۹۶	زنی در ۹۶
ساعت	ساعت	ساعت	ساعت	ساعت	ساعت	ساعت	ساعت	ساعت
GP 0h	GP 96h	GP 96h	GP 96h	GP 96h	GP 96h	GP 96h	GP 96h	GP 96h
GP 96h	0.071							
شاخص تحمل								
TOL	0.356**	-0.907**						
شاخص تحمل به تنش								
STI	0.093	0.999**	-0.896**					
میانگین هندسی بهره‌وری								
GMP	0.118	0.927**	-0.819**	0.930**				
میانگین بهره‌وری								
MP	0.463**	0.917**	-0.664**	0.925**	0.871**			
شاخص حساسیت به تنش								
SSI	-0.047	-0.999**	0.916**	-0.994**	-0.922**	-0.906**		
میانگین هارمونیک								
HAR	0.092	0.991**	-0.889**	0.991**	0.963**	0.917**	-0.987**	
شاخص پایداری عملکرد								
YSI	0.047	0.999**	-0.916**	0.994**	0.922**	0.906**	-1.000**	0.987**

GP0h: درصد جوانه‌زنی در سطح نرمال، GP 96h: درصد جوانه‌زنی در سطح ۹۶ ساعت، TOL: شاخص تحمل، STI: شاخص تحمل به تنش، GMP: میانگین هندسی بهره‌وری، MP: میانگین بهره‌وری، SSI: شاخص حساسیت به تنش، HAR: میانگین هارمونیک و YSI: شاخص پایداری عملکرد

شاخص‌های مختلف تحمل به خشکی شدند. براساس نتایج، همبستگی مثبت معنی‌داری بین شاخص‌های مختلف مانند STI، MP، HAR و GMP مشاهده گردید. این همبستگی می‌تواند به عنوان یک ابزار مؤثر

شیرازی و همکاران (۲۰۱۶) با بررسی داده‌های حاصل از اندازه‌گیری صفات، به‌ویژه وزن خشک ریشه‌چه و ساقه‌چه، در شرایط نرمال و تحت تنش خشکی ناشی از پلی‌اتیلن گلیکول موفق به محاسبه

در بهبود و انتخاب ژنوتیپ‌های مقاوم در مرحله جوانه‌زنی در برنامه‌های به‌نژادی مورد استفاده قرار گیرد (۱۰).

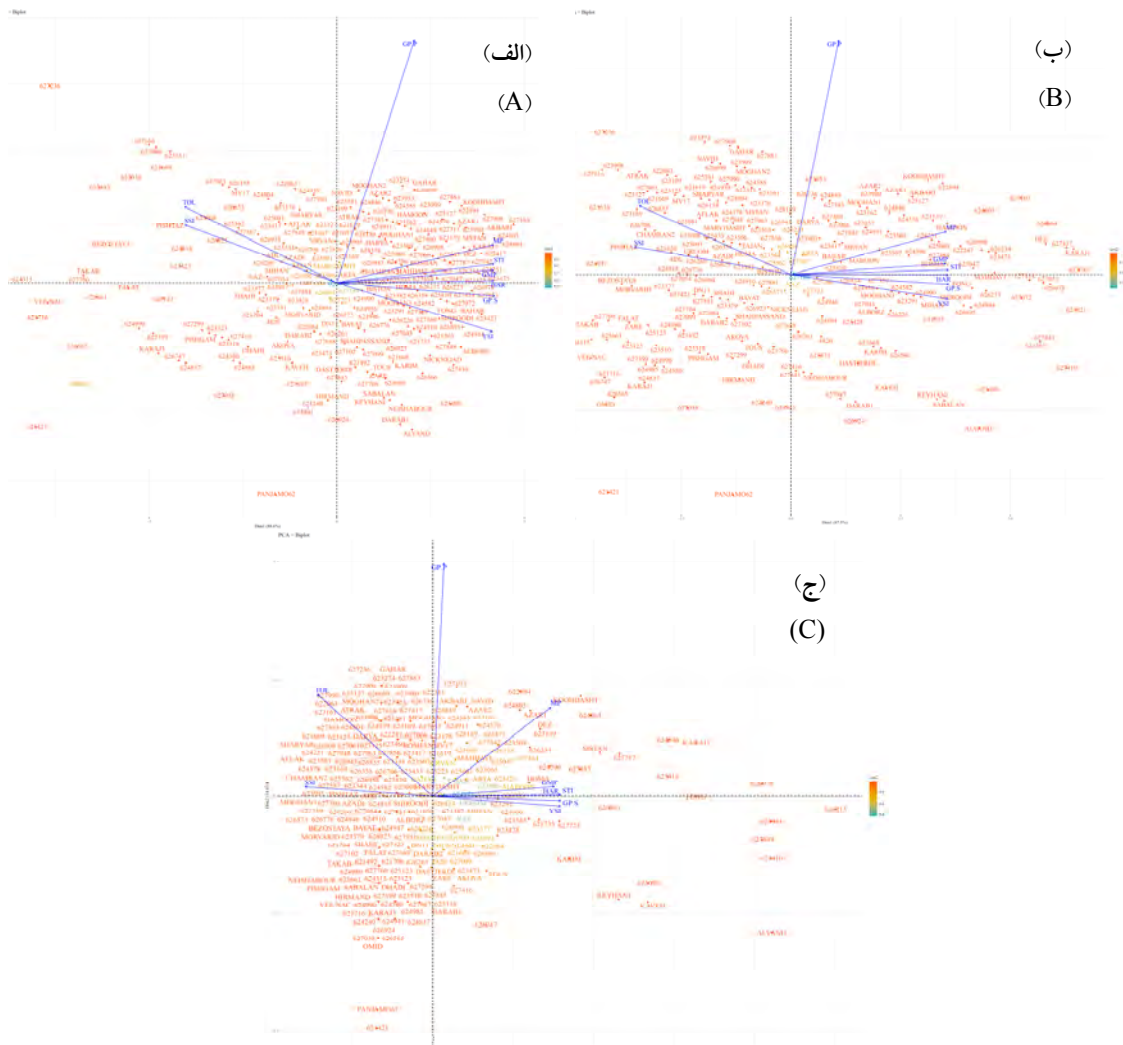
تجزیه به مؤلفه‌های اصلی: بای‌پلات و تحلیل PCA ابزاری قدرتمند برای شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل و حساس در شرایط مختلف بوده و می‌تواند در انتخاب ارقام برتر برای برنامه‌های اصلاح نژاد مؤثر باشد (۳۵). به‌منظور بررسی و تحلیل عملکرد ژنوتیپ‌های گندم تحت شرایط نرمال و تنش پیری ۴۸ ساعت، از تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA) استفاده شد. در بای‌پلات حاصل دو مؤلفه اصلی اول، به‌ترتیب ۸۸/۶ و ۱۰/۴ درصد از تغییرات کل داده‌ها را توجیه نمودند و تصویری جامع از پراکندگی ژنوتیپ‌ها و ارتباط شاخص‌ها ارائه دادند (شکل ۲الف). بردارهای شاخص‌هایی نظیر STI، GMP، MP، HAR و YSI که معرف عملکرد بالا و پایداری ژنوتیپ‌ها در سطوح مختلف پیری هستند، در جهت مشابه و مشخصی قرار داشتند. این در حالی بود که بردارهای SSI و TOL که نشان‌دهنده حساسیت ژنوتیپ‌ها به تنش می‌باشند، در جهتی مخالف این شاخص‌ها قرار داشتند. این ارتباط از آن جهت قابل توجه است که کوسینوس زاویه بین بردارهای متغیرها در بای‌پلات معادل تقریبی ضریب همبستگی آن‌ها است و هرچه زاویه بین بردارهای متغیرها کمتر باشد، ارتباط یا همبستگی بین آن‌ها قوی‌تر است (۳۶). بر اساس موقعیت ژنوتیپ‌ها در بای‌پلات، مشخص شد که ژنوتیپ‌هایی مانند ۶۲۷۴۱۷، ۶۲۷۹۰۸، ۶۲۷۱۰۳، ۶۲۴۸۶۴، ۶۲۷۴۱۷ و ۶۲۴۸۰۵ به شاخص‌های MP، GMP، STI و HAR نزدیک بوده و عملکرد جوانه‌زنی و پایداری بالایی در هر دو شرایط نرمال و تنش نشان دادند و بنابراین به‌عنوان ژنوتیپ‌های مقاوم و مطلوب معرفی می‌شوند. همچنین، بر اساس شاخص YSI، ژنوتیپ‌هایی مانند ۶۲۳۴۲۱، ۶۲۷۴۱۰، ۶۲۷۱۰۳ و البرز به‌عنوان ژنوتیپ‌های دارای پایداری عملکرد بالا شناسایی

شدند. از سوی دیگر، ژنوتیپ‌هایی که در نزدیکی بردارهای SSI و TOL قرار داشتند، از جمله ژنوتیپ‌های ۶۲۷۶۱۶، ۶۲۵۴۳۳، ۶۲۳۳۳۸ و ۶۲۳۹۰۸ کاهش عملکرد و حساسیت بیشتری نسبت به تنش پیری نشان دادند و به‌عنوان ژنوتیپ‌های حساس طبقه‌بندی شدند. هرچند پایین بودن مقدار شاخص TOL می‌تواند نشانه‌ای از پایداری عملکرد تحت تنش باشد، اما به‌تنهایی بیانگر عملکرد بالا در شرایط بدون تنش نیست؛ زیرا ممکن است ژنوتیپ مورد نظر در هر دو شرایط عملکرد پایینی داشته باشد و صرفاً به دلیل افت کمتر عملکرد، دارای مقدار TOL کوچک‌تری باشد (۲۳).

در ادامه، عملکرد جوانه‌زنی ژنوتیپ‌های گندم در دو سطح نرمال و تنش پیری ۷۲ ساعت با استفاده از بای‌پلات (PCA) و شاخص‌های تحمل مورد تحلیل قرار گرفت (شکل ۲ب). مؤلفه اول ۸۷/۵ درصد و مؤلفه دوم ۱۱/۶ درصد از واریانس داده‌ها را توجیه کردند. بردارهای مربوط به شاخص‌های MP، GMP، STI، HAR و YSI به هم نزدیک بودند، که نشان‌دهنده همبستگی مثبت بالای این شاخص‌ها با یکدیگر است. در مقابل، زاویه بزرگ‌تر بردارهای TOL و SSI نسبت به سایر شاخص‌ها مشاهده شد که بیانگر همبستگی نسبتاً ضعیف این شاخص‌ها با سایرین بود. بر اساس موقعیت ژنوتیپ‌ها و شاخص‌ها در بای‌پلات، ژنوتیپ‌های ۶۲۷۷۸۷، ۶۲۷۴۱۷، ۶۲۱۵۶۵، ۶۲۷۴۱۰، ۶۲۶۹۷۸، ۶۲۴۸۶۴، ۶۲۳۴۲۱، ۶۲۷۲۳۶ و ۶۲۷۶۱۶، ژنوتیپ‌های MP، GMP، STI، HAR و YSI را در هر دو شرایط نرمال و تنش پیری نشان دادند و به‌عنوان ژنوتیپ‌های مقاوم و مطلوب شناسایی شدند. در مقابل، ژنوتیپ‌های ۶۲۷۲۳۶، ۶۲۷۶۱۶، ۶۲۳۹۰۸ و ۶۲۳۳۳۸ بر اساس شاخص‌های TOL و SSI به‌عنوان ژنوتیپ‌های حساس شناسایی شدند و کاهش عملکرد بیشتری در شرایط تنش پیری داشتند.

با سایر شاخص‌ها است. بر اساس بای پلات پراکنش ژنوتیپ‌ها و شاخص‌ها، ژنوتیپ‌هایی مانند ۶۲۶۲۱۵، ۶۲۴۹۴۴، ۶۲۴۷۱۰، ۶۲۶۹۷۸، ۶۲۷۸۴۹، الوند، فونگ و کرج ۱ از نظر شاخص‌های GMP، HAR، STI و YSI و همچنین ژنوتیپ‌های کوه‌دشت، ۶۲۴۸۴۶ و ۶۲۴۸۶۴ از نظر شاخص MP عملکرد و پایداری بالایی در هر دو شرایط نرمال و تنش نشان دادند. ژنوتیپ‌های ۶۲۷۲۶۳، ۶۲۳۲۷۴ و ۶۲۷۸۸۳ بر اساس شاخص TOL و ژنوتیپ‌های ۶۲۳۰۹۱، ۶۲۷۴۶۰ و ۶۲۷۵۸۷ بر اساس شاخص SSI به‌عنوان ژنوتیپ‌های حساس به تنش شناخته شدند.

در نهایت، عملکرد جوانه‌زنی ژنوتیپ‌های گندم در دو سطح نرمال و تنش پیری ۹۶ ساعت و شاخص‌های تحمل مورد تحلیل قرار گرفت (شکل ۲). مؤلفه اول و دوم به‌ترتیب ۸۳/۷ و ۱۴/۸ درصد از تغییرات موجود در داده‌ها را توجیه نمودند. با توجه به زاویه کم و تند بین بردار شاخص‌های GMP، HAR، STI و YSI در سطوح شدید پیری، می‌توان نتیجه گرفت که این شاخص‌ها با یکدیگر همبستگی بالایی دارند. با این حال، شاخص‌های TOL و SSI همچنان زاویه بیشتری نسبت به سایر شاخص‌ها داشتند که نشان‌دهنده همبستگی منفی این شاخص‌ها



شکل ۲- نمودار بای پلات شاخص‌های تحمل و ژنوتیپ‌های مختلف گندم نان در سطوح پیری تسریع شده ۴۸ (الف)، ۷۲ (ب) و ۹۶ (ج) ساعت.

Figure 2. Biplot diagram of tolerance indices and different bread wheat genotypes at accelerated aging levels of 48 (A), 72 (B) and 96 (C) hours

تجزیه خوشه‌ای: برای بررسی تنوع موجود میان ژنوتیپ‌های مورد بررسی و تعیین میزان نزدیکی یا شباهت آن‌ها، همچنین گروه‌بندی بر اساس شاخص‌های ارزیابی شده، از تجزیه خوشه‌ای با بهره‌گیری از روش وارد (Ward) استفاده شد. بر اساس دندروگرام‌های تجزیه خوشه‌ای، تحت شرایط نرمال و تنش پیری ۴۸ ساعت (شکل ۳ الف)، ژنوتیپ‌های مورد مطالعه بر اساس شباهت‌ها و تفاوت‌هایشان از نظر شاخص‌های مورد مطالعه به سه گروه اصلی طبقه‌بندی شدند. در گروه اول ژنوتیپ‌هایی قرار گرفتند که برای تمامی شاخص‌هایی که بیشتر بودن آنها مطلوب است، مانند MP، GMP، STI، HAR و YSI، از طرفی برای شاخص‌هایی که کمتر بودن آنها مطلوب است مانند TOL و SSI مقادیر مطلوب‌تری نشان دادند و به‌عنوان برترین ژنوتیپ‌ها شناسایی شدند. به‌ویژه ژنوتیپ‌های ۶۲۳۴۲۱، ۶۲۷۴۱۰، ۶۲۴۸۶۴، ۶۲۷۱۰۳، ۶۲۳۰۹۰، ۶۲۷۴۱۴، البرز، کرج ۱، دز و فونگ که از نظر کلیه شاخص‌ها عملکرد مطلوبی داشتند. این ژنوتیپ‌ها توانستند در شرایط پیری تسریع شده نیز درصد جوانه‌زنی و بنبه بذر نسبتاً بالایی را حفظ کنند، که نشان‌دهنده پایداری عملکرد و کیفیت بذر آنها در شرایط تنش پیری است. گروه دوم شامل ژنوتیپ‌هایی بود که در اغلب شاخص‌ها عملکرد متوسطی داشتند و به دلیل مقادیر نسبتاً مناسب در شرایط تنش، می‌توان آن‌ها را برای کشت و مطالعات به‌نژادی آتی پیشنهاد کرد. در نهایت، ژنوتیپ‌های گروه سوم شامل ژنوتیپ‌های ۶۲۷۷۶۰، ۶۲۱۴۲۱، ۶۲۴۳۱۵، ۶۲۱۷۱۶، ۶۲۶۵۶۵، امید، ویناک و تکاب بودند که برای اغلب شاخص‌های مورد مطالعه عملکرد ضعیفی داشتند.

بر اساس دندروگرام‌های تجزیه خوشه‌ای، ژنوتیپ‌های گندم تحت شرایط نرمال و تنش پیری ۷۲ ساعت نیز بر اساس شباهت‌ها و تفاوت‌های

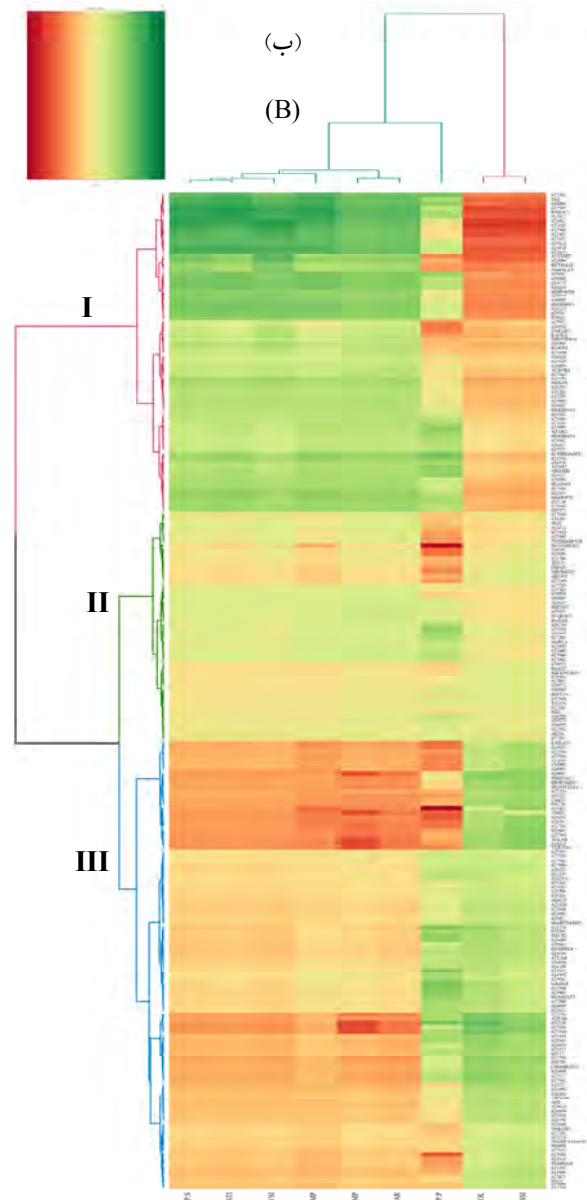
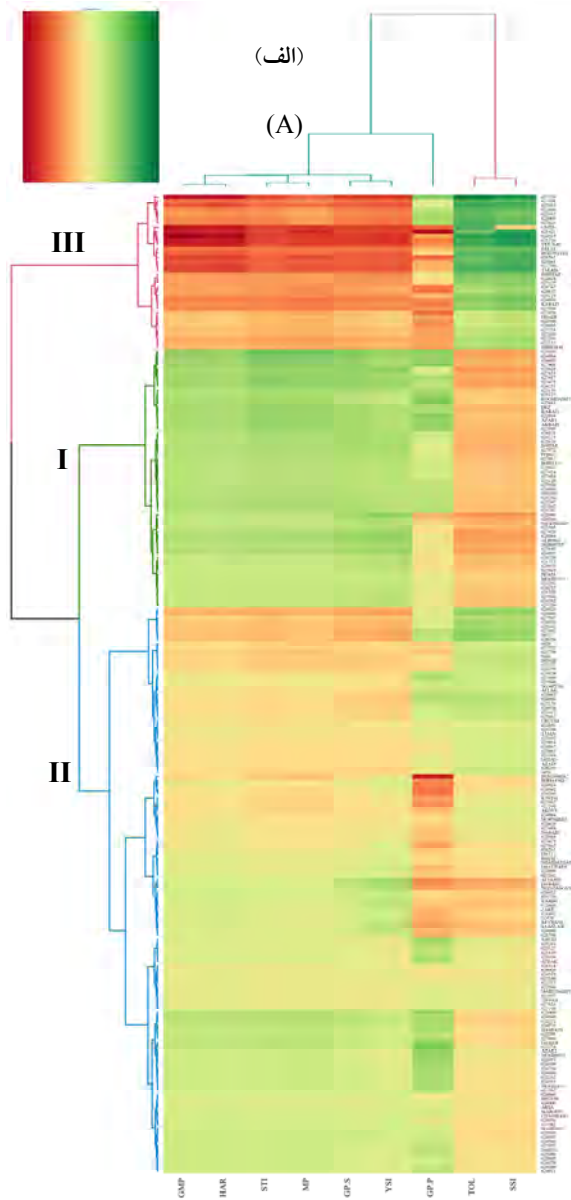
شاخص‌های مورد بررسی به سه گروه متمایز تقسیم شدند (شکل ۳ ب). گروه اول شامل ژنوتیپ‌هایی مانند ۶۲۷۱۰۳، دز، ۶۲۱۵۶۵، ۶۲۷۸۴۹، ۶۲۷۴۱۰، ۶۲۳۴۲۱، ۶۲۷۴۱۷، کرج ۱، ۶۲۷۷۸۷، ۶۲۴۸۶۴، ۶۲۷۸۵۳، ۶۲۶۹۷۸، ۶۲۷۴۱۴، ۶۲۷۰۷۲ و الوند بودند که در ارتباط با اکثر شاخص‌هایی که مقادیر بالای آنها مطلوب است، عملکرد جوانه‌زنی بالا داشتند و برای شاخص‌هایی که مقدار پایین آنها مطلوب است، مانند TOL و SSI عملکرد مطلوبی نشان دادند. در گروه دوم ژنوتیپ‌هایی جای گرفتند که برای شاخص‌های مورد مطالعه عملکرد متوسطی داشتند. در نهایت در گروه سوم ژنوتیپ‌هایی مانند ویناک، ۶۲۴۳۱۵، تکاب، ۶۲۷۷۶۰، ۶۲۵۶۶۱، ۶۲۱۷۱۶، ۶۲۶۷۴۷، ۶۲۶۵۶۵، امید، ۶۲۱۴۲۱، ۶۲۳۱۲۳، ۶۲۵۱۲۳، ۶۲۴۹۴۷، ۶۲۴۹۸۵، ۶۲۴۹۹۰، ۶۲۴۵۸۰، ۶۲۷۳۹۹، ۶۲۳۵۱۰، ۶۲۴۸۳۷، کرج ۳ با عملکرد ضعیف جای گرفتند.

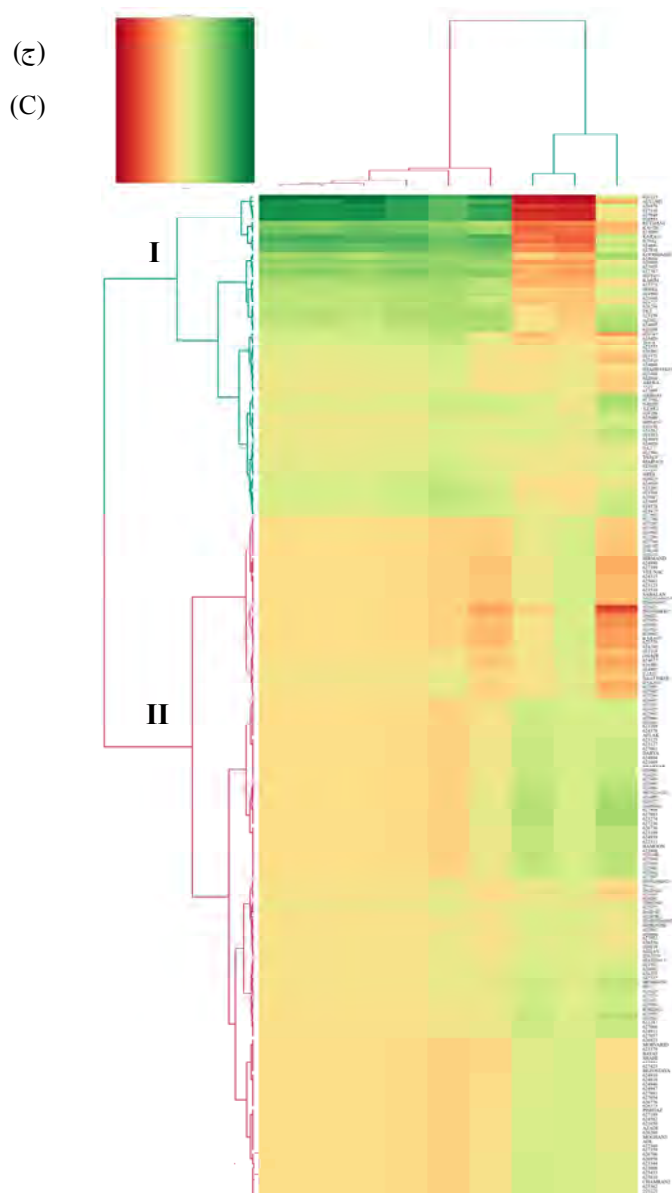
در نهایت تحت شرایط نرمال و تنش پیری ۹۶ ساعت، ژنوتیپ‌های مورد مطالعه از نظر شاخص‌های مورد مطالعه به دو گروه اصلی طبقه‌بندی شدند (شکل ۳ ج). در گروه اول ژنوتیپ‌هایی مانند ۶۲۶۲۱۵، الوند، ۶۲۶۹۷۸، ۶۲۷۴۱۰، ۶۲۷۸۴۹، ۶۲۴۹۴۴، ریحانی، کاوه، ۶۲۳۰۹۰، کرج ۱، فونگ، ۶۲۴۸۴۶، ۶۲۷۴۱۴، کوه‌دشت، ۶۲۴۸۶۴، ۶۲۶۸۹۵، ۶۲۷۸۵۳، ۶۲۷۷۸۷، ۶۲۷۷۲۳، کریم، ۶۲۴۵۹۶، ۶۲۱۵۶۵، ۶۲۱۷۳۵، ۶۲۶۲۳۴، دز، ۶۲۳۱۳۹ و آذرا قرار داشتند که از نظر شاخص‌های، YSI، HAR، STI، GMP، TOL و SSI عملکرد مطلوبی داشتند. در گروه دوم ژنوتیپ‌هایی جای گرفتند که از نظر شاخص‌های مورد مطالعه عملکرد نسبتاً ضعیفی داشتند. در مطالعه‌ای که توسط شیرازی و همکاران (۲۰۱۶) به‌منظور ارزیابی ژنوتیپ‌های مختلف گندم نان در شرایط تنش خشکی در مرحله جوانه‌زنی انجام شد،

ژنوتیپ‌ها تحت شرایط تنش به دو گروه متمایز تقسیم شدند (۱۰).

به طور کلی، این نتایج نشان می‌دهد که استفاده از شاخص‌های کمی تحمل به همراه تحلیل خوشه‌ای

می‌تواند ابزار مناسبی برای تمایز ژنوتیپ‌های متحمل و حساس و انتخاب والدین برتر برای برنامه‌های اصلاح نژاد با هدف بهبود ماندگاری و کیفیت بذر باشد.





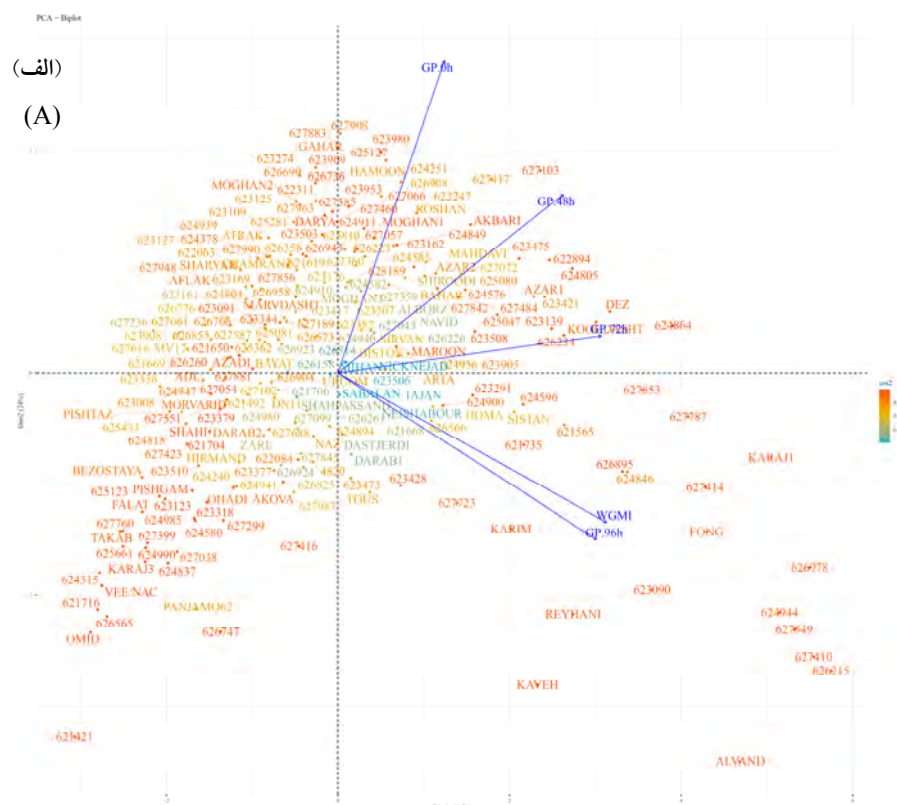
شکل ۳- دندوگرام تجزیه خوشه‌ای (هیت‌مپ) ژنوتیپ‌های مختلف گندم نان در سطوح ۴۸ (الف)، ۷۲ (ب) و ۹۶ (ج) ساعت پیری تسریع شده.

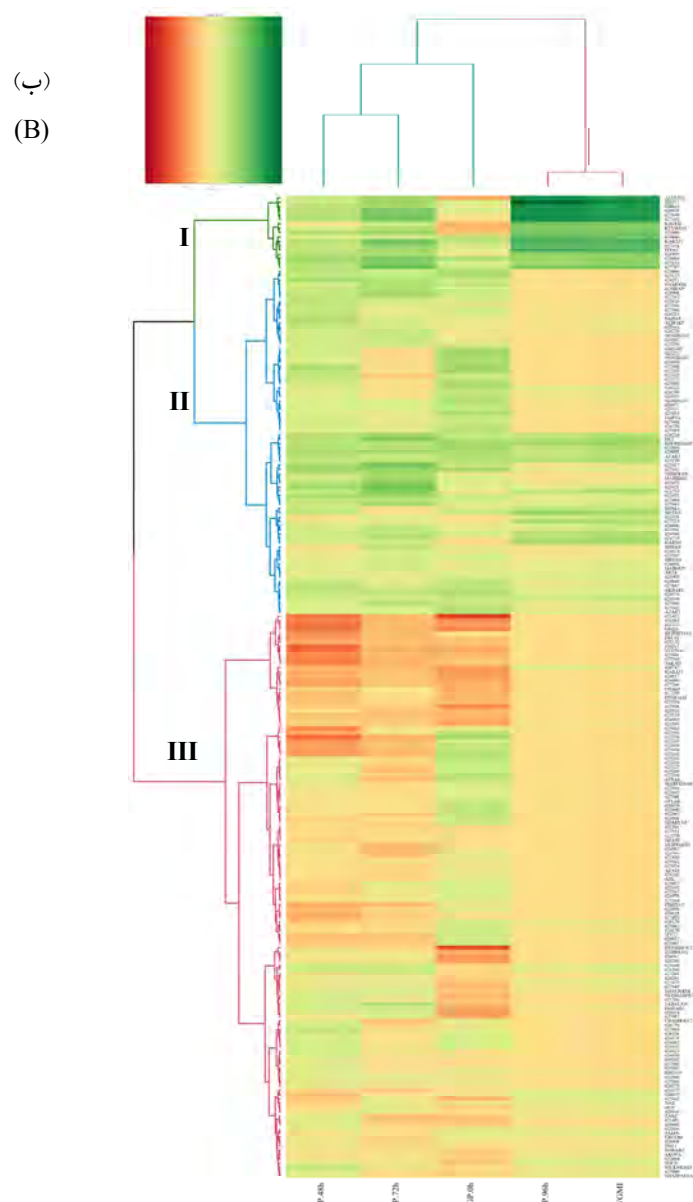
Figure 3. Cluster analysis dendrogram (heat map) of different bread wheat genotypes at accelerated aging levels of 48 (A), 72 (B) and 96 (C) hours

تنش، به‌طور کلی و تجمیعی ارزیابی می‌کند. WGMI با ترکیب عملکرد ژنوتیپ‌ها در شرایط مختلف و اختصاص وزن‌های مناسب به هر محیط، امکان بررسی متعادل‌تری از عملکرد کلی هر ژنوتیپ فراهم می‌کند. این ویژگی باعث می‌شود WGMI ژنوتیپ‌هایی را که در همه شرایط (چه نرمال و چه

ارزیابی ژنوتیپ‌ها با شاخص میانگین هندسی وزنی (WGMI): بعد از تحلیل شاخص‌های معمول تحمل به تنش، شاخص میانگین هندسی وزنی (WGMI) هم مورد بررسی قرار گرفت. این شاخص به‌عنوان یک ابزار مفید و جامع، عملکرد ژنوتیپ‌ها را در تمام شرایط آزمایش، از محیط‌های نرمال تا سطوح مختلف

بر اساس بای پلات تجزیه به مؤلفه‌های اصلی، مؤلفه‌های اول و دوم به ترتیب ۶۰/۵ و ۲۴ درصد از تغییرات کل شاخص‌ها را توجیه کردند (شکل ۴ الف). زاویه کم بین بردار شاخص WGMI و عملکرد ژنوتیپ‌ها در تنش پیری ۷۲ و ۹۶ ساعت نشان‌دهنده همبستگی بالای این شاخص با عملکرد در این شرایط است. این امر بیانگر توانایی WGMI در شناسایی ژنوتیپ‌هایی است که در مواجهه با تنش شدید، عملکرد مطلوب و پایداری بالایی از خود نشان





شکل ۴ - نمودار بای پلات شاخص تجمیعی WGMI و ژنوتیپ‌های مختلف گندم نان (الف)، دندوگرام تجزیه خوشه‌ای (هیت‌مپ) ژنوتیپ‌های مختلف گندم نان (ب) در چهار سطح پیری تسریع شده (۰، ۴۸، ۷۲ و ۹۶ ساعت).

Figure 4. Biplot diagram of the WGMI composite index and different bread wheat genotypes (A), cluster analysis dendrogram (heat map) of different bread wheat genotypes (B) at four accelerated aging levels (0, 48, 72 and 96 hours)

۶۲۶۲۱۵، فونگ، الوند، کرج ۱، ریحانی و کاوه بودند که از نظر شاخص WGMI و عملکرد ژنوتیپ‌ها در تنش ۹۶ ساعت دارای بیشترین مقادیر بودند. همچنین این ژنوتیپ‌ها از نظر عملکرد در تنش پیری تسریع شده ۷۲ و ۴۸ ساعت نیز در شرایط نرمال عملکرد مطلوب و قابل قبولی داشتند. در گروه دوم ژنوتیپ-

نتایج تحلیل خوشه‌ای نشان داد (شکل ۴ب)، ژنوتیپ‌های گندم نان بر اساس شباهت‌ها و تفاوت‌ها در شاخص‌های مورد بررسی به سه گروه متمایز تقسیم شدند. گروه اول شامل ژنوتیپ‌های ۶۲۷۷۸۷، ۶۲۷۸۵۳، ۶۲۴۸۶۴، ۶۲۶۸۹۵، ۶۲۷۴۱۴، ۶۲۴۸۴۶، ۶۲۳۰۹۰، ۶۲۷۴۱۰، ۶۲۷۸۴۹، ۶۲۴۹۴۴، ۶۲۶۹۷۸

مرتبط با مقاومت به پیری را در طول زمان تثبیت کرده باشند.

نتیجه گیری

این مطالعه با هدف بررسی و شناسایی ژنوتیپ‌های گندم نان مقاوم به تنش پیری تسریع شده با استفاده از شاخص‌های مختلف تحمل تنش انجام گرفت. بر اساس نتایج تجزیه و تحلیل مولفه‌های اصلی، این مولفه‌ها به‌خوبی توانستند تغییرات داده‌ها را توجیه کرده و ارتباط میان شاخص‌ها و ژنوتیپ‌ها را روشن سازند. شاخص‌هایی مانند MP، GMP، STI، HAR و YSI با زاویه بردار کمتر همبستگی مثبت قوی با یکدیگر نشان دادند و توانستند ژنوتیپ‌های مطلوب را شناسایی کنند. در مقابل، شاخص‌های TOL و SSI با زاویه‌های بزرگ‌تر و همبستگی منفی با سایر شاخص‌ها، ژنوتیپ‌های حساس به تنش را معرفی کردند. علاوه بر این، استفاده از شاخص WGMI که عملکرد ژنوتیپ‌ها را به‌صورت ترکیبی در شرایط نرمال و تنش‌های مختلف ارزیابی می‌کند، به شناسایی دقیق‌تر ژنوتیپ‌های مقاوم و متعادل کمک شایانی نمود. بر این اساس، ارقام الوند، فونگ و کرج ۱ و توده‌های بومی مانند ۶۲۶۲۱۵، ۶۲۷۴۱۰، ۶۲۶۹۷۸، ۶۲۷۸۴۹، ۶۲۴۹۴۴، ۶۲۷۴۱۴، ۶۲۳۰۹۰، ۶۲۴۸۴۶ به‌عنوان ژنوتیپ‌های برتر با عملکرد جوانه‌زنی و پایداری بالا در شرایط پیری تسریع شده شناسایی شدند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که ترکیب روش‌های آماری چندمتغیره (PCA، تجزیه خوشه‌ای) و شاخص‌های تحمل به تنش، از جمله WGMI رویکردی جامع و مؤثر برای شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل در برابر تنش‌های محیطی فراهم می‌کند. این یافته‌ها می‌تواند به‌عنوان مبنایی علمی برای انتخاب ژنوتیپ‌های برتر از نظر کیفیت بذر در برنامه‌های به‌نژادی گندم مورد استفاده قرار گیرد.

هایی جای گرفتند که عملکرد متوسط رو به پایین از نظر شاخص WGMI داشتند و در نهایت در گروه سوم ژنوتیپ‌هایی با عملکرد پایین قرار گرفتند. علی‌پور و همکاران (۲۰۱۹) در مطالعه‌ای که به بررسی عملکرد دانه و پایداری عملکرد ۵۱ رقم گندم نان بر اساس سال معرفی و عادت رشدی آن‌ها پرداختند، گزارش کردند که رقم‌های الوند و کرج ۱ (با سابقه معرفی در ۲۰ سال اخیر و عادت رشدی بینابینی) به ترتیب دارای عملکرد بالا و متوسط بودند. از نظر پایداری نیز، رقم کرج ۱ مطلوب و رقم الوند نامطلوب ارزیابی شد. همچنین، ارقامی مانند فونگ که اطلاعات دقیقی از زمان معرفی و عادت رشدی آن‌ها در دسترس نبود، عملکرد و پایداری متوسطی نشان دادند (۳۶). از سوی دیگر، قرار گرفتن توده‌های بومی در گروه متحمل به تنش پیری، نشان‌دهنده‌ی پتانسیل استفاده از این ژنوتیپ‌ها در برنامه‌های به‌نژادی به دلیل وجود آلل‌های مطلوب است. تحمل بالای برخی از توده‌های بومی به تنش‌های محیطی مانند خشکی در مطالعات گذشته نیز گزارش شده است (۲۴ و ۳۷).

به نظر می‌رسد تحمل به پیری در ژنوتیپ‌های معرفی شده نتیجه‌ی ترکیبی از ویژگی‌های ژنتیکی و فیزیولوژیکی آنها باشد. این ژنوتیپ‌ها احتمالاً دارای ساختار غشای سلولی پایداری و توانایی بهتری در مقاومت به تنش‌های ناشی از پیری بذر هستند. هرچند در این مطالعه، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و توانایی پاک‌سازی گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) اندازه‌گیری نشده است، ولی به نظر می‌رسد که این ویژگی‌ها نقش مؤثری در جلوگیری از تخریب سلولی در شرایط پیری ایفا کنند و می‌توانند در مطالعات تکمیلی آینده مورد بررسی قرار گیرند. علاوه بر این، برخی از توده‌های بومی ممکن است با توجه به سازگاری آن‌ها با شرایط اقلیمی سخت‌تر، ویژگی‌های

References

1. Zhang, T., Li, J., Tong, J., Song, Y., Wang, L., Wu, R., ... & Zeng, R. (2025). End-to-end deep fusion of hyperspectral imaging and computer vision techniques for rapid detection of wheat seed quality. *Artificial Intelligence in Agriculture*, 15 (3), 537-549
2. Baskin, C. C., & Baskin, J. M. (2020). Breaking seed dormancy during dry storage: a useful tool or major problem for successful restoration via direct seeding? *Plants*, 9(5), 636.
3. Bewley, J. D., Bradford, K. J., Hilhorst, H. W., Nonogaki, H., Bewley, J. D., Bradford, K. J., ... & Nonogaki, H. (2013). Dormancy and the control of germination. *Seeds: Physiology of Development, Germination and Dormancy*, 3rd Edition, 247-297.
4. Hanbury- Brown, A. R., Ward, R. E., & Kueppers, L. M. (2022). Forest regeneration within Earth system models: current process representations and ways forward. *New Phytologist*, 235(1), 20-40.
5. Wang, H., Wang, X., Li, Y., Gao, R., Narsing Rao, M. P., Song, J., & Li, Q. (2023). Effect of environmental factors on seed germination and seedling emergence of *Viola prionantha*, a cleistogamous plant. *Journal of Plant Research*, 136(5), 631-641.
6. Zhao, W., Sun, Y., & Gao, Y. (2023). Potential factors promoting the natural regeneration of *Larix principis-rupprechtii* in North China. *PeerJ*, 11, e15809.
7. Pirredda, M., Fañanás-Pueyo, I., Oñate-Sánchez, L., & Mira, S. (2023). Seed longevity and ageing: a review on physiological and genetic factors with an emphasis on hormonal regulation. *Plants*, 13(1), 41.
8. Zhang, K., Zhang, Y., Sun, J., Meng, J., & Tao, J. (2021). Deterioration of orthodox seeds during ageing: Influencing factors, physiological alterations and the role of reactive oxygen species. *Plant Physiology and Biochemistry*, 158, 475-485.
9. Delouche, J. C., & Baskin, C. C. (1973). Accelerated aging techniques for predicting the relative storability of seed lots. *Seed Science and Technology*, 1, 427-452.
10. Shirazi, E., Fazeli-nasab, B., Ramshin, H. A., Fazel-Najaf-Abadi, M., & Izadi-darbandi, A. (2016). Evaluation of drought tolerance in wheat genotypes under drought stress at germination stage. *Journal of Crop Breeding*, 8(20), 207-219 [In Persian].
11. Hossain, A., Teixeira da Silva, J. A., Lozovskaya, M. V., Zvolinsky, V. P., & Mukhortov, V. I. (2012). High temperature combined with drought affect rainfed spring wheat and barley in south-eastern Russia: Yield, relative performance and heat susceptibility index. *Journal of Plant Breeding and Crop Science*, 4(11), 184-196.
12. Gupta, S., Van Staden, J., & Doležal, K. (2022). An understanding of the role of seed physiology for better crop productivity and food security. *Plant Growth Regulation*, 97(2), 171-173.
13. Chen, K., & Arora, R. (2013). Priming memory invokes seed stress-tolerance. *Environmental and experimental Botany*, 94, 33-45.
14. Fischer, R. A., & Maurer, R. (1978). Drought resistance in spring wheat cultivars. I. Grain yield responses. *Australian Journal of Agricultural Research*, 29(5), 897-912. <https://doi.org/10.1071/AR9780897>.
15. Rosielle, A. A., & Hamblin, J. (1981). Theoretical aspects of selection for yield in stress and non-stress environments. *Crop Science*, 21(6), 943-946. <https://doi.org/10.2135/cropsci1981.0011183X002100060022x>.
16. Fernandez, G. C. J. (1992). Effective selection criteria for assessing stress tolerance. In *Proceedings of the International Symposium on Adaptation of Vegetables and Other Food Crops in Temperature and Water Stress* (pp. 257-270). Shanhua, Taiwan: AVRDC.
17. Bouslama, M., & Schapaugh, W. T. (1984). Stress tolerance in soybean. I. Evaluation of three screening techniques for heat and drought tolerance. *Crop Science*, 24(5), 933-937. <https://doi.org/10.2135/cropsci1984.0011183X002400050033x>.
18. Schneider, K. A., Rosales-Serna, R., Ibarra-Perez, F., Cazares-Enriquez, B., Acosta-Gallegos, J. A., Ramirez-Vallejo, P., Wassimi, N., & Kelly, J. D. (1997). Improving common bean performance under drought stress. *Crop Science*, 37(1), 43-50.
19. Taghian, A.S., Abo-Elwafa, A. (2003). Multivariate and rapid analysis of drought tolerance in spring wheat. *Assiut Journal of Agricultural Science*. 34, 1-25.

20. Sundari, T., Tohari, S., Mangoendidjojo, W. (2005). Yield performance and tolerance of mung bean genotypes to shading. *Journal Pertanian*, 12, 12-19.
21. Samdur, M. Y., Patroti, P. D., Talwar, H. S., Sharma, K. K., Tonapi, V. A., Prabhakar, ... & Kshirsagar, Y. S. (2021). Weighted geometric mean index: A model to evaluate drought tolerance in post-rainy season sorghum (*Sorghum bicolor* L.) Moench). *Cereal Research Communications*, 49, 329-336.
22. Eslami, P., Bernousi, I., Aharizad, S., & Jafarzadeh, J. (2021). Evaluation of drought stress tolerance in barley lines using tolerance indices. *Journal of Crop Breeding*, 13(38), 71-83 [In Persian].
23. Saremi, Z., Shahbazi, M., Zeinalabedini, M., Majidi Haravan, E., & Azizinezhad, R. (2022). Evaluation of Drought Tolerance in Barley Genotypes (*Hordeum vulgare* L.) using Drought Tolerance Indices. *Journal of Crop Breeding*, 14(41), 10-18 [In Persian].
24. Rabieyan, E., Bihamta, M. R., Moghaddam, M. E., Alipour, H., Mohammadi, V., Azizyan, K., & Javid, S. (2023). Analysis of genetic diversity and genome-wide association study for drought tolerance related traits in Iranian bread wheat. *BMC Plant Biology*, 23(1), 431.
25. Modarresi, R., Rucker, M., & Tekrony, D. M. (2002). Accelerating ageing test for comparing wheat seed vigour. *Seed Science and Technology*, 30(3), 683-687.
26. Mondal, S., & Bose, B. (2018). Accelerated Aging Affects the Germination Physiology of Wheat Seeds. *International Journal of Agriculture, Environment and Biotechnology*, 11(1), 209-216.
27. ISTA. 2009. International Rules for Seed Testing. Bassersdorf, Switzerland. International Seed Testing Association.
28. Hampton, J. G., & TeKrony, D. M. (1995). Handbook of vigour test methods, (International Seed Testing Association: Zürich, Switzerland).
29. ISTA. 2008. International rules for seed testing. International Seed Testing Association, Bassersdorf. Wheat. University Publication Center, 352 pp
30. Chegeni, H., Goldani, M., Shirani Rad, A. H., & Kafi, M. (2017). The effect of accelerated aging on germination indices of promising rapeseed (*Brassica napus* L.) lines. *Plant Breeding Research Journal*, 8(19), 209-217 [In Persian].
31. Ghanbari, M., Makhtassi-Bidgoli, A., Talebi-Siah Saran, P., & Pirani, H. (2019). Effect of deterioration on germination and enzymes activity in dry bean (*Phaseolus vulgaris* L. cv. Sadri) under salinity stress condition. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 12(2), 585-594 [In Persian].
32. Sun, S., Mi, C., Ma, W., & Mao, P. (2024). Dynamic responses of germination characteristics and antioxidant systems to alfalfa (*Medicago sativa*) seed aging based on transcriptome. *Plant Physiology and Biochemistry*, 217, 109205.
33. Srii, V. S., & Nagarajappa, N. (2024). Impact of accelerated aging on seed quality, seed coat physical structure and antioxidant enzyme activity of Maize (*Zea mays* L.). *PeerJ*, 12, e17988.
34. Khojamli, R., Zaynali Nezhad, K., Nasrollahnejad Ghomi, A. A., & Bagherikia, S. (2021). Evaluation of bread wheat genotypes under drought stress conditions in seedling stage using drought indices. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 14(4), 887-899 [In Persian].
35. Han, L., Guijun, Y., Dai, H., & Zhao, C. (2019). Combining self-organizing maps and biplot analysis to preselect maize phenotypic components based on UAV high-throughput phenotyping platform. *Plant Methods*, 15(1), 1-12. <https://doi.org/10.1186/s13007-019-0418-6>.
36. Alipour, A., Abdi, H., Rahimi, Y., & Bihamta, M.R. (2019). Investigating grain yield and yield stability of wheat cultivars introduced in Iran over the last half century. *Cereal Research*, 9 (2), 157-167 [In Persian].
37. Hoseinpour Berenj-Abad, M., Jafari, M., & Alipour, H. (2024). Evaluation of tolerance to drought stress in bread wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars and landraces using tolerance indices. *Cereal Research*, 14(1), 61-82 [In Persian].