



University of Guilan
Faculty of Agricultural Sciences

Cereal Research

Vol. 15, No. 3, Autumn 2025 (233-250)

doi: 10.22124/CR.2025.30976.1868

pISSN: 2252-0163 eISSN: 2538-6115



RESEARCH PAPER

OPEN ACCESS

Evaluation of drought tolerance indices based on grain yield and root biomass in rice genotypes

Mahdi Mohseni¹, Nadali Babaeian Jelodar^{2*}, Alireza Tarang³ and Nadali Bagheri⁴

1. Ph. D. Student, Department of Plant Breeding and Biotechnology, Faculty of Crop Sciences, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran
2. Professor, Department of Plant Breeding and Biotechnology, Faculty of Crop Sciences, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran (* Corresponding author: nbabaeian@yahoo.com)
3. Research Associate Professor, Rice Research Institute of Iran, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Rasht, Iran
4. Associate Professor, Department of Plant Breeding and Biotechnology, Faculty of Crop Sciences, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran

Comprehensive abstract

Introduction

In recent years, the decline in precipitation and water resources has emerged as a major constraint to rice production. Drought is one of the most widespread abiotic stresses, posing a significant threat to vast areas of rice cultivation. Rice yield can be adversely affected by drought at any growth stage; however, the reproductive stage is particularly sensitive. Therefore, identifying drought-tolerant genotypes is a key strategy to mitigate the impact of water deficit. Several indices have been proposed to evaluate plant responses to stress and to assess yield stability under adverse conditions. Accordingly, this study utilized drought tolerance and susceptibility indices to evaluate different rice genotypes under drought stress and to identify drought-tolerant varieties based on grain yield and root biomass.

Materials and methods

This study was conducted in 2023 at the Rice Research Institute of Iran to evaluate 36 rice genotypes under two conditions: non-stress and drought stress. The experiment was arranged in a randomized complete block design (RCBD) with three replications. It was performed under a rainout shelter using controlled PVC pipes, each with a diameter of 20 cm and a length of 100 cm. The shelter was open-sided, ensuring that temperature and relative humidity did not differ significantly from ambient outdoor conditions. The pipes were filled with equal volumes and densities of soil, composed of one-third sand and two-thirds field soil. The required amount of chemical fertilizer was calculated based on soil test results and thoroughly mixed into the soil. After determining the field capacity (set at 91%) for the drought treatment pipes, seedlings with 3–4 leaves were transplanted individually. Drought stress was imposed at the maximum tillering and panicle initiation stage, while in the non-stress treatment, irrigation was continued regularly until maturity. When the soil moisture in the drought treatment reached 20%, grain yield and root biomass traits were measured and stress tolerance and sensitivity indices were calculated. Pearson correlation coefficients were computed using SPSS software. Cluster analysis and two-dimensional biplot diagrams based on grain yield were drawn by NTSYS 2.02 and XLSTAT 2019.2.2 software.

Research findings

The results indicated that the highest and lowest average grain yield in non-stress conditions belonged to Gohar and IR58 cultivars, respectively, and under drought stress conditions belonged to Mohamadi Chaparsar and Hassani cultivars. The lowest reduction in grain yield in stress conditions



(49.57%) was attributed to the Mohamadi Chaparsar cultivar and the highest percentage increase in root biomass (63.45%) was related to the Hassani cultivar. The results of correlation coefficients showed that grain yield in non-stress conditions had a positive and significant correlation with the mean productivity (MP), geometric mean productivity (GMP), harmonic mean (HM), tolerance index (TOL), and stress tolerance index (STI), respectively, and the highest correlation was observed with MP index ($r=0.906$). Also, under drought stress conditions, grain yield showed a high correlation with MP, GMP, HM, STI, yield index (YI), yield stability index (YSI), and relative drought index (RDI), the highest of which was related to yield index ($r=1.00$). Also, root biomass in non-stress conditions was highly significantly and positively correlated with the indices MP, GMP, HM, YI, STI, TOL, Stress susceptibility index (SSI) and average root biomass under stress (Y_s), respectively, and the highest correlation was observed with MP index ($r=0.903$). Under drought stress conditions, the indices MP, GMP, HM, YI, YSI, RDI and STI showed a high correlation with root biomass, and the highest correlation was related to yield index ($r=1.00$). Cluster analysis based on drought tolerance indices for grain yield separated rice genotypes into four groups. Cultivars in the second group (Group A) including Mohamadi Chaparsar, Gharib Siah Reihani, Hashemi, Dular, Kian, Anam, along with ten genotypes from the first group including Alikazemi, Nemat, Sahel, Danial, Gilaneh, Domzard, Dorfak, Gohar, Neda and Toka, were identified as drought-tolerant genotypes. Twelve drought-tolerant genotypes were identified for grain yield using the biplot method based on the Y_n , STI, HM, GMP, and MP indices.

Conclusion

Based on the evaluation of drought tolerance and susceptibility indices and their correlation with grain yield and root biomass under both stress and nonstress conditions, the indices MP, GMP, HM, STI, and RDI were identified as the most effective indicators. The results obtained from comparing cluster analysis, biplot and correlation coefficients indicated that the genotypes Daniyal, Gohar, Nemat, Gilaneh, Dorfak, Dular, Domzard, Salari, Toka and Mohamadi Chaparsar were high-yielding cultivars with high root biomass and drought-tolerant, while the genotypes Ahlami Tarom, Binam, Sang Jo, Hasan Sarayi Atashgah, Kados, Rash, IR28, IR50 and IR64 were low-yielding cultivars with low root biomass and drought-sensitive cultivars.

Keywords: Biplot, Cluster analysis, Principal component analysis, Relative drought index, Yield index

Received: June 17, 2025

Accepted: August 20, 2025

Cite this article:

Mohseni, M., Babaeian Jelodar, N., Tarang, A. R., & Bagheri, N. (2025). Evaluation of drought tolerance indices based on grain yield and root biomass in rice genotypes. *Cereal Research*, 15(3), 233-250. doi: [10.22124/CR.2025.30976.1868](https://doi.org/10.22124/CR.2025.30976.1868).



ارزیابی شاخص‌های تحمل به خشکی بر اساس عملکرد دانه و زیست توده ریشه در ژنوتیپ‌های برنج

مهدی محسنی^۱، نادعلی بابائیان جلودار^{۲*}، علیرضا ترنگ^۳ و نادعلی باقری^۴

۱- دانشجوی دکتری، گروه اصلاح نباتات و بیوتکنولوژی، دانشکده علوم زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران
۲- استاد، گروه اصلاح نباتات و بیوتکنولوژی، دانشکده علوم زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران (* نویسنده مسئول: nbabaeian@yahoo.com)

۳- دانشیار پژوهش، مؤسسه تحقیقات برنج کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، رشت، ایران

۴- دانشیار، گروه اصلاح نباتات و بیوتکنولوژی، دانشکده علوم زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

چکیده جامع

مقدمه: کمبود نزولات جوی و کاهش منابع آبی در سال‌های اخیر به‌عنوان مانع جدی برای تولید برنج مطرح است. تنش خشکی از رایج‌ترین تنش‌های غیرزیستی است که بخش زیادی از مناطق تحت کشت برنج را تهدید می‌کند. عملکرد برنج در مزارع ممکن است در هر مرحله رشدی توسط خشکی کاهش یابد. برنج بیش‌تر در مرحله زایشی تحت تأثیر خشکی قرار می‌گیرد. بنابراین شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل به تنش یکی از راه‌کارهای غلبه بر این شرایط است. برای ارزیابی میزان تحمل و حساسیت گیاهان به تنش و شناسایی پایداری آن‌ها، شاخص‌های مختلفی پیشنهاد شده است. در این مطالعه، تعدادی از ژنوتیپ‌های برنج تحت دو شرایط بدون تنش و تنش خشکی مورد ارزیابی قرار گرفتند که هدف از آن شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی بر اساس عملکرد دانه و زیست توده ریشه با استفاده از شاخص‌های حساسیت و تحمل به تنش بود.

مواد و روش‌ها: مواد گیاهی این پژوهش، تعداد ۳۶ ژنوتیپ مختلف برنج بود که در دو شرایط بدون تنش و تنش خشکی در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در مؤسسه تحقیقات برنج کشور در سال ۱۴۰۲ مورد ارزیابی قرار گرفتند. آزمایش در لوله‌های PVC (کنترل‌شده) با قطر ۲۰ سانتی‌متر و طول ۱۰۰ سانتی‌متر زیر پوشش باران‌گیر انجام شد و لوله‌ها با مقدار و تراکم یکسان خاک (مخلوط یک‌سوم شن و دوسوم خاک مزرعه) پر شدند. اطراف باران‌گیر کاملاً باز بود و دما و رطوبت نسبی با محیط بیرون تفاوت معنی‌داری نداشت. میزان کود شیمیایی بر حسب آزمون خاک محاسبه و با خاک کاملاً مخلوط شد. پس از تعیین ظرفیت مزرعه ۹۱٪ برای لوله‌های تیمار خشکی، گیاهچه‌های ۳-۴ برگی هر رقم به‌صورت تک‌نشا کاشته شدند. گیاهان در مرحله حداکثر پنجه‌زنی و شروع آغازش خوشه در معرض تنش رطوبتی قرار گرفتند و تنها در شرایط بدون تنش، آبیاری به‌طور کامل تا زمان رسیدگی انجام شد. پس از رسیدن رطوبت خاک به سطح ۲۰ درصد، صفات عملکرد دانه و زیست توده ریشه اندازه‌گیری و شاخص‌های تحمل و حساسیت به تنش محاسبه شد. برای محاسبه ضرایب همبستگی پیرسون از نرم‌افزار SPSS و برای انجام تجزیه خوشه‌ای و رسم نمودار بای‌پلات شاخص‌ها بر اساس عملکرد دانه از نرم‌افزارهای NTSYS 2.02 و XLSTAT 2019.2.2 استفاده شد.

یافته‌های تحقیق: نتایج نشان داد که بیش‌ترین و کم‌ترین میانگین عملکرد دانه در شرایط بدون تنش به‌ترتیب به رقم‌های گوهر و IR58 و در شرایط تنش خشکی به رقم‌های محمدی چپرسر و حسنی تعلق داشت. کم‌ترین کاهش عملکرد دانه در محیط تنش ۴۹/۵۷ درصد) مربوط به رقم محمدی چپرسر و بیش‌ترین درصد افزایش زیست‌توده ریشه (۶۳/۴۵ درصد) مربوط به رقم حسنی بود. نتایج ضرایب همبستگی نشان داد که عملکرد دانه در شرایط بدون تنش به‌ترتیب با شاخص‌های بهره‌وری متوسط (MP)، میانگین هندسی بهره‌وری (GMP)، میانگین هارمونیک (HM)، شاخص تحمل (TOL) و شاخص تحمل به تنش (STI) دارای همبستگی مثبت و معنی‌دار بود و بیش‌ترین همبستگی با شاخص بهره‌وری متوسط ($r = 0.906$) مشاهده شد. در شرایط تنش نیز شاخص‌های MP، GMP، HM، STI، شاخص عملکرد (YI)، شاخص پایداری عملکرد (YSI) و شاخص خشکی نسبی (RDI) همبستگی بالایی با عملکرد دانه نشان دادند و بالاترین مقدار همبستگی مربوط به شاخص عملکرد ($r = 1.00$) بود. زیست‌توده ریشه نیز در شرایط بدون تنش به‌ترتیب با شاخص‌های MP، GMP، HM، YI، STI، SSI و TOL و میانگین زیست‌توده ریشه در شرایط تنش (Ys) همبستگی مثبت و معنی‌دار داشت و بیش‌ترین همبستگی را با شاخص بهره‌وری متوسط ($r = 0.903$) دارا بود. در شرایط تنش نیز شاخص‌های MP، GMP، HM، YI، YSI، RDI و STI همبستگی بالایی با زیست‌توده ریشه نشان دادند و بالاترین آن مربوط به شاخص عملکرد ($r = 1.00$) بود. تجزیه خوشه‌ای ژنوتیپ‌های برنج بر اساس شاخص‌های تحمل به خشکی حاصل از عملکرد دانه، ژنوتیپ‌ها را به چهار گروه تفکیک کرد که ژنوتیپ‌های گروه دوم (گروه A) شامل محمدی چپرسر، غریب سیاه ریحانی، هاشمی، دلار، کیان و آنام همراه با ۱۰ ژنوتیپ از گروه اول شامل علی کاظمی، نعمت، ساحل، دانیال، گیلان، دم‌زرد، درفک، گوهر، ندا و توکا جزء ژنوتیپ‌های متحمل به تنش خشکی بودند. از طریق روش بای‌پلات برای عملکرد دانه نیز دوازده ژنوتیپ متحمل به خشکی بر اساس شاخص‌های STI، Yn، HM، GMP و MP شناسایی شدند.

نتیجه‌گیری: با بررسی شاخص‌های تحمل و حساسیت به تنش و ضرایب همبستگی بین شاخص‌ها با عملکرد دانه و زیست‌توده ریشه در شرایط تنش و بدون تنش، شاخص‌های MP، GMP، HM، STI و RDI به‌عنوان شاخص‌های برتر انتخاب شدند. بر اساس نتایج حاصل از روش‌های تجزیه خوشه‌ای، بای‌پلات و ضرایب همبستگی شاخص‌های تنش، ژنوتیپ‌های دانیال، گوهر، نعمت، گیلان، درفک، دلار، دم‌زرد، سالاری، توکا و محمدی چپرسر به‌عنوان ژنوتیپ‌های با عملکرد دانه و زیست‌توده ریشه بالا و متحمل به خشکی و ژنوتیپ‌های اهلمی طارم، بینام، سنگ جو، حسن‌سرای آتشیگاه، کادوس، رش، IR28، IR50 و IR64 به‌عنوان ژنوتیپ‌های با عملکرد و زیست‌توده ریشه پایین و حساس به تنش خشکی شناسایی شدند.

واژه‌های کلیدی: بای‌پلات، تجزیه به مؤلفه‌های اصلی، تجزیه خوشه‌ای، شاخص خشکی نسبی، شاخص عملکرد

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۲۹

نحوه استناد به این مقاله:

محسنی، مهدی، بابائیان جلودار، نادعلی، ترنگ علی‌رضا، و باقری، نادعلی. (۱۴۰۴). ارزیابی شاخص‌های تحمل به خشکی بر اساس عملکرد دانه و زیست‌توده ریشه در ژنوتیپ‌های برنج. *تحقیقات غلات*، ۱۵ (۳)، ۲۵۰-۲۳۳. doi: [10.22124/CR.2025.30976.1868](https://doi.org/10.22124/CR.2025.30976.1868)

مقدمه

برنج (*Oryza sativa* L.) یک محصول غذایی مهم است که به خانواده Gramineae تعلق دارد و برای تکمیل چرخه زندگی خود نیاز به مقدار بیش‌تری آب نسبت به سایر محصولات دارد. از این‌رو، تولید برنج به‌شدت تحت تأثیر تنش آبی قرار می‌گیرد. خشکی یک تهدید بزرگ است که می‌تواند بیش از ۹۰ درصد تولید برنج را کاهش دهد. از دست دادن عملکرد زیاد نتیجه اثر نامطلوب خشکی در سطح مورفولوژیک، فیزیولوژیک، بیوشیمیایی و مولکولی است (Kumar *et al.*, 2022). گرم شدن کره زمین و تغییرات اقلیمی سبب تشدید اثرات خشک‌سالی و گرما خواهد شد. از این‌رو، افزایش ظرفیت ژنتیکی گیاهان برای بهره‌برداری از منابع خاک (آب و مواد مغذی) یک هدف اصلی برای اصلاح‌گران است که برای تحقق آن لازم است به‌نژادی روی ساختار ریشه گیاه به‌عنوان یک صفت ایده‌آل صورت گیرد (Lobet *et al.*, 2013). مرحله رشد زایشی مرحله‌ای است که در آن عملکرد برنج بیش‌تر تحت تأثیر خشکی قرار می‌گیرد، اگرچه عملکرد برنج در مزارع ممکن است با خشکی در هر مرحله رشدی کاهش یابد. بنابراین، تلاش‌های مداوم برای شناسایی QTLها و صفاتی که باعث بهبود عملکرد برنج تحت انواع مختلف تنش خشکی می‌شوند، مورد نیاز است (Catolos *et al.*, 2017). برنج به‌دلیل سیستم ریشه کوچک، موم نازک کوتیکولی و بسته شدن سریع روزنه‌ها یکی از گیاهان حساس به خشکی محسوب می‌شود (Sahebi *et al.*, 2018). بسیاری از رقم‌های محلی آپلند سطح بالایی از تحمل به خشکی را نشان داده‌اند، اما تحمل این رقم‌ها به خشکی اغلب با صفات نامطلوب مانند عملکرد پایین و ارتفاع بوته بلند مرتبط است (Vikram *et al.*, 2015).

شاخص‌های متفاوتی برای ارزیابی واکنش گیاهان در شرایط محیطی مختلف و تعیین تحمل و حساسیت آن‌ها ارائه شده است. شاخص حساسیت به تنش (Stress Susceptibility Index) را فیشر و مائورر (Fischer & Maurer, 1978) پیشنهاد کردند. آن‌ها اظهار داشتند که حساسیت کم‌تر به تنش نشان دهنده تغییرات کم عملکرد یک ژنوتیپ در شرایط تنش در مقایسه با شرایط بدون تنش (نرمال) و در نتیجه پایداری آن ژنوتیپ است. روزیل و هامبلین (Rosielle & Hamblin, 1981) شاخص تحمل (Tolerance Index) و میانگین بهره‌وری (Mean Productivity) را ارائه کردند که مقادیر کم‌تر شاخص تحمل نشان‌دهنده تحمل بیش‌تر ژنوتیپ‌ها به تنش و

مقادیر کم‌تر میانگین بهره‌وری دلالت بر حساسیت بیش‌تر ژنوتیپ‌ها به شرایط تنش دارد. فرناندز (Fernandez, 1992) نیز شاخص تحمل به تنش (Stress Tolerance Index) و میانگین هندسی بهره‌وری (Geometric Mean Productivity) را معرفی کرد.

مطالعات متعددی برای ارزیابی عملکرد برنج در شرایط تنش خشکی صورت گرفته است. کهنسال و اجارگاه و همکاران (Kohansal Vajargah *et al.*, 2011) با مقایسه شاخص‌های مقاومت به خشکی، رقم درفک را مناسب کاشت در شرایط تنش رویشی و رقم محمدی را مناسب کاشت در شرایط تنش زایشی پیشنهاد کردند. رحیمی و همکاران (Rahimi *et al.*, 2012) شاخص‌های تحمل به خشکی را در ۱۵۰ لاین F5 حاصل از تلاقی رقم سپیدرود و غریب ارزیابی و بر اساس نتایج حاصل از تجزیه بای‌پلات، شاخص‌های تحمل به تنش، میانگین بهره‌وری، میانگین هندسی بهره‌وری و میانگین هارمونیک را به‌عنوان مناسب‌ترین شاخص‌ها برای انتخاب ژنوتیپ‌های پرمحصول در برنامه‌های کاربردی اصلاح برنج معرفی کردند. افشاری و همکاران (Afshari *et al.*, 2018) با بررسی ۵۳ ژنوتیپ برنج از لحاظ عملکرد دانه و اجزای عملکرد در دو محیط تنش کم‌آبی و نرمال، در مجموع ۱۱ رقم هوازی و دو رقم درفک و گوهر را به‌عنوان ژنوتیپ‌های برتر شناسایی کردند. در مطالعه بخشی‌پور و همکاران (Bakhsipour *et al.*, 2018)، ژنوتیپ‌های علی کاظمی، هاشمی، طارم و سنگ جو، کم‌ترین مقدار شاخص حساسیت به تنش را به‌خود اختصاص دادند و متحمل‌ترین ژنوتیپ‌ها در شرایط تنش خشکی بودند و در مقابل، ژنوتیپ‌های گوهر، دم‌سیاه، ندا و خزر به‌ترتیب با بیش‌ترین مقدار شاخص حساسیت به تنش، به‌عنوان حساس‌ترین ژنوتیپ‌ها معرفی شدند. شریفی و همکاران (Sharifi *et al.*, 2018) برای رتبه‌بندی ۱۴ لاین موتانت و چهار رقم والدی (هاشمی، طارم محلی، خزر و گیلانه) از نظر تحمل به خشکی، از مقادیر شاخص تنش (SI) استفاده کردند. بر اساس این شاخص، رقم‌های والدی هاشمی، خزر، طارم محلی و گیلانه به‌عنوان حساس و لاین‌های موتانت حاصل از آن‌ها با کم‌ترین مقدار SI به‌عنوان ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی شناسایی شدند. کندل و همکاران (Kandel *et al.*, 2022) همبستگی مثبت و بالایی را بین عملکرد دانه با شاخص تحمل به تنش و شاخص‌های میانگین بهره‌وری و میانگین هندسی بهره‌وری ارزیابی کردند. این محققین نشان دادند که ژنوتیپ NR119 دارای بالاترین میانگین

بهره‌وری، میانگین هندسی بهره‌وری و شاخص تحمل به تنش و کم‌ترین افت عملکرد بود. در مطالعه‌ای ارتباط ریشه‌زایی عمیق با تعداد ریشه کم‌تر و وزن خشک ریشه مطالعه و گزارش شد که یک ژنوتیپ ایده‌آل مقاوم به خشکی با راندمان مصرف آب بالاتر باید ریشه‌زایی عمیق‌تری داشته باشد (Gobu et al., 2022).

با توجه به کاهش منابع آبی در سال‌های اخیر، خشکی به‌عنوان مانع جدی برای تولید برنج مطرح شده است. هدف از این تحقیق، غربال‌گری ژنوتیپ‌های برنج از نظر تحمل به خشکی با استفاده از شاخص‌های تحمل و حساسیت به تنش و شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل به تنش بود.

مواد و روش‌ها

به‌منظور ارزیابی واکنش ۳۶ ژنوتیپ برنج در دو شرایط بدون تنش و تنش خشکی، آزمایشی در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در مؤسسه تحقیقات برنج کشور اجرا شد. اطلاعات هواشناسی منطقه در جدول ۱ ارائه شده است. رقم‌های برنج مورد استفاده شامل ۱۵ رقم برنج اصلاح شده ایرانی (نعمت، سپیدرود، درفک، گوهر، کادوس، ساحل، دانیال، صالح، ندا، شفق، گیلان، آنام، رش، کیان و توکا)، ۱۵ رقم برنج محلی ایرانی (سنگ جو، غریب، دم‌سیاه، دم‌سفید، دم‌زرد، محمدی چپر، حسن‌سرای آتشیگاه، بینام، غریب سیاه ریحانی، هاشمی، علی‌کاظمی، آبجی بوجی، حسنی، سالاری و اهلمی طارم) و شش رقم برنج خارجی شامل IR64 (به‌عنوان شاهد حساس به خشکی)، Dular (رقم بومی هندوستان به‌عنوان شاهد متحمل به خشکی)، IR28، IR36، IR50 و IR58 بودند. آزمایش در لوله‌های PVC (کنترل‌شده) با قطر ۲۰ سانتی‌متر و طول ۱۰۰ سانتی‌متر زیر باران‌گیر انجام شد. اطراف باران‌گیر کاملاً باز بود و دما و رطوبت نسبی با محیط بیرون تفاوت معنی‌داری نداشت. انتهای لوله‌های PVC با درپوش‌های کونیک مهر و موم شده و جهت تخلیه آب در تیمارهای خشکی سوراخی در انتهای لوله ایجاد شد و برای آب‌بندی شکاف‌ها از درزگیرهای لاستیکی قابل جابجایی استفاده شد. لوله‌ها با حدود ۲۵ کیلوگرم خاک (مخلوط یک سوم شن و دو سوم خاک مزرعه) تا فاصله حدود ۶-۵ سانتی‌متری از لبه بالایی پر شدند. برای به‌دست آوردن تراکم مشابه در بین ستون‌ها از یک پیستون فلزی استفاده شد و پس از افزودن هر پنج کیلوگرم خاک، به‌خوبی با صفحه فلزی فشرده شد. قبل از

پر کردن لوله‌ها، میزان کود شیمیایی بر حسب آزمون خاک و نسبت وزن خاک در لوله‌ها و وزن نظری خاک (دو میلیون کیلوگرم در هکتار) محاسبه و با خاک کاملاً مخلوط شد. عناصر غذایی شامل نیتروژن از منبع اوره به‌مقدار ۱/۶۲۵ گرم، پتاسیم از منبع کلرور پتاسیم به‌مقدار ۱/۲۵ گرم و فسفر از منبع سوپر فسفات تریپل به‌مقدار ۱/۵ گرم در ۲۵ کیلوگرم خاک در نظر گرفته شد. ۷۰ درصد کود اوره و تمام کودهای فسفات و پتاس با خاک مخلوط و باقیمانده کود اوره نیز چهار روز قبل از تخلیه تیمار تنش خشکی به هر دو شرایط نرمال و تنش داده شد. به‌منظور تعیین رطوبت مزرعه، لوله‌ها تا زمانی که حباب از سطح خاک بیرون نیاید، با آب پر شدند. بعد از حدود حداقل دو ساعت، درپوش‌های پایین لوله‌ها باز شد تا آب به تدریج تخلیه شود. درپوش‌ها با دقت برداشته شدند تا از شسته شدن خاک از سوراخ‌ها محافظت شود. بعد از یک شب، درپوش‌ها نصب و لوله‌ها وزن شدند تا وزن آن در ظرفیت مزرعه ۹۱٪ تعیین شود.

بذرهای هر ژنوتیپ ابتدا با محلول سفیدکننده ۱۰٪ ضدعفونی و جهت جوانه‌زنی در ظروف جداگانه‌ای کشت شدند. گیاهچه‌های ۳-۴ برگی هر رقم در لوله‌های PVC در عمق ۲-۳ سانتی‌متری به‌صورت تک‌نشا کاشته شد. در طول دوره رشد مراقبت‌های زراعی لازم شامل مبارزه با علف‌های هرز به‌صورت وجین دستی، کنترل آفات هم‌زمان با پیک هجوم پروانه ساقه‌خوار با استفاده از سم پادان گرانول چهار درصد به‌صورت گرانول‌پاشی و کنترل بیماری بلاست با استفاده از قارچ‌کش تری‌سیکل‌ازول انجام شد. در شرایط بدون تنش، آبیاری به‌طور کامل تا زمان رسیدگی انجام شد، به‌طوری که ارتفاع آب روی خاک همواره در سطح چهار سانتی‌متر حفظ شد. لوله‌های PVC در شرایط خشکی نیز در فواصل منظم، وزن و در صورت لزوم مجدداً با مقدار مشخصی آب آبیاری شدند. گیاهان در پایان مرحله حداکثر پنجه‌زنی و شروع آغازش خوشه (کد ۳۰ بر اساس مقیاس BBCH) در معرض تنش رطوبتی با توقف آبیاری قرار گرفتند. در زمان تخلیه تیمار تنش خشکی، لوله‌ها با پلاستیک پوشانده شدند تا تبخیر به حداقل برسد. این کار با بریدن یک تکه پلاستیک به صورت دایره‌ای با قطر تقریبی ۳۰ سانتی‌متر انجام شد که با نوار چسب روی لوله PVC مهر و موم شد. لوله‌ای شدن تدریجی برگ‌های گیاه برنج قبل از خشک شدن کامل برگ در اثر تنش خشکی مشاهده شد. این شاخص بر اساس میزان لوله‌ای شدن برگ‌ها از صفر (بدون علائم

به‌میزان تنش مورد نظر یعنی $FTSW = 0.2$ (رابطه ۱) یک‌بار در انتهای روز توزین شدند که بسته به رقم بین ۳۷ تا ۵۲ روز طول کشید.

لوله‌ای شدن، بدون تنش) تا ۹ (لوله‌ای شدن کامل، تنش شدید خشکی) برای ژنوتیپ‌های برنج تعیین شد (SES, 2014). همچنین تمام تیمارهای خشکی تا زمان رسیدن

جدول ۱- اطلاعات هواشناسی سال ۱۴۰۲ در مؤسسه تحقیقات برنج کشور- رشت

Table 1. Meteorological information of Rice Research Institute of Iran (RRII), Rasht, Iran, in 2023

Month	Average temperature (°C)		Relative humidity (%)		Rainfall (mm)	Evaporation (mm)	Sunshine duration (hr)
	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum			
April	9.3	20.4	59.8	91.6	53.9	79.0	157.1
May	13.2	23.0	67.7	95.1	116.2	78.8	146.6
June	19.3	29.3	64.3	95.2	62.8	132.8	227.2
July	20.1	29.8	61.4	95.5	131.8	126.2	205.3
August	20.8	33.0	53.9	95.9	37.1	150.0	265.4
September	19.7	28.3	67.7	97.0	184.6	78.0	127.5

(۳) شاخص تحمل $TOL = Y_n - Y_s$

(۴) شاخص تحمل به تنش $STI = \frac{Y_n \times Y_s}{(\bar{Y}_n)^2}$

(۵) میانگین بهره‌وری $MP = \frac{Y_n + Y_s}{2}$

(۷) میانگین هندسی بهره‌وری $GMP = \sqrt{Y_n \times Y_s}$

(۸) میانگین هارمونیک $HM = \frac{2 \times Y_n \times Y_s}{Y_n + Y_s}$

(۹) شاخص عملکرد $YI = \frac{Y_s}{\bar{Y}_s}$

(۱۰) شاخص پایداری عملکرد $YSI = \frac{Y_s}{Y_n}$

(۱۱) شاخص خشکی نسبی $RDI = \frac{Y_s/Y_n}{\bar{Y}_s/\bar{Y}_n}$

در این روابط، Y_n و Y_s به ترتیب عملکرد دانه و زیست‌توده ریشه هر ژنوتیپ در شرایط تنش و بدون تنش و \bar{Y}_n و \bar{Y}_s به ترتیب میانگین عملکرد دانه و زیست‌توده ریشه کلیه ژنوتیپ‌ها در محیط تنش و بدون تنش است. تجزیه خوشه‌ای شاخص‌های تنش بر اساس عملکرد دانه و زیست‌توده ریشه جهت گروه‌بندی و شناسایی ژنوتیپ‌های برتر با استفاده از نرم‌افزار NTSYS 2.02 و تجزیه به مؤلفه‌های اصلی و رسم نمودار بای‌پلات با نرم‌افزار XLSTAT نسخه ۲۰۱۹ انجام شد. ضرایب همبستگی پیرسون بین عملکرد دانه و زیست‌توده ریشه با شاخص‌های تنش با استفاده از م‌افزار SPSS نسخه ۲۶ محاسبه شد. بررسی صحت گروه‌بندی حاصل از تجزیه خوشه‌ای و معنی‌داری توابع تشخیص شناسایی شده با استفاده از آزمون لامبدای ویلکس نیز با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۶ انجام شد.

در انتهای دوره رشد و با سخت شدن دانه‌ها در خوشه، خوشه‌های هر ژنوتیپ برداشت و دانه‌ها جداسازی و در آون در دمای ۷۲ درجه سلسیوس خشک شدند و پس از توزین، عملکرد دانه بر حسب رطوبت ۱۴ درصد محاسبه شد. پس از رسیدن رطوبت در خاک لوله‌های تیمارهای خشکی به سطح ۲۰ درصد آب خاک، لوله‌ها با دقت برداشته و یک شب در آب خیس شدند تا خاک شل شود (Soltani et al., 2000). روز بعد ریشه‌ها تمیز شده و ریشه‌های هر نمونه به مدت دو روز در آون با هوای گرم در دمای ۷۰ درجه سلسیوس خشک و سپس توزین شدند.

$$FTSW = \frac{\text{وزن پایانی لوله} - \text{وزن روزانه لوله}}{\text{وزن روز پایانی} - \text{وزن اولیه لوله}} \quad (1)$$

شاخص‌های تحمل و حساسیت به تنش، شاخص عملکرد و پایداری عملکرد و شاخص خشکی نسبی بر اساس عملکرد دانه و زیست‌توده ریشه ژنوتیپ‌های مورد بررسی در شرایط تنش و بدون تنش با توجه به روابط پیشنهادی توسط فیشر و مائورر (Fischer & Maurer, 1978)، روزیل و هامبلین (Rosielle & Hamblin, 1981)، فرناندز (Fernandez, 1992)، گاووزی و همکاران (Gavuzzi et al., 1997)، بوسلاما و شاپاگ (Bousslama & Schapaugh, 1984) و فیشر و وود (Fischer & Wood, 1979) با استفاده از روابط (۲) تا (۱۰) محاسبه شدند:

$$SSI = \frac{1 - \frac{Y_s}{\bar{Y}_n}}{SI} \quad (2) \quad \text{شاخص حساسیت به تنش}$$

که در آن SI شاخص تنش (Stress Index) بوده و از رابطه $SI = 1 - (\bar{Y}_s/\bar{Y}_n)$ محاسبه شد.

نتایج و بحث

ژنوتیپ‌های مورد مطالعه با استفاده از شاخص‌های مختلف تحمل و حساسیت به تنش از لحاظ عملکرد دانه مورد بررسی قرار گرفتند (جدول ۲). بیش‌ترین و کم‌ترین میانگین عملکرد دانه در شرایط بدون تنش به ترتیب مربوط به رقم گوهر (۲۱/۲۱ گرم در بوته) و رقم IR58 (۱۰/۶۱ گرم در بوته) و در شرایط تنش مربوط به رقم محمدی چپرس (۶/۶۰ گرم در بوته) و رقم حسنی (۱/۶۷ گرم در بوته) بود. از نظر دو شاخص میانگین هندسی بهره‌وری و تحمل به تنش به ترتیب رقم‌های دانیال، علی کاظمی، گوهر، هاشمی، غریب سیاه‌ریحانی، محمدی چپرس، گیلانه و توکا دارای بیش‌ترین مقدار بودند. بر اساس میانگین هارمونیک به ترتیب رقم‌های علی کاظمی، محمدی چپرس، غریب سیاه‌ریحانی، هاشمی، دانیال، توکا، دولا و گیلانه به‌عنوان رقم‌های متحمل به تنش شناسایی شدند. بیش‌ترین مقدار شاخص بهره‌وری متوسط به ترتیب به رقم‌های دانیال، گوهر، علی کاظمی، درفک، نعمت، ساحل، گیلانه و توکا اختصاص یافت. رقم‌های محمدی چپرس و غریب سیاه‌ریحانی در شرایط خشکی عملکرد بیش‌تری نسبت به رقم‌های دانیال و گوهر داشتند، ولی به دلیل بالا بودن عملکرد رقم دانیال و گوهر در شرایط بدون تنش، شاخص بهره‌وری متوسط آن‌ها بالاتر شد. پاسخ گیاهان زراعی و ارزیابی حداکثر عملکرد آن‌ها در شرایط محیطی متنوع وابسته به توانایی متفاوت رقم‌ها در استفاده از شرایط محیطی است. این امر از طریق تنظیم اجزای عملکرد و برهمکنش ژنوتیپ‌ها و محیط به‌هنگام بروز شرایط نامطلوب و مطلوب امکان‌پذیر است. در مجموع بر اساس شاخص‌های مذکور رقم‌های دانیال، علی کاظمی، گوهر، هاشمی، غریب سیاه‌ریحانی، محمدی چپرس و گیلانه از تحمل به تنش بالاتری نسبت به سایر رقم‌ها برخوردار بودند و رقم حسنی کم‌ترین میزان تحمل به خشکی را به‌خود اختصاص داد.

از لحاظ شاخص حساسیت به تنش (SSI) مقادیر بالا نشان دهنده حساسیت ژنوتیپ‌ها به تنش خشکی است. ارزیابی ژنوتیپ‌ها با استفاده از این شاخص، مواد آزمایشی را صرفاً بر اساس مقاومت و حساسیت به تنش دسته‌بندی می‌کند. به‌عبارت دیگر با استفاده از این شاخص می‌توان ژنوتیپ‌های حساس و متحمل را بدون توجه به پتانسیل عملکرد آن‌ها مشخص کرد (Fischer & Maurer, 1978). بر اساس این شاخص، اگر ژنوتیپی در هر دو شرایط تنش و بدون تنش دارای عملکرد بالاتری باشد، اما

درصد تغییرات آن زیاد باشد، به‌عنوان ژنوتیپ متحمل شناسایی نمی‌شود. رقم‌های محمدی چپرس، دولا، غریب سیاه‌ریحانی، هاشمی، کیان، آنام، توکا و علی کاظمی به ترتیب کم‌ترین مقدار شاخص SSI را به‌خود اختصاص دادند و بنابراین متحمل‌ترین ژنوتیپ‌ها در بین ژنوتیپ‌های ارزیابی شده بودند. در مقابل، رقم‌های کادوس، حسنی، دم‌سیاه، IR28، IR50 و غریب با بیش‌ترین مقدار شاخص SSI، به‌عنوان حساس‌ترین ژنوتیپ‌ها شناخته شدند. لازم به ذکر است که شدت تنش (SI) در این مطالعه بر اساس فرمول فیشر و مائورر (Fischer & Maurer, 1978) برابر با ۰/۷۴ بود. خورشیدی و همکاران (Khourshidi *et al.*, 2008) برای غربال ژنوتیپ‌های برنج متحمل و حساس به خشکی، ژنوتیپی که میانگین هندسی بهره‌وری بیش‌تر و حساسیت به تنش کم‌تری نسبت به سایر ژنوتیپ‌ها داشت را به‌عنوان رقم متحمل معرفی کردند.

بوسلاما و شاپاگ (Bousslama & Schapaugh, 1984) شاخص پایداری عملکرد (YSI) را معرفی کردند که نشان دهنده میزان تحمل ژنتیکی رقم به تنش است. بالاترین مقدار این شاخص در رقم‌های محمدی چپرس، دولا، غریب سیاه‌ریحانی، هاشمی، کیان، آنام، توکا و علی کاظمی و کم‌ترین مقدار آن در رقم‌های کادوس، حسنی، دم‌سیاه، IR28 و IR50 مشاهده شد. از لحاظ شاخص تحمل نیز ژنوتیپ‌های با کم‌ترین میزان این شاخص، به‌عنوان متحمل‌ترین ژنوتیپ‌ها شناخته می‌شوند. بر این اساس، رقم‌های دولا، محمدی چپرس، IR58، غریب سیاه‌ریحانی، آنام، کیان و هاشمی به ترتیب کم‌ترین مقدار شاخص تحمل را به‌خود اختصاص دادند. ژنوتیپ‌هایی که دارای شاخص تحمل پایینی هستند، تغییرات کم‌تری را نشان می‌دهند و بر عکس. پایین بودن درصد تغییرات به‌عنوان یک فاکتور تحمل به تنش، بیش‌تر از آن که ارزش زراعی داشته باشد، دارای ارزش فیزیولوژیک است. انتخاب بر اساس شاخص تحمل باعث گزینش ژنوتیپ‌هایی با عملکرد نسبتاً پایین در محیط نرمال و عملکرد پایین در شرایط تنش می‌شود. چنین ژنوتیپ‌هایی از نظر شناسایی همکاران (Schneider *et al.*, 1997) به‌علت پایین بودن عملکرد از نظر زراعی مناسب نیستند. در نتیجه پایین بودن شاخص تحمل الزاماً به معنی بالا بودن عملکرد در شرایط بدون تنش نیست، بلکه ممکن است عملکرد یک ژنوتیپ در شرایط بدون تنش پایین باشد و در شرایط تنش نیز با افت کم‌تری همراه باشد که این باعث کوچک ماندن شاخص تحمل به تنش شود و در نتیجه این ژنوتیپ

(Maurer, 1978) معرفی شد. ژنوتیپ‌های با RDI بزرگ‌تر از یک، دارای مقاومت نسبی به خشکی و ژنوتیپ‌های با RDI کوچک‌تر از یک، دارای حساسیت نسبی به خشکی هستند. این شاخص به ترتیب در رقم‌های محمدی چپرسر، دولار، غریب سیاه‌ریحانی، هاشمی، کیان، آنام، توکا و علی کاظمی دارای بیش‌ترین مقدار بود و کم‌ترین مقدار آن به رقم‌های کادوس، حسنی، دم‌سیاه، IR28 و IR50 تعلق داشت (جدول ۲).

به‌عنوان ژنوتیپ متحمل معرفی شود (Moghaddam & Hadizadeh, 2002). به‌عنوان مثال، ژنوتیپ IR58 در هر دو شرایط دارای عملکرد نسبتاً کمی نسبت به سایر ژنوتیپ‌ها بود، اما به‌دلیل افت کم‌تر عملکرد در شرایط تنش، بر اساس شاخص تحمل به‌عنوان ژنوتیپ متحمل شناسایی شد، در حالی‌که شاخص تحمل به تنش این ژنوتیپ را به‌عنوان حساس معرفی کرد. شاخص خشکی نسبی (RDI) توسط فیشر و مائورر (Fischer &

جدول ۲- شاخص‌های تحمل و حساسیت به خشکی در ژنوتیپ‌های برنج مورد مطالعه بر اساس عملکرد دانه

Table 2. Drought tolerance and sensitivity indices of the studied rice genotypes based on grain yield

Cultivar	TOL	SSI	STI	HM	MP	GMP	YSI	YI	RDI	Yn	Ys	YR
Nemat	14.95	1.07	0.31	6.18	11.18	8.31	0.20	0.99	0.78	18.65	3.70	80.16
Sepidrod	13.09	1.04	0.29	6.16	10.32	7.97	0.22	1.00	0.88	16.86	3.77	77.64
SangJo	10.04	1.13	0.10	3.21	6.87	4.69	0.16	0.49	0.62	11.89	1.85	84.41
Dorfak	14.30	1.03	0.36	6.94	11.42	8.91	0.23	1.14	0.91	18.57	4.27	77.01
Gohar	16.91	1.07	0.42	7.15	12.75	9.55	0.20	1.15	0.80	21.21	4.30	79.74
Kados	15.06	1.19	0.14	3.29	9.35	5.55	0.11	0.49	0.43	16.88	1.82	89.20
Sahel	12.84	0.99	0.37	7.29	11.03	8.96	0.26	1.23	1.04	17.44	4.61	73.59
Danial	15.70	1.01	0.49	8.23	12.98	10.34	0.25	1.37	0.97	20.83	5.13	75.37
Saleh	11.92	1.04	0.24	5.59	9.38	7.24	0.22	0.91	0.88	15.34	3.42	77.70
Gharib	12.28	1.15	0.13	3.60	8.20	5.43	0.14	0.55	0.57	14.33	2.06	85.65
Mohamadi Chaparsar	6.49	0.66	0.39	8.78	9.85	9.30	0.50	1.76	1.99	13.09	6.60	49.57
Domsiah	11.56	1.16	0.11	3.10	7.53	4.83	0.13	0.47	0.52	13.31	1.75	86.83
Domsefid	10.36	1.10	0.13	3.89	7.48	5.40	0.18	0.61	0.72	12.66	2.30	81.83
Hasansarayi	8.42	1.02	0.13	4.23	6.83	5.37	0.24	0.70	0.94	11.03	2.62	76.28
Binam	10.42	1.13	0.11	3.35	7.15	4.89	0.16	0.52	0.62	12.36	1.94	84.33
Domzard	10.74	0.94	0.32	7.07	9.96	8.39	0.30	1.22	1.18	15.33	4.59	70.07
Gharibsiah	7.66	0.74	0.40	8.64	10.09	9.33	0.45	1.67	1.78	13.92	6.26	55.03
Hashemi	8.37	0.77	0.40	8.59	10.30	9.41	0.42	1.63	1.67	14.48	6.11	57.80
Alikazemi	12.39	0.91	0.48	8.81	12.01	10.29	0.32	1.55	1.26	18.20	5.81	68.06
Neda	11.58	0.97	0.33	6.97	10.24	8.45	0.28	1.19	1.10	16.03	4.45	72.25
Abjiboji	12.14	1.14	0.14	3.77	8.24	5.58	0.15	0.58	0.60	14.31	2.17	84.82
Hasani	11.12	1.16	0.10	2.95	7.23	4.62	0.13	0.44	0.51	12.78	1.67	86.96
Salari	11.09	0.95	0.32	6.94	10.01	8.34	0.29	1.19	1.13	15.56	4.47	71.29
Ahlamitaram	11.04	1.09	0.16	4.33	8.10	5.92	0.19	0.69	0.75	13.62	2.58	81.08
Shafagh	9.24	1.02	0.16	4.72	7.55	5.97	0.24	0.78	0.95	12.17	2.93	75.93
Gilaneh	11.56	0.94	0.37	7.64	10.75	9.06	0.30	1.32	1.19	16.52	4.97	69.94
Anam	8.00	0.84	0.28	6.98	8.80	7.83	0.37	1.28	1.48	12.79	4.80	62.51
Rash	10.29	1.01	0.21	5.32	8.46	6.71	0.24	0.88	0.96	13.60	3.31	75.67
Toka	10.19	0.88	0.37	7.82	10.34	8.99	0.34	1.40	1.34	15.43	5.24	66.05
Kian	8.09	0.81	0.32	7.59	9.35	8.43	0.40	1.41	1.56	13.39	5.30	60.43
Dular	6.07	0.69	0.31	7.71	8.76	8.22	0.49	1.53	1.92	11.79	5.73	51.44
IR64	8.66	1.01	0.15	4.48	7.12	5.65	0.24	0.74	0.96	11.45	2.79	75.66
IR50	12.87	1.15	0.14	3.71	8.55	5.63	0.14	0.56	0.56	14.98	2.12	85.87
IR28	13.99	1.15	0.17	4.00	9.28	6.09	0.14	0.61	0.55	16.27	2.28	85.99
IR36	11.09	0.97	0.29	6.61	9.76	8.03	0.28	1.12	1.09	15.30	4.21	72.47
IR58	7.47	0.94	0.15	4.84	6.87	5.77	0.30	0.84	1.17	10.61	3.14	70.44

TOL, tolerance index; SSI, stress susceptibility index; STI, stress tolerance index; HM, harmonic mean; MP, mean productivity; GMP, geometric mean productivity; YSI, yield stability index; YI, yield index; RDI, relative dry index; Yn and Ys, grain yield in normal stress environment, respectively (g/plant); YR, yield reduce (%).

فعال ممکن است عملکردهای مهمی طی دوره پر شدن دانه داشته باشند (Kawata & Soejima, 1974). از نظر زیست‌توده ریشه، رقم‌های حسنی، دم‌زرد، دم‌سفید، درفک، محمدی چپرسر، توکا، سالاری، IR58 و سنگ‌جو به ترتیب دارای بیش‌ترین مقدار برای دو شاخص RDI و YSI و کم‌ترین مقدار برای دو شاخص SSI و TOL بودند. سازگاری ژنوتیپ‌های برنج با شرایط محدود آبی باعث انعطاف‌پذیری در مورفولوژی و آناتومی ریشه می‌شود. تنوع ژنتیکی در صفات ریشه به‌ویژه در طول ریشه، زیست‌توده ریشه و عمق ریشه‌زایی در شرایط مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است (Manikanta *et al.*, 2020; Rejeth *et al.*, 2020). تنش خشکی در زمان پر شدن دانه از طریق تقلیل فتوسنتز باعث کاهش عملکرد دانه می‌شود و بنابراین نیاز مقصد برای پر شدن دانه از طریق انتقال مجدد مواد فتوسنتزی ذخیره شده تامین می‌شود (Tavakoli, 2004). از طرفی در شرایط تنش آبی ملایم، گیاهان با تنظیم اسمزی، رشد ریشه را حفظ می‌کنند اما رشد ساقه کند می‌شود. این اتفاق به دلیل وجود مکانیسم تنظیمی در گرادیان اسمزی است که امکان شل شدن دیواره سلولی را فراهم می‌کند و از این‌رو رشد ریشه‌ها در پتانسیل آب کم نیز ادامه می‌یابد. این مکانیسم برعکس در برگ وجود ندارد و در نتیجه رشد برگ‌ها کند یا مهار می‌شود (Hsiao & Xu, 2000). ویژگی‌های مختلف ریشه از قبیل طول ریشه بلند، قطر ریشه‌های ریز کوچک و تراکم قابل توجه طول ریشه در افق‌های عمیق خاک، جایی که مقدار زیادی رطوبت در دسترس است، به حفظ بهره‌وری گیاه در شرایط خشکی کمک می‌کند (Comas *et al.*, 2013; Uga *et al.*, 2015; Verma *et al.*, 2019). رقم‌هایی با ریشه‌های عمیق و درشت با توانایی بالای شاخه‌دهی و نفوذ به همراه خاصیت ارتجاعی در لوله‌ای شدن برگ‌ها و بسته شدن زودتر روزه‌ها، بهترین ویژگی‌های توصیف شده برای اجتناب از خشکی هستند (Samson *et al.*, 2002). ملاحظه می‌شود که رقم‌های حسنی، دم‌سفید و سنگ‌جو علی‌رغم اینکه بر اساس شاخص‌های تحمل به تنش از نظر زیست‌توده ریشه به‌عنوان ژنوتیپ‌های متحمل شناسایی شدند، اما به دلیل کاهش عملکرد دانه بر اساس شاخص‌های تنش به‌عنوان رقم‌های حساس در نظر گرفته شدند. بنابراین در کنار حفظ نرخ بقا و سازگاری به خشکی، باید به افت عملکرد دانه در ژنوتیپ‌های برتر نیز توجه شود.

شاخص عملکرد (YI) نیز یکی دیگر از شاخص‌ها است که مقادیر بالاتر آن نشان دهنده عملکرد بالای رقم در هر دو شرایط تنش و بدون تنش می‌باشد (Jabari *et al.*, 2007). بر اساس این شاخص نیز به ترتیب رقم‌های محمدی چپرسر، غریب سیاه‌ریحانی، هاشمی، علی کاظمی، دولار، کیان، توکا و دانیال به‌عنوان رقم‌های متحمل به خشکی شناسایی شدند. در نهایت بررسی درصد کاهش عملکرد ژنوتیپ‌ها در دو شرایط تنش و بدون تنش نشان داد که کم‌ترین درصد کاهش مربوط به رقم‌های محمدی چپرسر (۴۹/۵۷ درصد)، دولار (۵۱/۴۴ درصد)، غریب سیاه‌ریحانی (۵۵/۰۳ درصد)، هاشمی (۵۷/۸۰ درصد)، کیان (۶۰/۴۳ درصد) و آنام (۶۲/۵۱ درصد) بود. در مجموع شاید بتوان گفت میزان افت نسبی عملکرد در رقم‌های اصلاح شده نسبتاً بیش‌تر از رقم‌های محلی بود. نقوی و همکاران (Naghavi *et al.*, 2013) شاخص خشکی نسبی (RDI) و شاخص پایداری عملکرد (YSI) که همبستگی بالایی با عملکرد دانه ذرت در شرایط بدون تنش و تنش خشکی دارند را جهت انتخاب ژنوتیپ‌های متحمل پیشنهاد کردند. صفائی چائی‌کار و همکاران (Safaei Chaeikar *et al.*, 2018) رقم نعمت را که عملکرد مناسبی در هر دو شرایط نرمال و خشکی داشت و دارای کم‌ترین مقدار شاخص SSI و TOL و بیش‌ترین مقدار شاخص RDI بود، به‌عنوان رقم متحمل به خشکی معرفی کردند.

برای صفت زیست‌توده ریشه نیز از شاخص‌های تحمل و حساسیت به تنش استفاده شد (جدول ۳). شاخص میانگین هندسی بهره‌وری، میانگین هارمونیک، میانگین بهره‌وری و شاخص تحمل به ترتیب در رقم‌های گوهر، دانیال، نعمت، گیانه، دم‌سفید و شفق دارای بیش‌ترین مقدار بود که نشان دهنده تحمل نسبی این رقم‌ها به تنش می‌باشد. بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار زیست‌توده ریشه در شرایط بدون تنش به ترتیب مربوط به رقم‌های دانیال (۹/۶۱ گرم) و IR64 (۲/۵۸ گرم) و در شرایط تنش مربوط به رقم‌های گوهر (۶/۲ گرم) و غریب سیاه‌ریحانی (۱/۱۲ گرم) بود. رطوبت خاک نقش حیاتی در رشد ریشه، مواد مغذی در دسترس و جذب در ریزوسفر دارد (Wu *et al.*, 2005). به‌نظر می‌رسد رشد ریشه در زمان گلدهی از نظر وزن و تعداد به حداکثر مقدار خود برسد. با این‌حال، انشعاب‌دهی ریشه‌ها با تولید بخش‌های فعال جدید از سیستم ریشه تا زمان بلوغ ادامه می‌یابد. این بخش‌های

جدول ۳- شاخص‌های تحمل و حساسیت به خشکی در ژنوتیپ‌های برنج مورد مطالعه بر اساس زیست‌توده ریشه

Table 3. Drought tolerance and sensitivity indices of the studied rice genotypes based on root biomass

Cultivar	TOL	SSI	STI	HM	MP	GMP	YSI	YI	RDI	Yn	Ys	YR
Nemat	3.31	1.56	1.82	6.23	6.64	6.43	0.60	1.40	0.81	8.29	4.99	39.88
Sepidrod	1.56	1.29	0.67	3.82	3.97	3.89	0.67	0.90	0.90	4.75	3.19	32.87
SangJo	0.17	0.24	0.30	2.62	2.62	2.62	0.94	0.71	1.26	2.70	2.54	6.16
Dorfak	-0.75	-0.64	1.09	4.97	5.00	4.99	1.16	1.51	1.56	4.62	5.38	-16.27
Gohar	2.47	1.12	2.36	7.23	7.44	7.33	0.71	1.75	0.96	8.67	6.20	28.50
Kados	0.44	0.51	0.43	3.12	3.14	3.13	0.87	0.82	1.17	3.36	2.92	13.14
Sahel	2.27	1.74	0.64	3.66	3.99	3.82	0.56	0.80	0.75	5.12	2.85	44.34
Danial	4.63	1.89	2.10	6.55	7.29	6.91	0.52	1.40	0.70	9.61	4.97	48.24
Saleh	0.27	0.25	0.69	3.97	3.97	3.97	0.93	1.08	1.26	4.11	3.84	6.51
Gharib	1.17	0.93	0.82	4.29	4.37	4.33	0.76	1.07	1.03	4.96	3.78	23.66
Mohamadichaparsar	-0.37	-0.55	0.35	2.81	2.82	2.81	1.14	0.85	1.53	2.64	3.00	-13.95
Domsiah	1.09	0.82	0.93	4.58	4.64	4.61	0.79	1.15	1.06	5.19	4.10	20.96
Domsefid	-0.86	-0.68	1.27	5.35	5.39	5.37	1.17	1.64	1.58	4.96	5.82	-17.36
Hasansarayi	0.93	1.24	0.26	2.38	2.47	2.42	0.68	0.56	0.92	2.93	2.00	31.64
Binam	3.02	2.29	0.48	3.02	3.65	3.32	0.41	0.60	0.56	5.16	2.14	58.58
Domzard	-1.04	-0.95	0.99	4.72	4.78	4.75	1.24	1.49	1.67	4.26	5.29	-24.36
Gharibsiah	2.08	2.55	0.16	1.66	2.16	1.89	0.35	0.31	0.47	3.20	1.12	65.08
Hashemi	1.20	1.19	0.48	3.24	3.35	3.30	0.70	0.77	0.93	3.95	2.75	30.42
Alikazemi	2.81	2.24	0.45	2.94	3.51	3.21	0.43	0.59	0.57	4.91	2.10	57.25
Neda	1.08	0.93	0.70	3.95	4.02	3.99	0.76	0.98	1.03	4.56	3.48	23.64
Abjiboji	1.18	0.84	1.05	4.86	4.93	4.90	0.79	1.22	1.06	5.52	4.34	21.39
Hasani	-1.96	-2.48	0.68	3.83	4.07	3.95	1.63	1.42	2.20	3.09	5.05	-63.45
Salari	-0.39	-0.38	0.79	4.23	4.24	4.23	1.10	1.25	1.47	4.04	4.43	-9.67
Ahlamitararam	2.60	1.76	0.80	4.09	4.46	4.27	0.55	0.89	0.74	5.76	3.17	45.04
Shafagh	1.36	0.91	1.16	5.10	5.19	5.14	0.77	1.27	1.03	5.87	4.51	23.19
Gilaneh	1.20	0.75	1.40	5.61	5.67	5.64	0.81	1.43	1.09	6.27	5.07	19.12
Anam	1.61	1.89	0.25	2.28	2.54	2.41	0.52	0.49	0.70	3.35	1.73	48.25
Rash	1.80	1.38	0.74	4.01	4.21	4.11	0.65	0.93	0.87	5.10	3.31	35.18
Toka	-0.36	-0.42	0.56	3.57	3.58	3.57	1.11	1.06	1.49	3.40	3.76	-10.71
Kian	0.94	1.23	0.27	2.44	2.52	2.48	0.69	0.58	0.92	2.99	2.05	31.39
Dular	1.13	0.82	1.01	4.75	4.82	4.78	0.79	1.20	1.06	5.38	4.25	21.06
IR64	0.24	0.36	0.27	2.46	2.46	2.46	0.91	0.66	1.22	2.58	2.34	9.28
IR50	2.84	2.20	0.49	3.08	3.63	3.34	0.44	0.62	0.59	5.05	2.21	56.27
IR28	1.77	1.62	0.47	3.17	3.40	3.28	0.59	0.71	0.79	4.28	2.51	41.34
IR36	4.47	2.48	0.80	3.79	4.82	4.27	0.37	0.73	0.49	7.06	2.59	63.34
IR58	-0.06	-0.06	0.73	4.07	4.07	4.07	1.02	1.15	1.36	4.04	4.10	-1.53

TOL, tolerance index; SSI, stress susceptibility index; STI, stress tolerance index; HM, harmonic mean; MP, mean productivity; GMP, geometric mean productivity; YSI, yield stability index; YI, yield index; RDI, relative dry index; Yn and Ys, grain yield in normal stress environment, respectively (g/plant); YR, yield reduce (%).

شرایط بدون تنش به ترتیب با شاخص‌های بهره‌وری متوسط، میانگین هندسی بهره‌وری، میانگین هارمونیک، شاخص عملکرد، میانگین زیست‌توده ریشه در شرایط تنش، شاخص TOL و STI در سطح احتمال یک درصد و شاخص حساسیت به تنش در سطح احتمال پنج درصد همبستگی مثبت و معنی‌دار داشت و بیش‌ترین همبستگی را با شاخص بهره‌وری متوسط ($r=0/903$) دارا بود. همبستگی بین شاخص پایداری عملکرد و شاخص خشکی نسبی با زیست‌توده ریشه در شرایط بدون تنش نیز منفی بود. در شرایط تنش نیز شاخص‌های بهره‌وری متوسط، میانگین هندسی بهره‌وری، میانگین هارمونیک، شاخص

نتایج ضرایب همبستگی بین شاخص‌های تنش بر اساس عملکرد دانه (جدول ۴)، نشان داد که عملکرد در شرایط بدون تنش به ترتیب با شاخص‌های بهره‌وری متوسط، میانگین هندسی بهره‌وری، TOL و STI در سطح احتمال یک درصد و با میانگین هارمونیک در سطح احتمال پنج درصد همبستگی مثبت و معنی‌دار داشت و بیش‌ترین همبستگی را با شاخص بهره‌وری متوسط ($r=0/906$) دارا بود. همبستگی بین شاخص حساسیت به تنش با عملکرد دانه در شرایط تنش نیز منفی بود. ضرایب همبستگی بین شاخص‌های تنش بر اساس زیست‌توده ریشه نیز (جدول ۵)، نشان داد که زیست‌توده ریشه در

شاخص‌های بهره‌وری متوسط، میانگین هندسی بهره‌وری، میانگین هارمونیک، شاخص تحمل به تنش و شاخص خشکی نسبی را به‌عنوان شاخص‌های برتر معرفی کرد. بر اساس شاخص‌های مذکور، ژنوتیپ‌های دانیال، گوهر، نعمت، گیلان، درفک، دلار، دم‌زرد، هاشمی، علی کاظمی، توکا و محمدی چپرسر که دارای بیش‌ترین مقدار برای این شاخص‌ها بودند، به‌عنوان متحمل‌ترین ژنوتیپ‌های این آزمایش معرفی می‌شوند، در حالی‌که ژنوتیپ‌های حسنی، سنگ جو، بینام، کادوس، حسن‌سرای آتشیگاه، اهلمی طارم، دم‌سفید، دم‌سیاه، IR50 و IR64 که کم‌ترین مقدار این شاخص‌ها را به‌خود اختصاص دادند، حساس‌ترین ژنوتیپ‌های این آزمایش بودند.

عملکرد، شاخص پایداری عملکرد، شاخص تحمل به تنش و شاخص خشکی نسبی همبستگی بالایی با زیست‌توده ریشه نشان دادند که بالاترین مقدار مربوط به شاخص عملکرد (r=۱/۰۰) بود. همبستگی بین شاخص حساسیت به تنش با زیست‌توده ریشه در شرایط تنش نیز منفی بود. به‌طور کلی، شاخص‌هایی که همبستگی بالایی در هر دو شرایط محیطی با عملکرد داشته باشند، می‌توانند به‌عنوان شاخص مناسب معرفی شوند، زیرا امکان تفکیک و شناسایی ژنوتیپ‌های با عملکرد بالا در هر دو شرایط را دارند (Fernandez, 1992). در مجموع، با توجه به نتایج همبستگی بین شاخص‌های مختلف با عملکرد دانه و زیست‌توده ریشه تحت شرایط تنش و بدون تنش، می‌توان

جدول ۴- ضرایب همبستگی بین عملکرد دانه در شرایط تنش و بدون تنش با شاخص‌های تحمل و حساسیت به تنش

Table 4. Correlation coefficients among grain yield under stress and non-stress conditions with stress tolerance and sensitivity indices

Index	TOL	SSI	STI	HM	MP	GMP	YSI	YI	RDI	Ys
Yn	0.839**	0.140 ^{ns}	0.639**	0.416*	0.906**	0.626**	-0.141 ^{ns}	0.291 ^{ns}	-0.141 ^{ns}	0.289 ^{ns}
Ys	-0.278 ^{ns}	-0.900**	0.913**	0.987**	0.666**	0.923**	0.900**	1.000**	0.900**	
RDI	-0.652**	-1.000**	0.648**	0.827**	0.288 ^{ns}	0.669**	1.000**	0.900**		
YI	-0.276 ^{ns}	-0.900**	0.913**	0.987**	0.668**	0.924**	0.900**			
YSI	-0.652**	-0.999**	0.649**	0.827**	0.287 ^{ns}	0.669**				
GMP	0.104 ^{ns}	-0.669**	0.995**	0.969**	0.895**					
MP	0.531**	-0.288 ^{ns}	0.901**	0.760**						
HM	-0.143 ^{ns}	-0.827**	0.960**							
STI	0.123 ^{ns}	-0.649**								
SSI	0.652**									

^{ns}, * and ** Not-significant and significant at 5% and 1% probability levels, respectively.

جدول ۵- ضرایب همبستگی بین زیست‌توده ریشه در شرایط تنش و بدون تنش با شاخص‌های تحمل و حساسیت به تنش

Table 5. Correlation coefficients among root biomass under stress and non-stress conditions with stress tolerance and sensitivity indices

Index	TOL	SSI	STI	HM	MP	GMP	YSI	YI	RDI	Ys
Yn	0.675**	0.379*	0.877**	0.820**	0.903**	0.864**	-0.381*	0.512**	-0.378*	0.512**
Ys	-0.288 ^{ns}	-0.564**	0.827**	0.901**	0.831**	0.872**	0.562**	1.000**	0.565**	
RDI	-0.906**	-1.000**	0.048 ^{ns}	0.167 ^{ns}	0.037 ^{ns}	0.106 ^{ns}	1.000**	0.565**		
YI	-0.288 ^{ns}	-0.564**	0.827**	0.902**	0.831**	0.872**	0.562**			
YSI	-0.907**	-1.000**	0.044 ^{ns}	0.164 ^{ns}	0.034 ^{ns}	0.102 ^{ns}				
GMP	0.215 ^{ns}	-0.104 ^{ns}	0.982**	0.996**	0.995**					
MP	0.294 ^{ns}	-0.036 ^{ns}	0.981**	0.981**						
HM	0.140 ^{ns}	-0.166 ^{ns}	0.975**							
STI	0.267 ^{ns}	-0.047 ^{ns}								
SSI	0.907**									

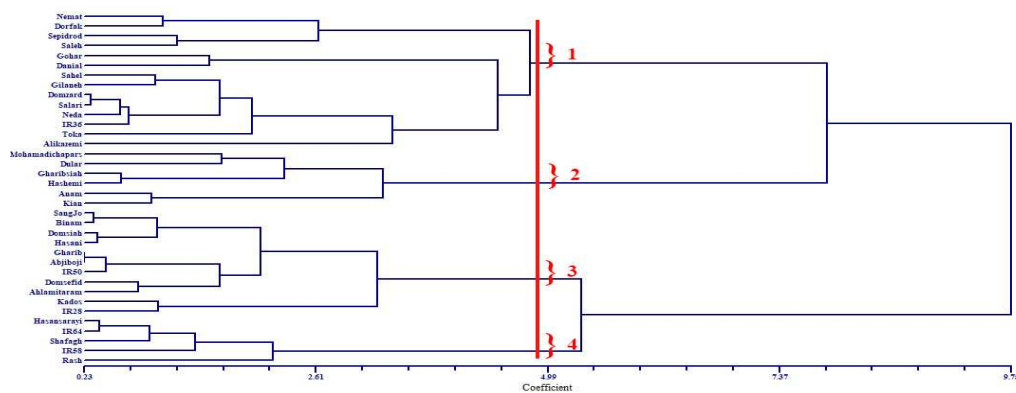
^{ns}, * and ** Not-significant and significant at 5% and 1% probability levels, respectively.

ژنوتیپ‌های برنج مورد مطالعه به چهار گروه تقسیم شدند (شکل ۱). میزان ضریب همبستگی کوفنتیک بین ماتریس فاصله اقلیدسی و ماتریس خروجی از دندروگرام برابر با ۰/۷۶ بود که بیانگر گروه‌بندی قابل قبول رقم‌های مطالعه

به‌منظور گروه‌بندی ژنوتیپ‌ها بر اساس شاخص‌های تحمل به خشکی مبتنی بر عملکرد دانه از تجزیه خوشه‌ای به‌روش دورترین همسایه‌ها (Complete Linkage) و معیار فاصله اقلیدسی استفاده شد. بر این اساس

داشته‌اند عملکرد پایین در هر دو شرایط بدون تنش و تنش (به ترتیب با ۱۳/۹۵ و ۲/۰۵ گرم در بوته) جزء رقم‌های حساس به تنش بودند و در تقسیم‌بندی فرناندز در گروه D قرار گرفتند. ژنوتیپ‌های گروه چهارم شامل رش، شفق، حسن‌سرای آتسگاه، IR64 و IR58 در محیط بدون تنش دارای عملکرد دانه مناسب (۱۱/۷۷ گرم در بوته) بودند، اما کاهش عملکرد ۷۴/۸۹ درصدی در محیط تنش (۲/۹۶ گرم در بوته) نشان دادند و در گروه C تقسیم‌بندی فرناندز قرار گرفتند. با توجه به نتایج به دست آمده ژنوتیپ‌های جای گرفته در گروه A تقسیم‌بندی فرناندز و ژنوتیپ‌های علی‌کاظمی، نعمت، ساحل، دانیال، گیلانه، دم‌زرد، درفک، گوهر، ندا و توکا از گروه B به عنوان ژنوتیپ‌های متحمل به عملکرد مناسب در هر دو محیط بدون تنش و تنش خشکی انتخاب و دارای پایداری عملکرد در هر دو محیط بودند. کرم‌نیا و همکاران (Karamniya et al., 2023) نیز با ارزیابی ۷۰ ژنوتیپ برنج با منشا کشورهای آسیای مرکزی و غربی در سال اول آزمایش در یک آزمایش گلدانی، از تجزیه خوشه‌ای و تقسیم‌بندی فرناندز استفاده و ۱۷ ژنوتیپ متحمل (از گروه A) را همراه با دو ژنوتیپ از گروه‌های دیگر انتخاب و در سال دوم در شرایط مزرعه‌ای مورد ارزیابی قرار دادند و در انتها ژنوتیپ‌های ساحل، گیلانه، علی‌کاظمی، دلار و ندا را به عنوان ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی شناسایی کردند.

شده می‌باشد. نتایج تجزیه تابع تشخیص و آزمون لامبدای ویلکس برای سه تابع شناسایی شده بسیار معنی‌دار و صحت گروه‌بندی ۱۰۰ درصد بود (جدول ۶). گروه اول شامل علی‌کاظمی، دانیال، گیلانه، ساحل، دم‌زرد، سالاری، ندا، صالح، گوهر، درفک، سپیدرود، نعمت، توکا و IR36 در محیط بدون تنش دارای عملکرد دانه مناسب (۱۷/۲۴ گرم در بوته) بودند، ولی کاهش عملکرد ۷۳/۹۲ درصدی در محیط تنش داشتند (۴/۵۰ گرم در بوته) و در گروه B تقسیم‌بندی فرناندز قرار گرفتند. ژنوتیپ‌های گروه دوم شامل محمدی چپرسر، غریب سیاه‌ریحانی، هاشمی، دلار، کیان و آنام به دلیل میانگین عملکرد مناسب در هر دو شرایط بدون تنش و تنش خشکی (به ترتیب ۱۳/۲۵ و ۵/۸۰ گرم در بوته) جزء ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی بودند و بر اساس تقسیم‌بندی فرناندز در گروه A قرار گرفتند. کم‌ترین میزان کاهش عملکرد نسبت به میانگین کل و سایر گروه‌ها (۵۶/۲۲-) متعلق به گروه دوم بود. مقایسه میانگین شاخص‌های تنش نشان داد که این گروه از نظر شاخص‌های Ys، YR، MP، RDI، YSI، GMP، STI، YI و HM دارای مقادیر بالاتر از میانگین کل و از نظر شاخص‌های SSI، TOL و Yn دارای مقادیر پایین‌تر از میانگین کل بودند (جدول ۷). ژنوتیپ‌های گروه سوم شامل اهلمی طارم، دم‌سفید، آبجی بوجی، غریب، بینام، سنگ جو، کادوس، دم‌سیاه، حسنی، IR28 و IR50



شکل ۱- گروه‌بندی ژنوتیپ‌های برنج مورد مطالعه برای شاخص‌های تحمل و حساسیت به تنش بر اساس عملکرد دانه

Figure 1. Grouping the studied rice genotypes for stress tolerance and sensitivity indices based on grain yield

جدول ۶- نتایج تجزیه تابع تشخیص برای شاخص‌های تحمل به خشکی بر اساس عملکرد دانه

Table 6. Results of discriminant function analysis for drought tolerance indices based on grain yield

Test of function (s)	Wilk's Lambda	Chi-square	df	Significance level
1 through 3	0.008	153.76	9	0.00
2 through 3	0.101	72.23	4	0.00
3	0.466	24.07	1	0.00

جدول ۷- میانگین و انحراف از میانگین کل هر یک از گروه‌ها برای شاخص‌های تنش بر اساس عملکرد دانه

Table 7. mean and deviation from total mean of each group for stress indices based on grain yield		TOL	SSI	STI	MP	GMP	HM	YI	YSI	RDI	Yn	Ys	YR
Group	Mean	12.74	0.99	0.35	10.87	8.80	7.13	1.20	0.26	1.03	17.24	4.50	-73.92
1	Deviation from total mean	1.68	-0.01	0.09	1.59	1.48	1.28	0.20	0.00	0.02	2.43	0.74	0.75
	Mean	7.45	0.75	0.35	9.52	8.76	8.07	1.55	0.44	1.73	13.25	5.80	-56.22
2	Deviation from total mean	-3.61	-0.24	0.09	0.24	1.45	2.22	0.55	0.18	0.72	-1.56	2.05	18.45
	Mean	11.90	1.14	0.13	8.00	5.35	3.57	0.55	0.15	0.58	13.95	2.05	-85.31
3	Deviation from total mean	0.84	0.15	-0.13	-1.28	-1.97	-2.27	-0.45	-0.11	-0.43	-0.86	-1.70	-10.64
	Mean	8.82	1.01	0.16	7.36	5.90	4.73	0.79	0.25	0.99	11.77	2.96	-74.89
4	Deviation from total mean	-2.24	0.01	-0.10	-1.91	-1.42	-1.12	-0.21	-0.01	-0.02	-3.03	-0.80	-0.23

راست نمودار بای‌پلات قرار گرفتند و نسبت به سایر ژنوتیپ‌ها دارای عملکرد مناسب در شرایط تنش و عملکرد کم‌تر در شرایط بدون تنش بودند. این رقم‌ها بیش‌ترین شاخص عملکرد، شاخص پایداری عملکرد و شاخص خشکی نسبی را نشان دادند و به دلیل واقع شدن در ناحیه با پتانسیل تولید بالا و حساسیت کم‌تر به خشکی، به عنوان متحمل به خشکی شناخته شدند. ژنوتیپ‌های رش، شفق، بینام، سنگ‌جو، اهلمی طارم، دم‌سفید، دم‌سیاه، حسنی، حسن‌سرای آت‌شگاه، IR58 و IR64 نیز که از نظر شاخص‌های STI، RDI، YI و YSI کم‌ترین مقدار را نسبت به سایر رقم‌ها داشتند، در قسمت پایین و سمت چپ نمودار بای‌پلات قرار گرفتند و دارای عملکرد دانه کم‌تر در هر دو شرایط تنش و بدون تنش بودند.

گیلکی و همکاران (Gilaky et al., 2024) نیز با ارزیابی ژنوتیپ‌های برنج در شرایط خشکی گزارش کردند که مؤلفه اصلی اول ۵۸ درصد از تغییرات را توجیه کرد و ارتباط بالایی با عملکرد دانه در شرایط بدون تنش و تنش و شاخص‌های TOL، STI، HM، GMP و MP داشت و به عنوان مؤلفه پتانسیل عملکرد و تحمل به تنش که قادر به جداسازی ژنوتیپ‌های با عملکرد بالا در شرایط تنش بود، نام‌گذاری شد. همچنین دومین مؤلفه ۳۶/۳۱ درصد از تغییرات را توجیه کرد و ارتباط مثبتی با شاخص‌های TOL و عملکرد در شرایط بدون تنش داشت و بنابراین به عنوان مؤلفه حساسیت به تنش معرفی شد که قادر به جداسازی ژنوتیپ‌های حساس به خشکی بود. فلاح شمسی و همکاران (Fallah-Shamsi et al., 2017) با بررسی ژنوتیپ‌های برنج در شرایط تنش خشکی و استفاده از شاخص‌های تنش گزارش کردند که بیش از ۹۸ درصد از تغییرات کل توسط دو مؤلفه اصلی اول و دوم قابل تفسیر بود. در مطالعه آن‌ها، مؤلفه اول دارای ضرایب مثبت برای

نتایج حاصل از تجزیه به مؤلفه‌های اصلی برای داده‌های مربوط به ۱۱ شاخص و ۳۶ ژنوتیپ نشان داد که دو مؤلفه اصلی اول و دوم به ترتیب ۷۰/۲۰ و ۲۹/۳۹ و در مجموع ۹۹/۵۹ درصد از تغییرات کل را تبیین کردند (جدول ۸). مؤلفه اصلی اول برای شاخص‌های Ys، Mp، GMP، STI، YI، YSI، RDI و HM مقادیر بالا با ضرایب مثبت داشت و به عنوان مؤلفه تحمل به خشکی نام‌گذاری شد. با توجه به مقادیر مثبت و بالای ضرایب این مؤلفه می‌توان ژنوتیپ‌های دارای عملکرد دانه بیش‌تر در هر دو شرایط تنش و بدون تنش را انتخاب کرد. همچنین مؤلفه دوم با شاخص‌های Yn، MP، SSI و TOL دارای همبستگی مثبت با مقادیر بالا و با شاخص‌های RDI و YSI دارای همبستگی منفی با مقادیر بالا بود و به عنوان مؤلفه حساسیت به خشکی نام‌گذاری شد. بنابراین ژنوتیپ‌های با مقادیر بالا برای مؤلفه اصلی اول و مقادیر پایین برای مؤلفه اصلی دوم، متحمل به خشکی می‌باشند. نمودار بای‌پلات مربوط به دو مؤلفه اول و دوم در شکل ۲ ارائه شده است. ژنوتیپ‌های دانیال، گوهر، نعمت، علی کاظمی، ساحل، گیلان، درفک، دم‌زرد، سالاری، ندا، سپیدرود و IR36 با توجه به قرارگیری در سمت راست و بالای نمودار به عنوان ژنوتیپ‌های متحمل به تنش از نظر عملکرد دانه شناسایی شدند. این ژنوتیپ‌ها در واقع ژنوتیپ‌های گروه اول در تجزیه خوشه‌ای و گروه B در تقسیم‌بندی فرناندز هستند که به دلیل عملکرد بیش‌تر در شرایط بدون تنش و مقادیر بالاتر شاخص‌های MP، GMP، HM و STI به عنوان ژنوتیپ‌های متحمل انتخاب شدند، اما افت عملکردی بیش‌تری نسبت به ژنوتیپ‌های گروه A در محیط تنش نشان دادند. ژنوتیپ‌های توکا، غریب سیاه ریحانی، محمدی چپرسر، دولار، آنام، کیان (گروه A فرناندز) و هاشمی نیز در قسمت پایین و سمت

خشکی بالاتر بودند، جهت توسعه رقم‌های جدید برنج با تحمل بیش‌تر به تنش خشکی پیشنهاد می‌شوند.

تضاد منافع

نویسندگان تایید می‌کنند که این تحقیق در غیاب هر گونه روابط تجاری یا مالی که می‌تواند به‌عنوان تضاد منافع بالقوه تعبیر شود، انجام شده است.

رعایت اخلاق در نشر

نویسندگان اعلام می‌کنند که در نگارش این مقاله به‌طور کامل از اخلاق نشر از جمله سرقت ادبی، سوء رفتار، جعل داده‌ها و انتشار دوگانه، پیروی کرده‌اند. همچنین، این مقاله حاصل یک کار تحقیقاتی اصیل بوده و تا کنون به‌طور کامل به هیچ‌زبانی و در هیچ‌نشریه یا همایشی چاپ و منتشر نشده است و هیچ‌اقدامی نیز برای انتشار آن در هیچ‌نشریه یا همایشی صورت نگرفته و نخواهد گرفت.

اجازه انتشار مقاله

نویسندگان با چاپ این مقاله به‌صورت دسترسی باز موافقت کرده و کلیه حقوق استفاده از محتوا، جدول‌ها، شکل‌ها، تصویرها و غیره را به ناشر واگذار می‌کنند.

توکا و محمدی چپرسر به‌عنوان متحمل‌ترین ژنوتیپ‌ها به تنش خشکی شناسایی شدند. نتایج حاصل از تجزیه خوشه‌ای ژنوتیپ‌های برنج بر اساس شاخص‌های تحمل به خشکی مبتنی بر عملکرد دانه نشان داد که ژنوتیپ‌های گروه دوم (گروه A) شامل محمدی چپرسر، غریب سیاه ریحانی، هاشمی، دلار، کیان و آنام به‌همراه ژنوتیپ‌های علی‌کاظمی، نعمت، ساحل، دانیال، گیلانه، دم‌زرد، درفک، گوهر، ندا و توکا از گروه اول جزء ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی بودند. بیش‌ترین درصد افزایش زیست‌توده ریشه (۶۳/۴۵ درصد) در محیط تنش مربوط به رقم حسنی بود که دارای کم‌ترین میانگین عملکرد دانه (۱/۶۷ گرم در بوته) و بیش‌ترین درصد کاهش عملکرد (۸۶/۹۶ درصد) بود. در روش بای‌پلات بر اساس شاخص‌های تحمل (STI)، HM، GMP و MP) و عملکرد دانه در محیط بدون تنش (Yn)، دوازده ژنوتیپ شامل دانیال، گوهر، نعمت، علی‌کاظمی، ساحل، گیلانه، درفک، دم‌زرد، سالاری، ندا، سپیدرود و IR36 به‌عنوان ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی شناخته شدند. در مجموع بر اساس نتایج این مطالعه، رقم‌های دانیال، گوهر، نعمت، گیلانه، درفک، دلار، دم‌زرد، توکا، محمدی چپرسر، علی‌کاظمی، ساحل، غریب سیاه ریحانی، آنام و کیان که دارای عملکرد دانه و تحمل به

References

- Afshari, R., Sabouri, A., Esfahani, M., & Kafi Ghasemi, A. (2018). Investigation of morphological, yield and yield components of aerobic and lowland rice genotypes (*Oryza sativa* L.) under normal and drought stress conditions. *Journal of Crop Breeding* 10(25), 118-128. doi: [10.29252/jcb.10.25.118](https://doi.org/10.29252/jcb.10.25.118).
- Bakhsipour, S., Cambozia, J., Khoshbakht, K., Mahdavi Damghani, A. A., & Hosseini Chaleshtori, M. (2018). Comparative assessment of tolerance and sensitivity indices of Iranian native and improved rice genotypes under normal and drought conditions. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 11(3), 491-502. [In Persian]. doi: [10.22077/escs.2018.763.1147](https://doi.org/10.22077/escs.2018.763.1147).
- Bousslama, M., & Schapaugh Jr, W. T. (1984). Stress tolerance in soybeans. I. Evaluation of three screening techniques for heat and drought tolerance. *Crop Science*, 24(5), 933-937. doi: [10.2135/cropsci1984.0011183X002400050026x](https://doi.org/10.2135/cropsci1984.0011183X002400050026x).
- Catolos, M., Sandhu, N., Dixit, S., Shamsudin, N. A., Naredo, M. E., McNally, K. L., Henry, A., Diaz, M. G., & Kumar, A. (2017). Genetic loci governing grain yield and root development under variable rice cultivation conditions. *Frontiers in Plant Science*, 8, 1763. doi: [10.3389/fpls.2017.01763](https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01763).
- Comas, L. H., Becker, S. R., Cruz, V. M. V., Byrne, P. F., & Dierig, D. A. (2013). Root traits contributing to plant productivity under drought. *Frontiers in Plant Science*, 4, 442. doi: [10.3389/fpls.2013.00442](https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00442).
- Fallah-Shamsi, S. A., Pirdashti, H., Ebadi, A., Esfahani, M., & Raeni, M. (2017). Screening of rice (*Oryza sativa* L.) genotypes for drought tolerance using tolerance indices and multivariate analysis. *Iranian Journal of Crop Sciences*, 18(4), 347-363. [In Persian]. doi: [20.1001.1.15625540.1395.18.4.6.1](https://doi.org/20.1001.1.15625540.1395.18.4.6.1).
- Fernandez, G. C. (1992). Effective selection criteria for assessing plant stress tolerance. International Symposium on Adaptation of Food Crops to Temperature and Water Stress. August 13-18, 1992, Taiwan. pp. 257-270. doi: [10.22001/wvc.72511](https://doi.org/10.22001/wvc.72511).

- 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. doi: [10.1071/AR9780897](https://doi.org/10.1071/AR9780897).
- Fischer, R. A., & Wood, J. T. (1979). Drought resistance in spring wheat cultivars. III. Yield associations with morpho-physiological traits. *Australian Journal of Agricultural Research*, 30(6), 1001-1020. doi: [10.1071/AR9791001](https://doi.org/10.1071/AR9791001).
- Gavuzzi, P., Rizza, F., Palumbo, M., Campanile, R. G., Ricciardi, G. L., & Borghi, B. (1997). Evaluation of field and laboratory predictors of drought and heat tolerance in winter cereals. *Canadian Journal of Plant Science*, 77(4), 523-531. doi: [10.4141/P96-130](https://doi.org/10.4141/P96-130).
- Gilaky, J., Navabpour, S., & Mazandarani, A. (2024). Evaluation of some rice genotypes under drought stress conditions based on stress tolerance indices. *Cereal Research*, 13(4), 301-314. [In Persian]. doi: [10.22124/cr.2024.26168.1800](https://doi.org/10.22124/cr.2024.26168.1800).
- Gobu, R., Dash, G. K., Lal, J. P., Swain, P., Mahender, A., Anandan, A., & Ali, J. (2022). Unlocking the nexus between leaf-level water use efficiency and root traits together with gas exchange measurements in rice (*Oryza sativa* L.). *Plants*, 11(9), 1270. doi: [10.3390/plants11091270](https://doi.org/10.3390/plants11091270).
- Hsiao, T. C., & Xu, L. K. (2000). Sensitivity of growth of roots versus leaves to water stress: biophysical analysis and relation to water transport. *Journal of Experimental Botany*, 51(350), 1595-1616. doi: [10.1093/jexbot/51.350.1595](https://doi.org/10.1093/jexbot/51.350.1595).
- SES. (2014). Standard evaluation system for rice (SES). International Rice Research Institute, Los Banos, Leguna, Philippines.
- Jabari, H., Abbas Akbari, G., Daneshian, J., Allahdadi, I., & Shahbazian, N. (2007). Effect of water deficit stress on agronomic characteristics of Sunflower hybrids. *Iranian Journal of Agriculture Science*, 9(1), 13-22. [In Persian].
- Kandel, B. P., Joshi, L. P., Sharma, S., Adhikari, P., Koirala, B., & Shrestha, K. (2022). Drought tolerance screening of rice genotypes in mid-hills of Nepal using various drought indices. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B: Soil & Plant Science*, 72(1), 744-750. doi: [10.1080/09064710.2022.2072382](https://doi.org/10.1080/09064710.2022.2072382).
- Karamniya, S., Esfahani, M., Allahgholipour, M., Tarang, A., & Shahdi Kumleh, A. (2023). Evaluation of tolerance to drought stress in rice genotypes (*Oryza sativa* L.) from central and west Asian countries. *Journal of Crop Production & Processing*, 13(1), 49-66. [In Persian]. doi: [10.47176/jcpp.13.1.20093](https://doi.org/10.47176/jcpp.13.1.20093).
- Kawata, S. I., & Soejima, M. (1974). On superficial root formation in rice plants. *Japanese Journal of Crop Science*, 43(3), 354-374. doi: [10.1626/jcs.43.354](https://doi.org/10.1626/jcs.43.354).
- Khourshidi Benam, M. B., Abdi, M., Iranipour, Sh., & Akbari, R. (2008). Effect of end season water stress on yield of nine rice cultivars and promising lines based on drought evaluation indices. *Agroecology Journal (Journal of New Agricultural Science)*, 4(11), 17-29. [In Persian].
- Kohansal Vajargah, F., Amiri, E., Paknejad, F., Vazan, S., Kohansal Vajargah, S., & Motamedi, M. (2011). Determination of the suitable drought resistance indices in rice varieties. *Journal of Crop Production Research (Environmental Stresses in Plant Sciences)*, 2(4), 299-313. [In Persian].
- Kumar, A., Sengar, R. S., Pathak, R. K., & Singh, A. K. (2022). Integrated approaches to develop drought-tolerant rice: Demand of era for global food security. *Journal of Plant Growth Regulation*, 42(1), 96-120. doi: [10.1007/s00344-021-10561-6](https://doi.org/10.1007/s00344-021-10561-6).
- Lobet, G., Draye, X., & Périlleux, C. (2013). An online database for plant image analysis software tools. *Plant Methods*, 9(1), 1-8. doi: [10.1186/1746-4811-9-38](https://doi.org/10.1186/1746-4811-9-38).
- Manikanta, C. L., Beena, R., Stephen, R., Manju, R. V., Viji, M. M., & Alex, S. (2020). Physio-morphological plasticity of rice (*Oryza sativa* L.) genotypes exposed to water-stress. *Journal of Tropical Agriculture*, 58(1), 139-145.
- Moghaddam, A., & Hadizadeh, M. H. (2002). Response of corn (*Zea mays* L.) hybrids and their parental lines to drought using different stress tolerance indices. *Seed & Plant Journal*, 18(3), 255-272. [In Persian]. doi: [10.22092/SPIJ.2017.110741](https://doi.org/10.22092/SPIJ.2017.110741).
- Naghavi, M. R., Aboughadareh, A. P., & Khalili, M. (2013). Evaluation of drought tolerance indices for screening some of corn (*Zea mays* L.) cultivars under environmental conditions. *Notulae Scientia Biologicae*, 5(3), 388-393. doi: [10.15835/nsb539049](https://doi.org/10.15835/nsb539049).
- Rahimi, M., Deghani, H., Rabiei, B., & Tarang, A. (2012). Multi-trait mapping of QTLs for drought tolerance indices in rice. *Cereal Research*, 2(2), 107-121. [In Persian].
- Rejeth, R., Manikanta, C. L., Beena, R., Stephen, R., Manju, R. V., & Viji, M. M. (2020). Water stress mediated root trait dynamics and identification of microsatellite markers associated with root traits in rice (*Oryza sativa* L.). *Physiology & Molecular Biology of Plants*, 26(6), 1225-1236. doi: [10.1007/s12298-020-00809-y](https://doi.org/10.1007/s12298-020-00809-y).

- Rosielle, A. A., & Hamblin, J. (1981). Theoretical aspects of selection for yield in stress and non-stress environments. *Crop Science*, 21(6), 943-946. doi: [10.2135/cropsci1981.0011183X002100060033x](https://doi.org/10.2135/cropsci1981.0011183X002100060033x).
- Safaei Chaeikar, S., Rabiei, B., & Rahimi, M. (2018). Evaluation of drought tolerance indices in rice genotypes (*Oryza sativa* L.). *Journal of Crop Breeding*, 10(25), 7-18. [In Persian]. doi: [10.29252/jcb.10.25.7](https://doi.org/10.29252/jcb.10.25.7).
- Safaei Chaeikar, S., Rabiei, B., Samizadeh, H., & Esfahani, M. (2008). Evaluation of tolerance to terminal drought stress in rice (*Oryza sativa* L.) genotypes. *Iranian Journal of Crop Sciences*, 9(4), 315-331. [In Persian].
- Sahebi, M., Hanafi, M. M., Rafii, M. Y., Mahmud, T. M. M., Azizi, P., Osman, M., Abiri, R., Taheri, S., Kalhori, N., Shabanimofrad, M., Miah, G., & Atabaki, N. (2018). Improvement of drought tolerance in rice (*Oryza sativa* L.): genetics, genomic tools, and the *WRKY* gene family. *BioMed Research International*, 2018(1), 3158474. doi: [10.1155/2018/3158474](https://doi.org/10.1155/2018/3158474).
- Samson, B. K., Hasan, M., & Wade, L. J. (2002). Penetration of hardpans by rice lines in the rainfed lowlands. *Field Crops Research*, 76(2-3), 175-188. doi: [10.1016/S0378-4290\(02\)00038-2](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(02)00038-2).
- 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. doi: [10.2135/cropsci1997.0011183X003700010007x](https://doi.org/10.2135/cropsci1997.0011183X003700010007x).
- Sharifi, P., Ebadi, A. A., & Aminpanah, H. (2018). Evaluation of some agronomic traits and their association with grain yield in mutant rice lines under normal and post-anthesis drought stress conditions. *Journal of Crop Breeding*, 10(27), 180-195. [In Persian]. doi: [10.29252/jcb.10.27.180](https://doi.org/10.29252/jcb.10.27.180).
- Soltani, A., Khooie, F. R., Ghassemi-Golezani, K., & Moghaddam, M. (2000). Thresholds for chickpea leaf expansion and transpiration response to soil water deficit. *Field Crops Research*, 68(3), 205-210. doi: [10.1016/S0378-4290\(00\)00122-2](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(00)00122-2).
- Tavakoli, A. R. (2004). The effect of different doses of supplemental irrigation and nitrogen fertilizer on wheat yield components and sabalan. *Seed Magazine*, 19(3), 367-380. [In Persian].
- Uga, Y., Kitomi, Y., Ishikawa, S., & Yano, M. (2015). Genetic improvement for root growth angle to enhance crop production. *Breeding Science*, 65(2), 111-119. doi: [10.1270/jsbbs.65.111](https://doi.org/10.1270/jsbbs.65.111).
- Verma, H., Borah, J. L., & Sarma, R. N. (2019). Variability assessment for root and drought tolerance traits and genetic diversity analysis of rice germplasm using SSR markers. *Scientific Reports*, 9(1), 16513. doi: [10.1038/s41598-019-52884-1](https://doi.org/10.1038/s41598-019-52884-1).
- Vikram, P., Swamy, B. M., Dixit, S., Singh, R., Singh, B. P., Miro, B., Kohli, A., Henry, A., Singh, N. K., & Kumar, A. (2015). Drought susceptibility of modern rice varieties: An effect of linkage of drought tolerance with undesirable traits. *Scientific Reports*, 5(1), 14799. doi: [10.1038/srep14799](https://doi.org/10.1038/srep14799).
- Wu, L., McGechan, M. B., Watson, C. A., & Baddeley, J. A. (2005). Developing existing plant root system architecture models to meet future agricultural challenges. *Advances in Agronomy*, 85(181219), 181-219. doi: [10.1016/S0065-2113\(04\)85004-1](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(04)85004-1).