



Yield changes and some physiological responses of different bread wheat genotypes under terminal water deficit condition

Leila Nasirzadeh¹ , Behzad Sorkhilaleloo²  , Eslam Majidi Haravan¹  & Foad Fatehi³ 

¹ Department of Horticultural Science and Agronomy, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

² National Plant Gene Bank of Iran, Seed and Plant Improvement Institute in Karaj, Iran.

³ Department of Agriculture, Payame Noor University (PNU), Karaj, Iran.

 Corresponding author. E-mail: behzad.sorkhilaleloo20@gmail.com

ABSTRACT

Introduction: Wheat is a strategic product in the world's food security, as it occupies one-sixth of the world's cultivated area. It is the main food crop in Iran, and at the same time, most of the cultivated areas of this crop face environmental stresses such as drought, which leads to a decrease in its yield. Drought stress causes a wide range of plant reactions, including growth and yield changes. Therefore, to achieve maximum adaptability and yield in drought conditions, the present experiment was conducted in Karaj's climatic conditions on eight important wheat genotypes (obtained from the National Plant Gene Bank of Iran).

Materials and methods: The experiment was conducted as a split-plot design based on randomized complete block design (RCBD) with three replicates during the 2016-2017 cropping season in Karaj. The main factor was the irrigation regime at two levels, including control (irrigation based on the water requirement of the plant during the growth period until physiological maturity) and water deficit stress (interruption of irrigation from the beginning of spike appearance until physiological maturity) in the main plots and eight different bread wheat genotypes (Star, Sirvan, Roshan, Mehrgan, 2019, 3737, 3729, and 4228) in the sub-plots. Seed yield and physiological traits, including leaf relative water content, leaf photosynthetic pigment content, leaf proline content, and the activity of antioxidant enzymes (catalase and superoxide dismutase) were measured at the end of grain filling stage; then, data analyzed using principal component analysis and cluster analysis.

Results: According to the results, a significant difference was observed between different genotypes of wheat in terms of reduced biological yield and grain yield under water deficit stress compared to the control treatment. In these conditions, the highest and lowest decrease in grain yield was observed in genotypes 3737 (47%) and 4228 (24%), respectively. Also, the content of photosynthetic pigments and the relative water content of the studied genotypes decreased under water deficit condition. Despite the decrease in "chlorophyll a" content in genotypes 4228 and 3729, there was no significant difference with the control treatment under water deficit conditions. The most changes in these conditions were related to Genotype 3737, with a 25% decrease compared to the control treatment. Contrary to plant performance, leaf proline content increased as an important factor in water deficit conditions. The highest accumulation of proline in leaves was observed in Genotype 4228 at 9.1 times under water deficit conditions and the lowest amount in Genotype 3729 at 2.5 times compared to normal irrigation conditions. The results of principal component analysis (PCA) showed that Genotypes 4228 and 3729 had a negative and significant relationship with Mehrgan and Star. The results of agglomerative hierarchical clustering (AHC) demonstrated that Genotypes 3729 and 4228 were placed in Cluster 1, genotypes 1399, 3737 and Sirvan were grouped together in Cluster 2, and Genotypes Star, Mehrgan and Roshan were located in Cluster 3.

Conclusion: Physiological responses of bread wheat genotypes to water deficit stress at the end of the growing season were different, which caused different alternations in the growth and yield of plants under water deficit conditions.

Keywords: Antioxidant enzymes, Photosynthetic pigments, Principal component analysis, Proline.

Article Type: Research Article

Article history: Received: 21 Apr 2023, Revised: 08 May 2023, Accepted: 25 May 2023, Published online: 22 Jun 2023

Cite this article: Nasirzadeh, L., Sorkhilaleloo, B., Majidi Haravan, E. & Fatehi, F. (2023). Yield changes and some physiological responses of different bread wheat genotypes under terminal water deficit condition. *Cereal Biotechnology and Biochemistry*, 2(2), 170-189. DOI: [10.22126/cbb.2023.9271.1049](https://doi.org/10.22126/cbb.2023.9271.1049)



© The Author(s).

[10.22126/cbb.2023.9271.1049](https://doi.org/10.22126/cbb.2023.9271.1049)

Publisher: Razi University



بررسی تغییرات عملکرد و برخی پاسخ‌های فیزیولوژیک ژنوتیپ‌های مختلف گندم نان در شرایط تنش کم‌آبی انتهای فصل رشد

لیلا نصیرزاده^۱، بهزاد سرخی‌الله‌لو^۲✉، اسلام مجیدی هروان^۱ و فواد فاتحی^۳

^۱ گروه باغبانی و علوم زراعی، دانشکده کشاورزی و صنایع غذایی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران.

^۱ بخش ژنتیک و بانک ژن ملی گیاهی ایران، موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، کرج، ایران.

^۲ گروه کشاورزی، دانشگاه پیام نور، کرج، ایران.

✉ نویسنده مسئول، رایانامه: behzad.sorkhialeloo20@gmail.com

چکیده

مقدمه: گندم محصولی استراتژیک است و نقش مهمی در امنیت غذایی جهان بازی می‌کند، به طوریکه بیش از ۱۵ درصد سطح زیر کشت جهان را پوشش می‌دهد. تغییرات جوی که به‌طور غالب در نتیجه فعالیت صنعتی زیاد حادث شده است، سبب ایجاد تنش خشکی در بیش‌تر نقاط جهان گردیده است. تنش خشکی موجب پیامدهای مخرب از جمله کاهش رشد و عملکرد با تغییر فعالیت‌های بیوشیمیایی گیاه می‌شود. بنابراین به‌منظور دستیابی به بیش‌ترین سازگاری و عملکرد گندم در شرایط کم‌آبی، آزمایش حاضر در شرایط آب و هوایی کرج روی هشت ژنوتیپ مهم گندم نان (تهیه شده از بانک ژن گیاهی ملی ایران) انجام شد.

مواد و روش‌ها: آزمایش در قالب طرح کرت‌های خرد شده و بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در سال زراعی ۹۶-۱۳۹۵ در شرایط آب و هوایی کرج انجام شد. تیمار رطوبتی در دو سطح شامل شاهد (آبیاری براساس نیاز آبی گیاه در طول دوره نمو تا زمان رسیدگی فیزیولوژیک) و تنش کم‌آبی به صورت قطع آبیاری از زمان ظهور سنبله‌ها تا رسیدگی فیزیولوژیک در کرت‌های اصلی و ۸ ژنوتیپ مختلف گندم نان (استار، سیروان، روشن، مهرگان، ۱۳۹۹، ۳۷۳۷، ۳۷۲۹ و ۴۲۲۸) در کرت‌های فرعی قرار گرفتند. سپس در زمان رسیدگی تکنولوژیک عملکرد دانه و برخی صفات‌های مرتبط با آن و همچنین در اواخر مرحله نموی پرشدن دانه صفت‌های فیزیولوژیک و بیوشیمیایی شامل محتوای نسبی آب برگ، محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی برگ، محتوی اسید آمینه پرولین برگ، و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی شامل کاتالاز و سوپراکسید دیسموتاز اندازه‌گیری شدند و در ادامه توسط روش تحلیل مولفه‌های اصلی و تجزیه خوشه‌ای مورد بررسی قرار گرفتند.

یافته‌ها: طبق نتایج تحقیق، اختلاف معنی‌داری بین ژنوتیپ‌های مختلف گندم نان از نظر کاهش عملکرد بیولوژیک و عملکرد دانه در شرایط تنش کم‌آبی نسبت به تیمار کنترل مشاهده شد. در این شرایط بیش‌ترین و کم‌ترین کاهش عملکرد دانه به ترتیب به ژنوتیپ‌های ۳۷۳۷ (۴۷ درصد) و ۴۲۲۸ (۲۴ درصد) متعلق بود. همچنین محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی و محتوای نسبی آب برگ‌های ژنوتیپ‌های مورد بررسی در تیمار تنش کم‌آبی کاهش یافت. در شرایط تنش کم‌آبی، علی‌رغم کاهش محتوی کلروفیل a در ژنوتیپ‌های ۴۲۲۸ و ۳۷۲۹، اختلاف معنی‌داری با تیمار شاهد نداشتند. بیش‌ترین تغییرات در این شرایط مربوط به ژنوتیپ ۳۷۳۷ با ۲۵ درصد کاهش نسبت به تیمار شاهد بود. محتوای اسید آمینه پرولین برگ‌ها به عنوان فاکتوری مهم در شرایط کم‌آبی، برعکس عملکرد گیاه افزایش یافت. بیش‌ترین تجمع پرولین برگ‌ها در شرایط تنش در ژنوتیپ ۴۲۲۸ با ۹/۱ برابر و کم‌ترین مقدار آن در ژنوتیپ ۳۷۲۹ با ۲/۵ برابر نسبت به شرایط آبیاری نرمال بود. نتایج تجزیه به مولفه‌های اصلی نشان داد که ژنوتیپ‌های ۴۲۲۸ و ۳۷۲۹ دارای رابطه منفی و معنی‌داری با مهرگان و استار بودند. نتایج خوشه‌بندی سلسله مراتبی بیانگر این بود که ژنوتیپ‌های ۳۷۲۹ و ۴۲۲۸ در کلاستر ۱، ژنوتیپ‌های ۱۳۹۹، ۳۷۳۷ و سیروان در کلاستر ۲ و ژنوتیپ‌های استار، مهرگان و روشن در کلاستر ۳ قرار گرفتند.

نتیجه‌گیری: پاسخ‌های فیزیولوژیک ژنوتیپ‌های گندم نان به تنش کم‌آبی انتهای فصل رشد متفاوت بود به طوریکه سبب تغییرات متفاوت در رشد و عملکرد گیاهان تحت تنش شد.

واژه‌های کلیدی: آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، پرولین، تحلیل مولفه‌های اصلی، رنگدانه‌های فتوسنتزی.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

نوع مقاله: دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۰۱ اصلاح: ۱۴۰۲/۰۲/۱۸ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۰۴، انتشار آنلاین: ۱۴۰۲/۰۴/۰۱

استناد: نصیرزاده، ل.، سرخی‌الله‌لو، ب.، مجیدی هروان، ا. و فاتحی، ف. (۱۴۰۲). بررسی تغییرات عملکرد و برخی پاسخ‌های فیزیولوژیک ژنوتیپ‌های مختلف گندم نان در

شرایط تنش کم‌آبی انتهای فصل رشد. *بیوتکنولوژی و بیوشیمی غلات*، ۲(۲)، ۱۷۰-۱۸۹. DOI: [10.22126/cbb.2023.9271.1049](https://doi.org/10.22126/cbb.2023.9271.1049)



مقدمه

خشکی از مهم‌ترین تنش‌های محیطی می‌باشد که هر ساله خسارت‌های چشمگیری به محصولات زراعی در جهان در مناطق خشک و نیمه خشک وارد می‌نماید. تنش خشکی حدود ۳۲ درصد از ۹۹ میلیون هکتار در کشورهای در حال توسعه و حداقل ۶۰ میلیون هکتار زمین زیر کشت گندم در کشورهای توسعه یافته را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Ghahremaninejad *et al.*, 2021). ایران با وسعت ۱۶۵ میلیون هکتار صرف نظر از منطقه مرطوب شمالی که فقط ۱۰ درصد سطح کل کشور را شامل می‌شود، ۹۰ درصد جزء مناطق خشک و نیمه خشک محسوب می‌شود (Soltai *et al.*, 2020). افزایش جمعیت و به طبع آن نیاز بیش‌تر به منابع آب شهری و صنعتی، سبب کاهش چشمگیر آب در حوضه کشاورزی شده و در آینده نیز این مسئله بیش‌تر نمود پیدا خواهد کرد. بحران آب در مناطق خشک و نیمه خشک سبب کاهش معنی‌دار عملکرد و الگوی کشت کشاورزان شده است. بنابراین برنامه‌های اصلاحی بر تولید رقم‌های متحمل به خشکی متمرکز شده‌اند (Soltai *et al.*, 2020).

تنش خشکی سبب تغییرات فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی مهمی در گیاهان می‌شود. مسیر اصلی فتوسنتز که روزنه‌ها هستند تحت تأثیر تنش خشکی قرار می‌گیرند و سبب کاهش عملکرد گیاه خواهند شد. در شرایط تنش تولید گونه‌های فعال اکسیژن (ROS: Reactive Oxygen

Species) بیش‌تر می‌شود و در این شرایط سیستم دفاعی گیاه مانند آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و اسمولیت‌های سازگار اهمیت ویژه‌ای دارند (Alipour *et al.*, 2018; Soltai *et al.*, 2020). شناخت سازوکارهای سازگاری فیزیولوژیک و کنترل کننده تحمل خشکی جنبه بسیار مهمی در زیست-شناسی گیاهی می‌باشد. از دلایل کندی پیشرفت در مطالعه تنش خشکی کمبود شناخت فرآیندهای فیزیولوژیک و سازوکارهای درگیر در شرایط تنش است (Nasirzadeh *et al.*, 2021). در تحقیقات مختلفی تغییر در مسیرهای بیوشیمیایی گیاه گندم در شرایط تنش با کاهش محتوای فتوسنتزی (Muhammad *et al.*, 2022)، افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی (Behboudi *et al.*, 2019; Paul *et al.*, 2022) و تجمع انواع اسمولیت‌ها مانند پرولین (Du *et al.*, 2023) گزارش شده است.

گندم محصول محوری کشاورزی است که اهمیت خاصی در مصرف مواد غذایی مردم دارد. یکی از محصولات مهم اقتصادی است که خودکفایی و صادرات آن از اهداف بلند مدت کشور است (Ghahremaninejad *et al.*, 2021). بررسی تغییرات بیوشیمیایی از مهمترین مسیرهای دستیابی به ژنوتیپ برتر در گیاهان تحت تنش است که چنین موضوعی در تحقیقات پیشین گزارش شده است (Pandey *et al.*, 2023; Pastuszak *et al.*, 2022). در خصوص ارقام و ژنوتیپ‌های مختلف گندم در شرایط تنش کم‌آبی تحقیقات متعددی انجام شده است. برای مثال، نصیرزاده و

تحقیق حاضر به صورت کرت‌های خرد شده در قالب طرح پایه بلوکهای کامل تصادفی در سه تکرار در منطقه کرج و در سال زراعی ۹۶-۱۳۹۵ انجام شد. خاک منطقه مورد مطالعه لومی شنی با pH ۷/۱، هدایت الکتریکی ۰/۹۸ دسی‌زیمنس بر متر، ۰/۲۷ درصد نیتروژن و مقدار فسفر و پتاسیم به ترتیب ۱۱/۴ و ۲۳۸ میلی‌گرم در کیلوگرم بود. تغییرات دما و بارش منطقه مورد مطالعه در طول دوره رویش در شکل ۱ نشان داده شده است. در این تحقیق تیمار رطوبتی در دو سطح شامل: ۱) کنترل رطوبتی (آبیاری براساس نیاز آبی گیاه تا زمان رسیدگی فیزیولوژیک) و ۲) تنش کم‌آبی (قطع آبیاری از زمان ظهور سنبله‌ها تا زمان رسیدگی فیزیولوژیک) در کرت‌های اصلی و هشت ژنوتیپ مختلف گندم نان شامل: ۴۲۲۸، ۳۷۲۹، ۳۷۳۷، ۱۳۹۹، مهرگان، روشن، سیروان و استار در کرت‌های فرعی قرار گرفتند. ژنوتیپ‌های مورد بررسی گندم، از بانک ژن گیاهی ملی ایران تهیه شدند. در این تحقیق هر کرت شامل سه پشته (با عرض ۵۰ سانتی‌متر) و روی هر پشته دو ردیف کاشت بود. در واقع هر کرت دارای شش خط کاشت با فاصله ۲۰ سانتی‌متر و با طول شش متر با مساحت ۷/۲ مترمربع بود که با احتساب یک خط ابتدایی و یک خط انتهایی برای طول کرت و نیم متر از بالا و پایین برای عرض کرت، مساحت برداشت چهار مترمربع برای هر کرت شد. میزان بذر مصرفی در متر مربع ۳۰۰ بذر براساس وزن هزار دانه بود. عملیات خاکورزی با شخم زدن زمین توسط گاواهن

همکاران (Nasirzadeh *et al.*, 2021) در تحقیقی نشان داد که تنش کم‌آبی سبب کاهش عملکرد گندم در سه رقم مختلف متفاوت شد. در تحقیقی دیگر ۱۴ ژنوتیپ مختلف گندم و ذرت در شرایط تنش خشکی بررسی شدند و نتایج نشان داد که ژنوتیپ‌های مختلف واکنش متفاوتی به تنش کم‌آبی داشتند. در تمامی آن‌ها عملکرد دانه در شرایط تنش کم‌آبی کاهش یافت. در این شرایط بین کاهش کمتر عملکرد دانه و غلظت ساکارز و محتوی پرولین برگ‌ها رابطه مثبت و معنی‌داری وجود داشت (Mkhabela *et al.*, 2019). همچنین گرزسیاک و همکاران (Grzesiak *et al.*, 2019) در تحقیقی نشان دادند که تحلیل مولفه‌های اصلی ابزاری مناسب جهت گروه‌بندی ژنوتیپ‌های مختلف گندم در شرایط تنش خشکی است. بنابراین با توجه به تحقیقات انجام شده، تعیین ژنوتیپ برتر از نظر عملکرد برای کشاورزان این محصول مهم امری ضروری است. با توجه به وجود اقلیم‌های مختلف در ایران که در اکثر آن‌ها تنش خشکی در طول فصل زراعی وجود دارد و از سویی دیگر پدیده تغییر اقلیم، ضرورت انجام تحقیقات در جهت معرفی رقم‌های پرعملکرد در این شرایط را بیش‌تر مشخص می‌کنند. در این شرایط بررسی خصوصیات فیزیولوژیک کمک شایان توجهی عملکرد گیاه دارد. بنابراین، هدف تحقیق حاضر بررسی برخی از پاسخ فیزیولوژیک ژنوتیپ‌های مختلف گندم به تنش کم‌آبی است.

سانتی‌گراد در آون و دمای ۷۲ درجه سانتی‌گراد خشک شده و پس از این زمان، وزن خشک (DW: Dry Weight) نمونه‌ها نیز یادداشت شد و با استفاده از معادله ۱ محتوای نسبی آب برگ محاسبه گردید (Martinez et al., 2022):

$$RWC(\%) = (FW - DW) / (TW - DW) \times 100 \quad (1)$$

محتوای کلروفیل a و b: برای اندازه‌گیری محتوای کلروفیل، ابتدا ۰/۱ گرم نمونه برگگی از هر تیمار به طور جداگانه را در هاون چینی با سه میلی‌لیتر استون ۸۰ درصد کاملاً ساییده و حجم نهایی عصاره به ۱۵ میلی‌لیتر افزایش یافت. سپس عصاره با استفاده از سانتریفیوژ به مدت ۱۰ دقیقه با سرعت ۵۰۰۰ صاف شد. در ادامه از دستگاه اسپکتروفتومتر (Shimadzu مدل UV-A160) اندازه‌گیری میزان جذب نمونه‌ها استفاده شد. میزان جذب عصاره استخراج‌شده در طول موج‌های ۶۴۵ نانومتر و ۶۶۳ نانومتر قرائت شد. سپس با استفاده از روابط ۲ و ۳ به ترتیب محتوای کلروفیل a، کلروفیل b بر اساس روش آرنون محاسبه شد (Arnon, 1949):

برگردان‌دار با عمق ۳۰ سانتی‌متر انجام شد. سپس با استفاده از دیسک زمین مسطح و بقایای گیاهای کامل خرد شدند و بلافاصله عملیات مالشی برای تسطیح کردن کامل زمین استفاده شد. بذور در عمق چهار تا پنج سانتی‌متری در ۱۳ آبان ماه ۱۳۹۵ در کرج کشت شدند. تعداد دفعات آبیاری بر حسب نیاز گیاه و در طول فصل زراعی پنج نوبت بود. برای جلوگیری از خسارت علف‌های هرز پهن برگ از علف‌کش گرانستار و علف‌های هرز نازک برگ از علف‌کش پوماسوپر استفاده شد. صفت‌های بیوشیمیایی در اواخر مرحله پرشدن دانه (کد زادوکس ۸۵) اندازه‌گیری شدند.

محتوای نسبی آب برگ: به منظور اندازه‌گیری محتوای نسبی آب برگ (RWC: Relative Water Content)، پس از نمونه‌برداری برگ‌ها در داخل کیسه پلاستیکی و روی یخ به سرعت به آزمایشگاه منتقل شدند. در ادامه در آزمایشگاه بلافاصله وزن تر آن‌ها ثبت گردید. سپس برگ‌ها به مدت ۴ ساعت در آب مقطر شناور شدند پس از آن، مجدداً وزن آماس (TW: Turgid Weight) آن‌ها ثبت گردید. بعد برگ‌ها به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۷۰ درجه

$$= [(12.7 \times A_{663}) - (2.69 \times A_{645})] \times V / 1000 \times W \quad (2)$$

میلی‌گرم کلروفیل a در هر گرم برگ‌تر

$$= [(22.9 \times A_{645}) - (4.69 \times A_{663})] \times V / 1000 \times W \quad (3)$$

میلی‌گرم کلروفیل b در هر گرم برگ‌تر

فعالیت این آنزیم با قابلیت آن در بازدارندگی واکنش احیایی فتوشیمیایی نیتروبلوتترازولیوم (NBT) تعیین شد. مخلوط واکنش محتوی بافر فسفات ۵۰ میلی‌مولار با (PH=۷)، متیونین ۱۳ میلی‌مولار، Na-EDTA ۰/۱ میلی‌مولار، نیتروبلوتترازولیوم (NBT) ۷۵ میکرومول، ریبوفلاوین ۷۵ میکرومول و مقدار ۱۰۰ میکرولیتر از عصاره می‌باشد. در دو لوله آزمایش ۳ میلی‌لیتر از محلول فوق بدون عصاره آنزیمی ریخته، یکی در دستگاه دور از نور و دیگری در حضور نور فلئورسنت به‌عنوان شاهد قرار داده شد. هر دو دقیقه یک بار جذب محلول در حالت Photometric و طول موج ۵۶۰ نانومتر با دستگاه اسپکتروفوتومتر قرائت شد. این روش براساس تبدیل NBT به فورمازان در حضور نور و تشکیل رنگ می‌باشد. در صورتیکه آنزیم سوپر اکسید دیسموتاز در محیط وجود داشت، از انجام واکنش مذکور ممانعت کرده و تشکیل و ظهور رنگ را کاهش داد. پس از ۱۸ دقیقه جذب آنها توسط دستگاه اسپکتروفوتومتر و طول موج ۵۶۰ نانومتر قرائت شد. تفاوت بین جذب هر عصاره پس از ۱۸ دقیقه و جذب مخلوط بدون آنزیم نشان‌دهنده بازداشت واکنش خود به خود به تشکیل فورمازان توسط سوپراکسید دیسموتاز بود. فعالیت این آنزیم بر حسب واحد آنزیمی به ازای گرم وزن تر محاسبه شد (Giannopolitis and Ries, 1977).

فعالیت آنزیم کاتالاز: برای استخراج آنزیم‌ها نمونه‌های گیاهی در هاون چینی با ازت مایع خرد و به‌صورت پودر در-آمد. سپس ۰/۵ میلی‌لیتر بافر فسفات سدیم با pH معادل ۶

در روابط بالا، A: میزان جذب در طول موج مورد نظر، V: حجم نهایی استون ۸۰ درصد برحسب میلی‌لیتر و W: اندازه برگ تازه برحسب گرم می‌باشد.

محتوی پرولین برگ‌ها: بافت تر برگ تیمارهای مورد تحقیق برای اندازه‌گیری پرولین استفاده شد. برای این منظور ۰/۱ گرم نمونه گیاهی در ۱۰ میلی‌لیتر محلول ۳ درصد سولفوسایسیلیک اسید سائیده شد و عصاره حاصل به مدت ۵ دقیقه با سرعت ۱۰۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ شد. آزمایش با برداشت ۲ میلی‌لیتر از مایع رویی و مخلوط با ۲ میلی‌متر استیک اسید خالص و معرف نین هیدرین ادامه یافت و در حمام آب‌گرم (۱۰۰ درجه سانتی‌گراد) به مدت یک ساعت قرار داده شدند و بلافاصله عمل سرد شدن لوله‌های محتوی مخلوط در حمام یخ سرد انجام گرفت. پس از اضافه شدن ۴ میلی‌لیتر تولوئن به مخلوط تهیه شده، کاملاً لوله‌ها را تکان داده و سپس لوله‌ها به مدت ۱۵ تا ۲۰ ثانیه ثابت نگه داشته شدند تا دو لایه مجزا تشکیل گردد. میزان جذب لایه بالایی تشکیل شده که حاوی تولوئن و پرولین بود در طول موج ۵۲۰ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفوتومتر (Shimadzu مدل UV-A160) مشخص شد. سپس از منحنی استاندارد پرولین برای تعیین غلظت پرولین استفاده شد و نتایج به دست آمده به صورت میلی-گرم بر گرم وزن تر بیان شد (Bates et al., 1973).

فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز

ژنوتیپ‌های ۴۲۲۸، ۳۷۲۹، ۳۷۳۷، ۱۳۹۹، مهرگان، روشن، سیروان و استار به ترتیب ۱۵، ۱۶، ۳۶، ۲۱، ۲۶، ۵، ۱۴ و ۳۵ درصد بود (جدول ۱). همچنین تنش کم‌آبی سبب کاهش معنی‌دار عملکرد دانه گندم در ژنوتیپ‌های مختلف شد به طوری‌که مقدار آن از ۸۷۷۳ کیلوگرم در هکتار برای ژنوتیپ ۴۲۲۸ در شرایط عدم تنش کم‌آبی تا ۳۳۲۴ کیلوگرم در هکتار برای مهرگان در شرایط تنش کم‌آبی گزارش شد (جدول ۱).

وزن هزار دانه و شاخص برداشت

نتایج تحقیق نشان داد که وزن هزار دانه در برخی ژنوتیپ‌های تحت تنش کم‌آبی کمتر از آبیاری نرمال بود. بیش‌ترین مقدار تغییرات وزن هزار دانه در میان ژنوتیپ‌ها در شرایط تنش گزارش شد. برای مثال ژنوتیپ ۴۲۲۸ در شرایط بدون تنش به ترتیب ۲۷ و ۲۲ درصد وزن هزار دانه بیشتری نسبت به مهرگان و استار داشتند (جدول ۱). ژنوتیپ‌ها از نظر شاخص برداشت اختلاف معنی‌داری نشان ندادند (جدول ۱).

کلروفیل برگ

نتایج تحقیق نشان داد که مقدار کلروفیل a در بیشتر ژنوتیپ‌های تحت تنش خشکی کمتر از آبیاری نرمال بود. هرچند ژنوتیپ‌های ۴۲۲۸ و ۳۷۲۹ اختلاف معنی‌داری در دو شرایط آبیاری نرمال و تنش خشکی نشان ندادند، اما سایر

به آن اضافه و با دور ۱۳۰۰۰ سانتی‌متر گردید. جهت اندازه‌گیری پروتئین کل و فعالیت آنزیم‌های نمونه‌ها، از محلول رویی برداشت شد. برای سنجش فعالیت آنزیم کاتالاز با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۲۴۰ نانومتر در مدت ۳۰ ثانیه استفاده شد. بافر فسفات سدیم ۲۰ میلی‌مولار با pH معادل ۷ و ۲۰ میکرولیتر هیدروژن پراکساید ۳۰ درصد به‌عنوان پذیرنده الکترون مورد استفاده قرار گرفت. میزان فعالیت کاتالاز بر حسب واحد آنزیمی در گرم وزن تر برگ گردید (Aebi et al., 1984).

تجزیه و تحلیل آماری: از نرم‌افزار آماری SAS (نسخه ۹/۲) برای تجزیه و تحلیل داده‌ها استفاده شد. مقایسه میانگین داده‌ها در سطح احتمال ۵ درصد با آزمون چند دامنه دانکن انجام شد. آنالیزهای چند متغیره شامل تجزیه به مولفه‌های اصلی (PCA) و خوشه‌بندی سلسله مراتبی تجمعی (AHC) بر اساس روش وارد (Ward) توسط نرم‌افزار XLSTAT (نسخه ۲۰۰۹) انجام شد.

نتایج و بحث

عملکرد بیولوژیک و عملکرد دانه

نتایج تحقیق حاضر نشان داد که ژنوتیپ‌های مختلف گندم دارای عملکرد زیست‌توده و عملکرد دانه متفاوتی بودند. خشکی به طور معنی‌داری سبب کاهش عملکرد زیست‌توده و عملکرد دانه گندم در ژنوتیپ‌های مورد بررسی شد. کاهش عملکرد زیست‌توده در شرایط اعمال تنش کم‌آبی برای

به شاهد گزارش شد (شکل ۴ الف) همچنین فعالیت آنزیم کاتالاز در شرایط تنش در تمامی ژنوتیپ‌ها بیشتر از شرایط آبیاری نرمال بود. بیشترین فعالیت آنزیم کاتالاز در در ژنوتیپ ۴۲۲۸ با ۵۶ درصد افزایش نسبت به آبیاری نرمال به دست آمد درحالیکه ژنوتیپ ۳۷۳۷ با کمترین مقدار فعالیت این آنزیم افزایش ۴۴ درصدی نسبت به شرایط آبیاری نرمال داشت (شکل ۴ ب).

آنالیز چند متغیره

نتایج تجزیه به مولفه‌های اصلی (PCA) نشان داد که مولفه اول (F1) با ۴۷/۳۴ درصد ژنوتیپ‌های ۴۲۴۲، ۳۷۲۹، مهرگان و استار را توجیه نمود و مولفه دوم (F2) با ۲۸/۴۲ درصد ژنوتیپ‌های سیروان و روشن را توجیه کرد. ژنوتیپ‌های ۴۲۲۸ و ۳۷۲۹ دارای رابطه منفی و معنی‌داری با مهرگان و استار بودند. چنین روند منفی نیز برای روشن با سیروان گزارش شد. برای متغیرهای مورد تحقیق، پرولین همبستگی منفی و معنی‌داری با وزن هزار دانه، عملکرد بیولوژیک و عملکرد دانه داشت (شکل ۵). نتایج خوشه‌بندی سلسله مراتبی نشان داد که طبق روش وارد (Ward) سه کلاستر برای ژنوتیپ‌های گندم شناسایی شد. ژنوتیپ‌های ۳۷۲۹ و ۴۲۲۸ در کلاستر ۱، ژنوتیپ‌های ۱۳۹۹، ۳۷۳۷ و سیروان در کلاستر ۲ و ژنوتیپ‌های استار، مهرگان و روشن در کلاستر ۳ قرار گرفتند (شکل ۶).

ژنوتیپ‌ها مقدار کلروفیل کمتری تحت تنش نسبت به شاهد (آبیاری نرمال) نشان دادند که بیشترین کاهش (۲۵ درصد) کلروفیل a مربوط به ژنوتیپ ۳۷۳۷ بود (شکل ۲ الف). کلروفیل b کاهش معنی‌داری نشان نداد و مقدار آن بین ژنوتیپ‌های مختلف از ۰/۴۷ تا ۰/۵۸ میلی‌گرم در گرم متفاوت بود (شکل ۲ ب).

محتوای نسبی آب برگ و پرولین برگ

محتوای نسبی آب برگ اختلاف معنی‌داری بین تیمارهای مختلف در شرایط بدون تنش نشان نداد ولی در شرایط تنش خشکی بیشتر ژنوتیپ‌ها در شرایط تنش خشکی مقدار کمتری نسبت به شاهد نشان دادند. ژنوتیپ ۳۷۳۷ و استار به ترتیب با ۱۴ و ۱۵ درصد کاهش در محتوای نسبی آب برگ دارای بیشترین حساسیت به تنش خشکی بودند (شکل ۳ الف). پرولین روند متفاوتی بین تیمارهای مختلف نشان داد. برعکس محتوای نسبی آب برگ، تنش سبب افزایش پرولین شد و بیشترین افزایش آن در ژنوتیپ‌های ۴۲۲۸ و ۳۷۲۹ گزارش شد در حالیکه کمترین افزایش در شرایط تنش در ژنوتیپ ۳۷۳۷ مشاهده شد (شکل ۳ ب).

فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی

فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز در تمامی ژنوتیپ‌های مورد بررسی در شرایط تنش افزایش یافت. بیشترین فعالیت این آنزیم در در ژنوتیپ ۴۲۲۸ با ۳۳ درصد افزایش نسبت

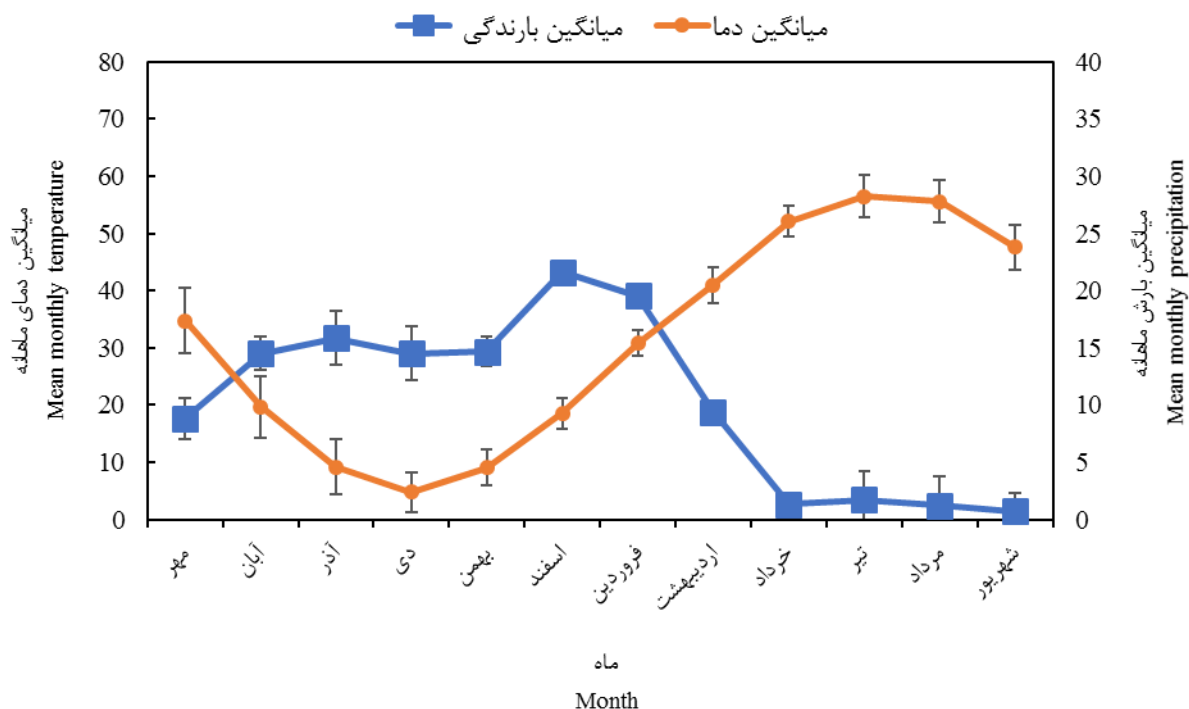
جدول ۱. عملکرد ژنوتیپ‌های گندم تحت تنش کم‌آبی اعمال شده از ابتدای ظاهر شدن سنبله‌ها تا زمان رسیدگی فیزیولوژیک.

Table 1. The yield of wheat genotypes under water deficit stress applied at the beginning of spike appearance until physiological maturity

شاخص برداشت	وزن هزاردانه	عملکرد دانه	عملکرد بیولوژیک	ژنوتیپ	آبیاری
Harvest index	Thousand grain weight	Seed yield	Biological yield	Genotype	Irrigation
44a-c	6.1a	8773.4a	19730a	4228	آبیاری نرمال
42.1a-c	5.8ab	8010.2ab	18752ab	3729	(شاهد)
40.7a-c	5.6a-c	7009.4a-e	16977a-c	3737	Normal irrigation
45.7a	5.4a-d	7421.4a-d	16276b-d	1399	(control)
				مهرگان	
39.3a-c	4.43e-h	5114.5e-h	13061d-f	Mehrgan	
				روشن	
37.9a-c	4.93b-f	5743.5d-f	15178c-e	Roshan	
				سیروان	
44.8ab	4.6d-g	7854.3a-c	17222a-c	Sirvan	
				استار	
44.6a-c	4.7c-f	5911c-e	13241d-f	Star	
39a-c	5.6a-c	6588.8b-e	16726a-c	4228	تنش کم‌آبی
36a-c	5.2b-e	5807.5c-f	15836b-e	3729	Water deficit stress
33.5bc	4.8c-f	3666gh	10865fg	3737	
39.9a-c	4.8c-f	5046.5e-h	12858ef	1399	
				مهرگان	
34.8a-c	3.7h	3324.4h	9656g	Mehrgan	
				روشن	
33.1c	4.2f-h	3819.4f-h	14535c-e	Roshan	
				سیروان	
36.9a-c	4.2f-h	5576.6d-g	14810c-e	Sirvan	
				استار	
38a-c	3.8gh	3277.3h	8606g	Star	

ستون‌ها با حروف مشترک، براساس آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد با هم اختلاف معنی‌دار ندارند.

Columns with similar letters show no significant difference according to Duncan test at 5% level.



شکل ۱- منحنی آمبروترمیک منطقه مورد مطالعه در کرج از مهر ۱۳۹۵ تا شهریور ۱۳۹۶

Figure 1. Ombrothermic diagram of the studied area in Karaj from August 2016 to September 2017

(Hasanuzzaman *et al.* 2018). تنش آبی منجر به

بحث

کاهش رشد سلول‌های ساقه و برگ و در نتیجه رشد گیاه می‌شود. در شرایط تنش جذب عناصر گیاهی با اختلال روبرو می‌شود و سبب کاهش عملکرد گیاه در فتوسنتز و در نهایت کاهش رشد گیاه می‌شود. به نظر می‌رسد که در تیمارهای که آب کافی دریافت کرده‌اند به دلیل رشد بهتر اندام‌های هوایی و تأمین سطح فتوسنتزی کارآمد، تولید ماده خشک به نحو مطلوبی صورت گرفته است. در شرایط تنش، کاهش ماده خشک می‌تواند به دلیل فشار آماس سلولی ناشی از کاهش سطح برگ گیاه باشد

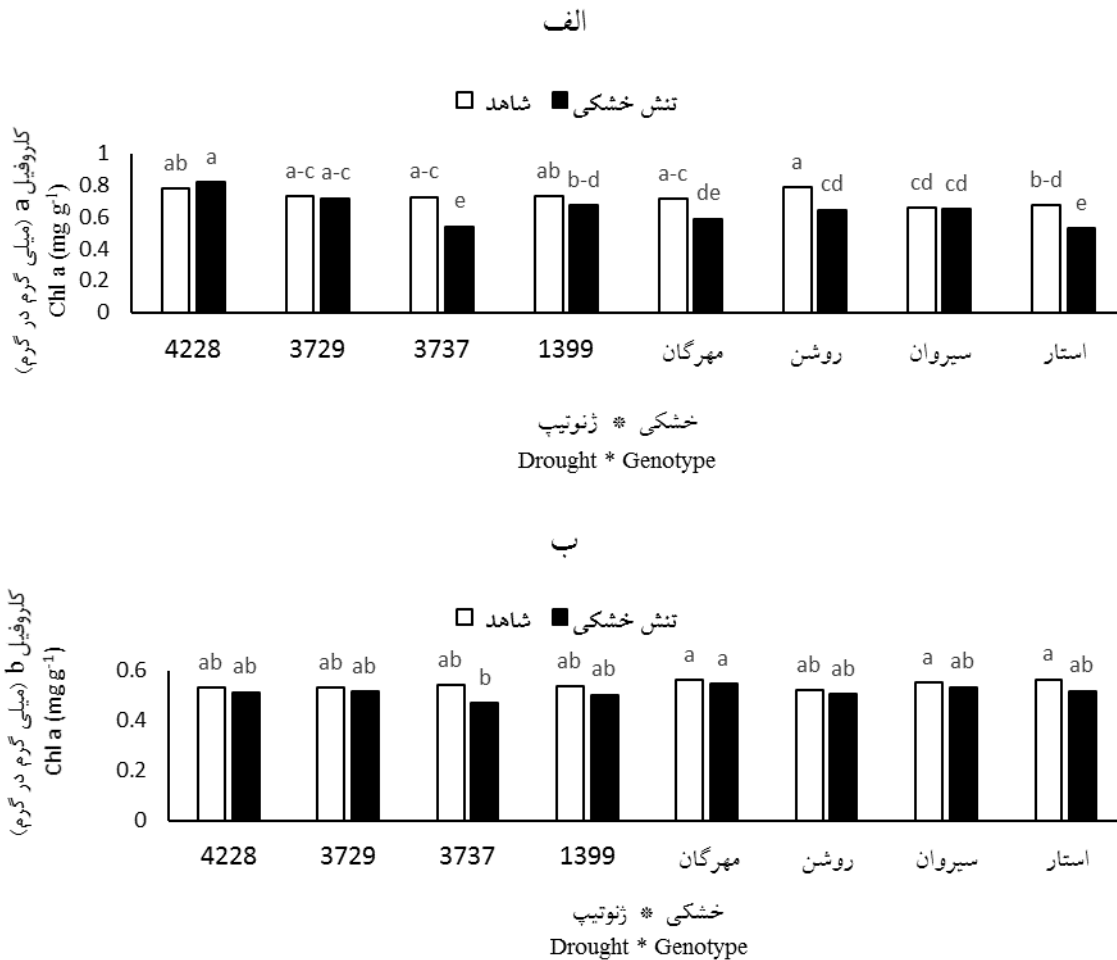
گندم از محصولات مهم و استراتژیک جهان است. بنابراین بررسی عملکرد آن در شرایط بروز تنش کم‌آبی اهمیت خاصی دارد. در این تحقیق اعمال تیمار تنش کم‌آبی سبب کاهش معنی‌دار عملکرد ژنوتیپ‌های مختلف گندم شد. اعمال تنش رطوبتی باعث القاء تنش اکسیداتیو می‌شود، زیرا عدم تعادل بین ROS و از بین بردن آن‌ها باعث آسیب دیدن ماکرومولکول‌ها و غشاءها می‌شود، بنابراین منجر به کاهش رشد گیاهان تحت تنش اسمزی می‌شود

میزان کلروفیل یک ویژگی مهم برای فهم چگونگی پاسخ گیاه به محیط رشد آن است. در واقع دوام فتوسنتز و حفظ کلروفیل برگ تحت تنش اسمزی از جمله شاخص‌های فیزیولوژیکی مقاومت به تنش است. در تحقیق حاضر کاهش میزان کلروفیل a در اکثر ژنوتیپ‌ها به‌ویژه ژنوتیپ ۳۷۳۷ مشاهده شد. ژنوتیپ‌های مقاوم دارای درصد کاهش کمتری از کلروفیل بودند که نشان از سازگاری و دوام بیشتر آنها در شرایط تنش است (Nasirzadeh *et al.*, 2021). کاهش کلروفیل در اثر افزایش ROS پیامد اجتناب‌ناپذیر واکنش گیاه به تنش خشکی هستند. در طول تنش خشکی، پاسخ اولیه گیاه بسته شدن روزنه‌ها برای محدود کردن اتلاف آب از طریق تعرق است. در نتیجه بسته شدن زود هنگام روزنه‌ها، به دلیل غلظت کم CO₂ در برگ، سرعت فتوسنتز کاهش می‌یابد (Lahbouki *et al.*, 2022). کاهش رشد گیاه در طول تنش خشکی ابتدا با کاهش سرعت رشد سطوح جذبی و به دنبال آن مهار فتوسنتز به وجود می‌آید. کاهش نرخ فتوسنتز در طول تنش خشکی را می‌توان به عوامل روزنه‌ای نسبت داد. محدودیت‌های روزنه‌ای فتوسنتز را می‌توان به- عنوان جذب ناکارآمد CO₂ در برگ‌ها و حفره‌های زیر روزنه‌ای به دلیل بسته شدن زودرس روزنه‌ها توصیف کرد. محدودیت‌های فتوسنتز غیرروزنه‌ای زمانی ایجاد می‌شوند که فعالیت آنزیم روبیسکو، فعالیت کلروپلاست، در دسترس بودن ATP، سنتز ریبولوز ۱،۵-بیس فسفات، نیتروژن برگ و اختلال در فتوسینتیم I و II کاهش یابد (Verma *et al.*,

2021). براساس نتایج دلالت و همکاران (Dalal *et al.*, 2018) تنش اسمزی باعث کاهش توده خشک شد. تنش همچنین به طور معنی‌داری سبب کاهش گل‌دهی و پرشدن دانه و در نتیجه تعداد و اندازه سنبله نیز در گندم کاهش یافت. اختلاف در میان ژنوتیپ‌ها در شرایط تنش بستگی به ژنوتیپ و سازگاری آنها با شرایط موجود دارد. نتایج تحقیق حاضر نشان داد که ژنوتیپ ۴۲۴۲ دارای بیشترین تحمل به شرایط تنش خشکی می‌باشد. در تحقیقی مشابه، بین ژنوتیپ‌های مختلف گندم در شرایط تنش اختلاف معنی‌داری وجود داشت (Nasirzadeh *et al.*, 2021).

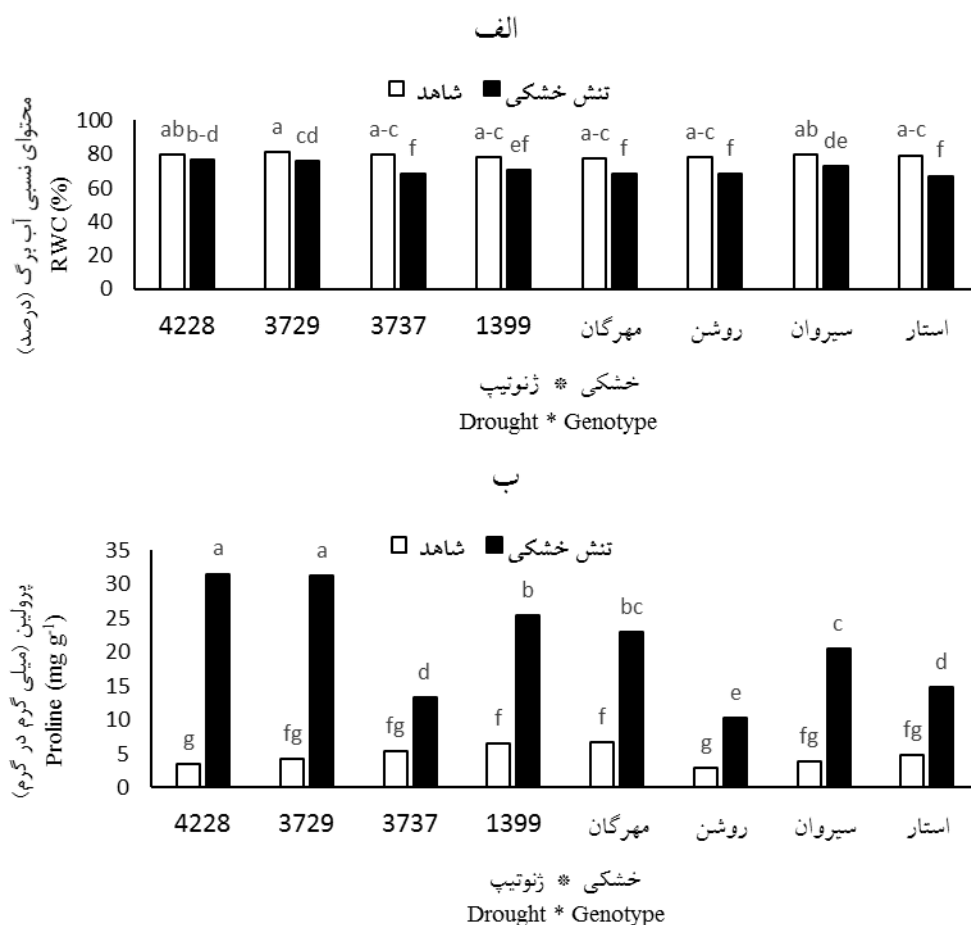
کاهش وزن هزاردانه گندم در شرایط تنش خشکی ناشی از پاسخ گیاه به زنده‌مانی و عدم تمرکز بیشتر در تولید بذرها با کیفیت می‌باشد، بنابراین به جز تعداد زیاد بذرها نارس، سایر بذرها نیز دارای وزن کمتری نسبت به شاهد بودند. مشابه تحقیق حاضر کاهش وزن هزار دانه ژنوتیپ‌های گندم تحت تنش توسط گزارش شد که همسو با تحقیق حاضر هست (Shirvani *et al.*, 2022; Ozturk *et al.*, 2022). شاخص برداشت نیز فاکتوری موثر در تعیین ژنوتیپ‌های موثر در شرایط تنش است که در تحقیق حاضر تغییرات معنی‌داری در میان ژنوتیپ‌ها نشان نداد و دلیل آن کاهش همزمان عملکرد بیولوژیک و عملکرد دانه در شرایط تنش نسبت به شاهد بود.

کاهش محتوای کلروفیل تحت تنش خشکی به عنوان یک علامت رایج از اکسیداسیون نوری رنگدانه و تخریب کلروفیل در نظر گرفته شده است (Miri et al., 2020). کاهش محتوای کلروفیل تحت تنش خشکی به عنوان یک علامت رایج از اکسیداسیون نوری رنگدانه و تخریب کلروفیل در نظر گرفته شده است (Miri et al., 2020). در تحقیقی مشابه کاهش معنی دار کلروفیل برگ با شدت متفاوت در میان ژنوتیپ‌های مختلف گندم مشاهده شد (Shah et al., 2022).



شکل ۲- محتوای کلروفیل a (الف) و کلروفیل b (ب) در ژنوتیپ‌های مختلف گندم تحت تنش کم آبی اعمال شده از ابتدای ظاهر شدن سنبله‌ها تا زمان رسیدگی فیزیولوژیک. ستون‌ها با حروف مشترک، براساس آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد با هم اختلاف معنی دار ندارند.

Figure 2. Chlorophyll (Ch) a (a) and Chl b (b) in bread wheat genotypes under water deficit stress applied at the beginning of spike appearance until physiological maturity. Columns with similar letters show no significant difference according to Duncan test at 5% level.



شکل ۳- تغییرات محتوای نسبی آب برگ (الف) و پرولین (ب) در ژنوتیپ‌های مختلف گندم تحت تنش کم‌آبی اعمال شده از ابتدای ظاهر شدن سنبله‌ها تا زمان رسیدگی فیزیولوژیک. ستون‌ها با حروف مشترک، براساس آزمون دانکن در سطح احتمالاً پنج درصد با هم اختلاف معنی‌دار ندارند.

Figure 3. Relative water content (RWC, a) and proline (b) in bread wheat genotypes under water deficit stress applied at the beginning of spike appearance until physiological maturity. Columns with similar letters show no significant difference according to Duncan test at 5% level.

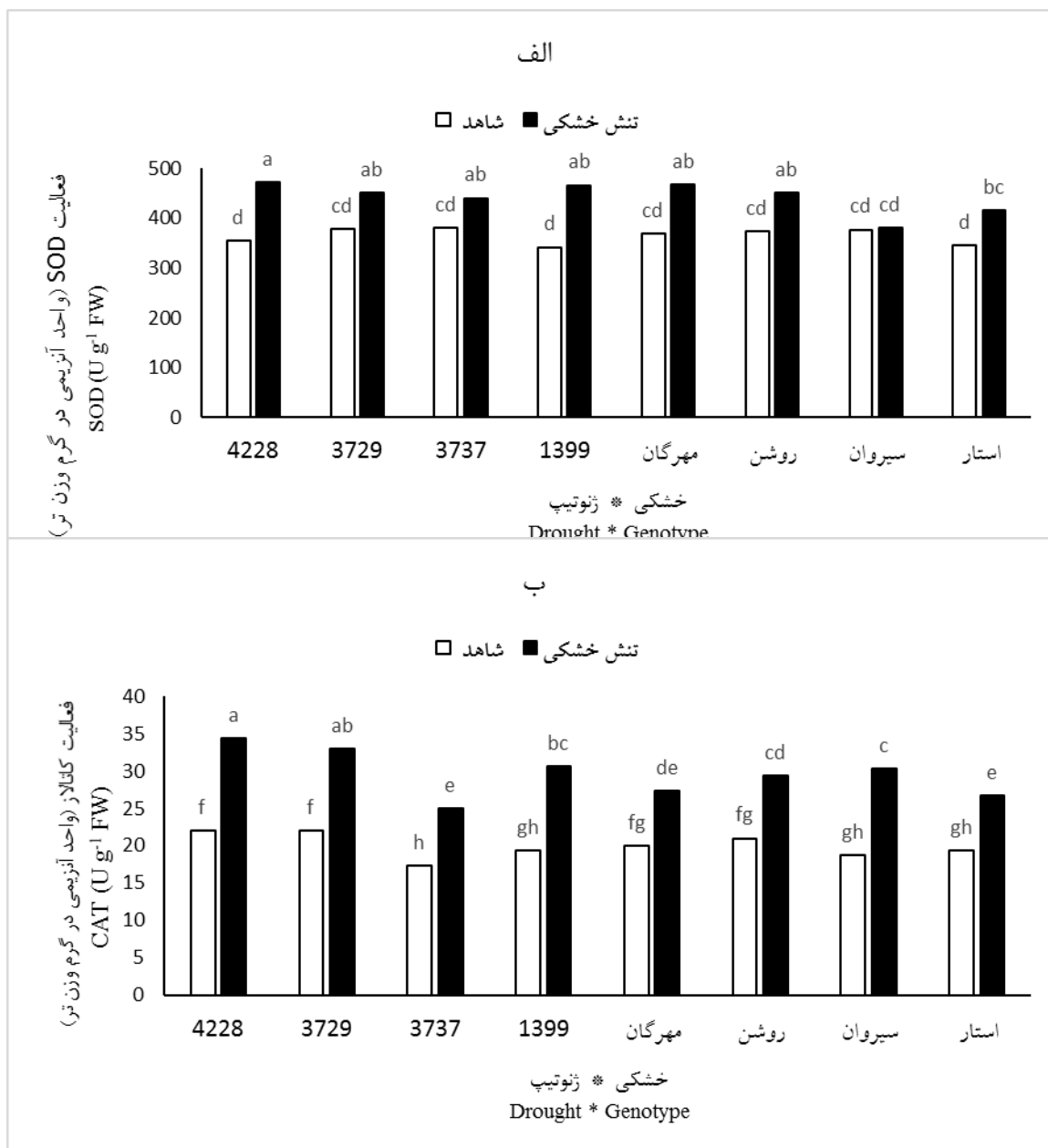
تمام فرآیندهای متابولیک سلول گیاهی نقش اساسی دارد. توانایی گیاه برای اصلاح اثرات منفی تنش و عملکرد متعاقب آن به محتوای نسبی آب بستگی دارد. کاهش سطح آب

محتوای نسبی آب برگ نشانگر وضعیت آب در گیاهان است. محتوای نسبی آب برگ رابطه بین تأمین آب به بافت برگ و میزان تعرق است (Khosropour *et al.*, 2022). آب در

همکاران (Chowdhury *et al.*, 2021) گزارش کردند که تحت تیمار تنش آبی، پارامترهای رشد محتوای نسبی آب به‌طور قابل توجهی کاهش یافت. نتایج تحقیقی دیگر نشان داد تنش خشکی باعث کاهش فتوسنتز، میزان تعرق، هدایت روزنه‌ای، محتوای نسبی آب برگ شد (Wasaya *et al.*, 2021).

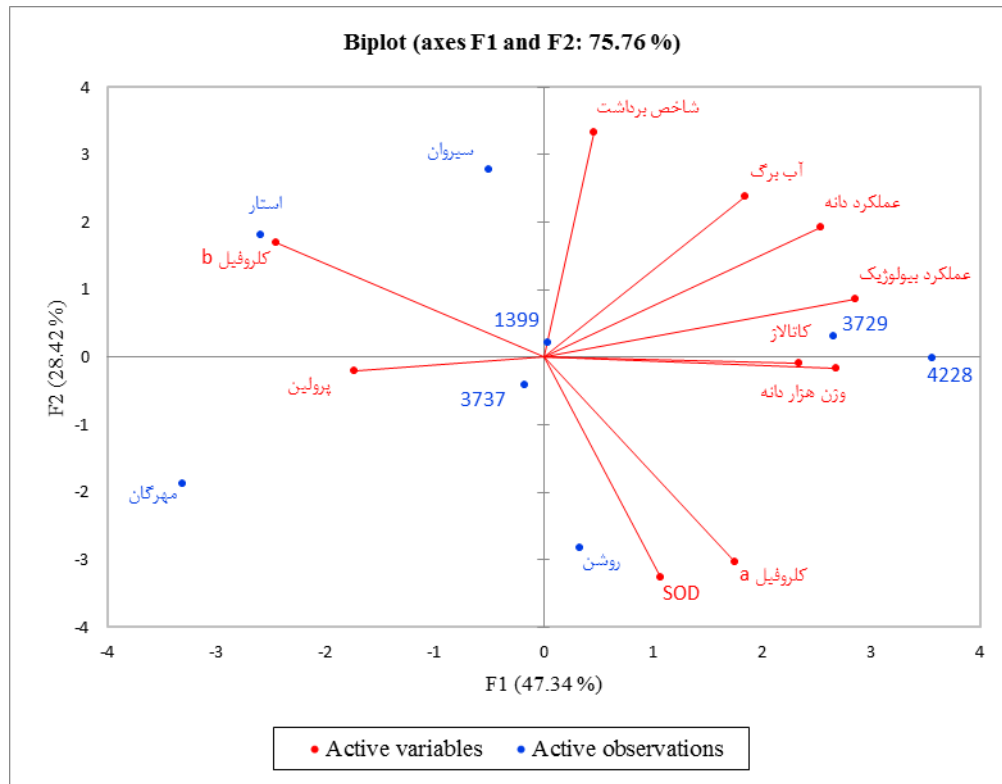
تغییر در مقدار اسید آمینه پرولین فاکتوری مناسب جهت تعیین ژنوتیپ‌های مناسب با سازگاری بالا به شرایط تنش محیطی است. هنگامی که گیاه در معرض شرایط تنش قرار می‌گیرد مجموعه‌ای از متابولیت‌های ثانویه به ویژه اسیدهای آمینه در آنها تجمع پیدا می‌کنند. اسیدهای آمینه به عنوان پیش‌ساز ترکیبات پروتئینی نقش مهمی در متابولیسم رشد و توسعه گیاهان دارند (Hayat *et al.*, 2012). پرولین به عنوان یک آمینواسید نقش مهمی در تعدیل تنش خشکی در گیاهان ایفا می‌کند. این ایفای نقش به واسطه حفظ آماس یا پتانسیل اسمزی، حفظ پایداری غشا و جلوگیری از نشت یونی، مهار ROS و نهایتاً جلوگیری از تنش اکسیداتیو در گیاهان می‌باشد (Hayat *et al.*, 2012). طبق نتایج تجزیه به مولفه‌های اصلی، پرولین به طور معنی‌داری در جهت عکس تمامی صفات رشدی گیاه واکنش نشان داد و فاکتوری مناسب برای تعیین میزان تنش در گیاه نشان داده شد.

باعث می‌شود سلول‌های گیاهی کاهش فشار تورژسانس را تجربه کنند که منجر به آسیب سلولی و پژمردگی کلی و کاهش رشد گیاهان می‌شود. محتوای نسبی بالای آب به گیاه کمک می‌کند تا ROS و تنش‌های اسمزی ناشی از خشکی را خنثی کند و به طور بالقوه به بازده بیشتر کمک کند (Gholamin & Khayatnezhad, 2020). هدایت هیدرولیکی گیاه میزان جذب آب توسط ریشه و حرکت آن از طریق ساقه است. گیاهان تحت شرایط تنش معمولاً کاهش در هدایت هیدرولیکی را تجربه می‌کنند که به نوبه خود بر محتوای نسبی آب تأثیر می‌گذارد. گیاهان با کاهش محتوای نسبی آب در اثر تنش خشکی روزنه‌ها را می‌بندد و در نتیجه هدایت روزنه‌ای را کاهش می‌دهد. تنظیم اسمزی با اجازه دادن به بزرگ شدن سلول، رشد گیاه و روزنه‌ها، تا حدی باز و با حفظ تثبیت CO₂ تحت کمبود شدید آب، تحمل به خشکی را بهبود می‌بخشد. گیاه گندم چندین املاح آلی و غیرآلی را در سیتوزول خود جمع می‌کند تا از توانایی اسمزی خود برای حفظ تورژسانس سلول کم کند. خشکی با تغییر ساختار داخلی کلروپلاست‌ها، میتوکندری‌ها و مقدار کلروفیل و مواد معدنی بر فتوسنتز تأثیر منفی می‌گذارد. کاهش مقدار محتوای آب برگ در شرایط تنش در میان ژنوتیپ‌های مختلف می‌تواند متفاوت باشد که ناشی از ژنتیک و قدرت سازگاری با شرایط تنش است. چودری و



شکل ۴- فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز (SOD، الف) و کاتالاز (ب) در ژنوتیپ‌های مختلف گندم تحت تنش کم آبی اعمال شده از ابتدای ظاهر شدن سنبله‌ها تا زمان رسیدگی فیزیولوژیک. ستون‌ها با حروف مشترک، براساس آزمون دانکن در سطح احتمالاً پنج درصد با هم اختلاف معنی‌دار ندارند.

Figure 4. Superoxide dismutase (SOD) and catalase (CAT, b) in bread wheat genotypes under water deficit stress applied at the beginning of spike appearance until physiological maturity. Columns with similar letters show no significant difference according to Duncan test at 5% level.



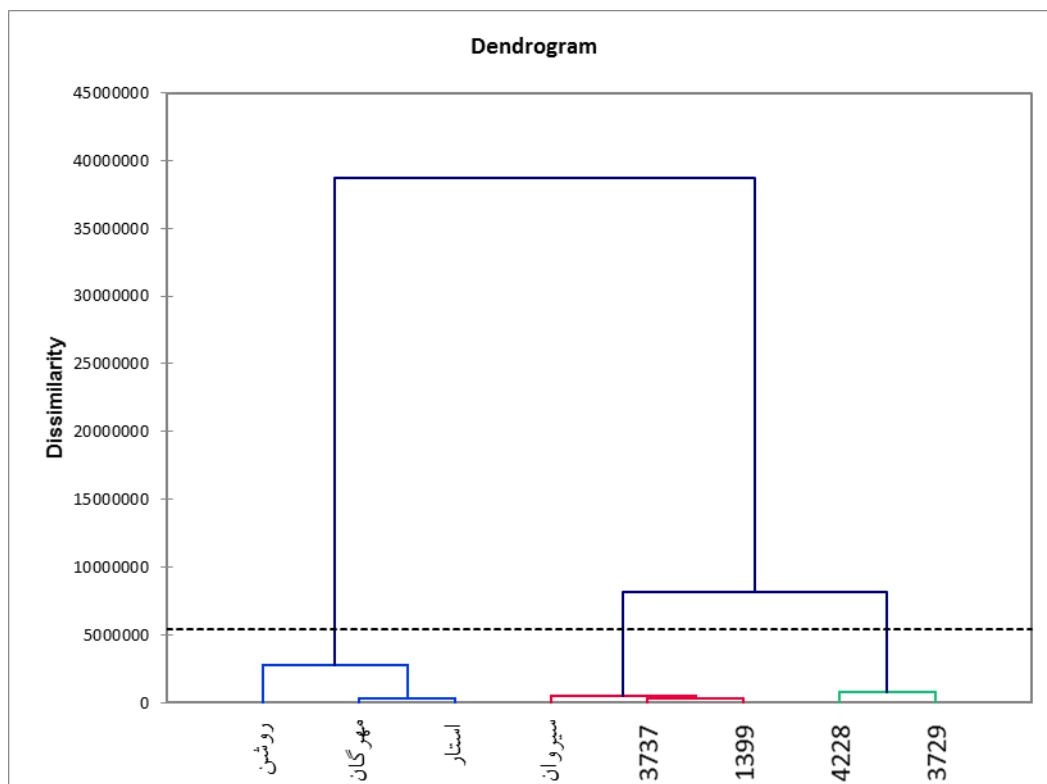
شکل ۵- تجزیه به مولفه‌های اصلی در ژنوتیپ‌های مختلف گندم در شرایط اعمال تنش کم آبی از ابتدای ظهور سنبله‌ها تا زمان رسیدگی فیزیولوژیک با استفاده از نرم‌افزار XLSTAT (نسخه 2009).

Figure 5. Principal component analysis (PCA) in bread wheat genotypes under water deficit stress applied at the beginning of spike appearance until physiological maturity using XLSTAT software (version 2009).

(*al.*, 2022). در تحقیق حاضر ژنوتیپ ۴۲۲۸ در شرایط تنش بیشترین فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی را داشت که همین امر سبب مقاومت بیشتر گیاه در برابر تنش و در نهایت سبب افزایش بیشترین عملکرد در این ژنوتیپ شد. در مقابل ژنوتیپ ۳۷۳۷ قدرت کمتری نسبت به افزایش فعالیت آنزیم کاتالاز و سوپراکسید دیسموتاز داشت که سبب کاهش عملکرد گیاه نیز شد. در تحقیقی مشابه افزایش معنی‌دار

در شرایط تنش، تولید ROS در گیاهان افزایش می‌یابد و آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان به عنوان یک خط دفاعی سریع برای مقابله با مقادیر اضافی ROS واکنش نشان می‌دهند (*Altaf et al.*, 2022). آنزیم سوپراکسید دیسموتاز به عنوان اولین خط دفاعی گیاه نقش مهمی در تبدیل O_2^- به H_2O_2 دارد و کاتالاز با تجزیه H_2O_2 به آب و اکسیژن نقش مهمی در تجزیه رادیکال‌های آزاد دارد (*Rahman et*

آنزیم‌های کاتالاز و سوپراکسید دیسموتاز در شرایط تنش خشکی روی لوبیا چشم بلبلی (Zadegan *et al.*, 2023) و گندم زمستانه (Ru *et al.*, 2023) گزارش شد.



شکل ۶- نتایج خوشه‌بندی سلسله مراتبی در ژنوتیپ‌های مختلف گندم در شرایط اعمال تنش کم‌آبی از ابتدای ظهور سنبله‌ها تا زمان رسیدگی فیزیولوژیک با استفاده از نرم‌افزار XLSTAT (نسخه 2009).

Figure 6. Agglomerative hierarchical clustering (AHC) in bread wheat genotypes under water deficit stress applied at the beginning of spike appearance until physiological maturity using XLSTAT software (version 2009).

محتوای نسبی آب برگ و برعکس سبب افزایش محتوی پرولین و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در برگ‌ها شد. بیشترین کاهش عملکرد در ژنوتیپ ۳۷۳۷ و کمترین مقدار آن در ژنوتیپ ۴۲۲۸ مشاهده گزارش شد. در شرایط تنش بیشترین فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در ژنوتیپ ۴۲۲۸

نتیجه‌گیری

نتایج تحقیق نشان داد که اختلاف معنی‌داری بین ژنوتیپ‌های مختلف گندم به ویژه در شرایط تنش کم‌آبی مشاهده شد. تنش کم‌آبی سبب کاهش معنی‌دار عملکرد دانه و

و کمترین مقدار آن در ژنوتیپ ۳۷۳۷ نسبت به شاهد مشاهده شد که همین امر می‌تواند عامل اختلاف عملکرد این ژنوتیپ‌ها به عنوان ژنوتیپ برتر و ضعیف‌تر باشد. نتایج تجزیه به مولفه‌های اصلی نشان داد که پاسخ ژنوتیپ‌های ۴۲۲۸ و ۳۷۲۹ دارای رابطه منفی با مهرگان و استار بودند. با توجه به نتایج بیوشیمیای تحقیق حاضر، ژنوتیپ‌هایی که قدرت افزایش فعالیت آنتی‌اکسیدانی بیشتری در شرایط تنش داشتند به مراتب دارای عملکرد دانه بیشتری بودند. نتایج خوشه‌بندی سلسله مراتبی بیانگر این بود که ژنوتیپ‌های ۳۷۲۹ و ۴۲۲۸ می‌توانند دارای عملکرد بهتری در شرایط آب و هوایی کرج باشند که برای تایید چنین ادعایی نیاز است که انجام تحقیقی مشابه در چندین منطقه دیگر با شرایط اقلیمی مشابه انجام گیرد.

References

- Alipour, A., Mosavi, S. H., Khalilian, S., & Mortazavi, A. 2018. Wheat self-sufficiency and population growth in Iran's 1404 perspective (investigating the role of the guaranteed purchase policy). *Iranian Journal of Agricultural Economics and Development Research*, 49, 635-649. doi: 685782018.254163.6ijaedr./10.22059
- Aebi, H. 1984. Catalase in vitro. In *Methods in enzymology* (Vol. 105, pp. 121-126). Academic press. [https://doi.org/10.1016/S0076-6879\(84\)05016-3](https://doi.org/10.1016/S0076-6879(84)05016-3)
- Altaf, M. A., Shahid, R., Ren, M. X., Naz, S., Altaf, M. M., Khan, L. U., ... & Ahmad, P. (2022). Melatonin improves drought stress tolerance of tomato by modulating plant growth, root architecture, photosynthesis, and antioxidant defense system. *Antioxidants*, 11, 309. <https://doi.org/10.3390/antiox11020309>
- Arnon, D. I. 1949. Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. *Plant physiology*, 24, 1-7. doi: [10.1104/pp.24.1.1](https://doi.org/10.1104/pp.24.1.1)
- Bates, L. S., Waldren, R. P., & Teare, I. D. 1973. Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and soil*, 39, 205-207. <https://doi.org/10.1007/BF00018060>
- Behboudi, F., Tahmasebi-Sarvestani, Z., Kassaei, M. Z., Modarres-Sanavy, S. A. M., Sorooshzadeh, A., & Mokhtassi-Bidgoli, A. (2019). Evaluation of chitosan nanoparticles effects with two application methods on wheat under drought stress. *Journal of Plant Nutrition*, 42, 1439-1451. <https://doi.org/10.1080/01904167.2019.1617308>
- Chowdhury, M. K., Hasan, M. A., Bahadur, M. M., Islam, M. R., Hakim, M. A., Iqbal, M. A., & Islam, M. S. 2021. Evaluation of drought tolerance of some wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes through phenology, growth, and physiological indices. *Agronomy*, 11, 1792. <https://doi.org/10.3390/agronomy11091792>
- Dalal, M., Sahu, S., Tiwari, S., Rao, A. R., & Gaikwad, K. 2018. Transcriptome analysis reveals interplay between hormones, ROS metabolism and cell wall biosynthesis for drought-induced root growth in wheat. *Plant Physiology and Biochemistry*, 130, 482-492. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2018.07.035>
- Du, L., Huang, X., Ding, L., Wang, Z., Tang, D., Chen, B., ... & Mao, H. (2023). TaERF87 and TaAKS1 synergistically regulate TaP5CS1/TaP5CR1-mediated proline biosynthesis to enhance drought tolerance in wheat. *New Phytologist*, 237, 232-250. <https://doi.org/10.1111/nph.18549>
- Ghahremaninejad, F., Hoseini, E., & Jalali, S. 2021. The cultivation and domestication of wheat and barley in Iran, brief review of a long history. *The Botanical Review*, 87, 1-22. <https://doi.org/10.1007/s12229-020-09244-w>
- Gholamin, R., & Khayatnezhad, M. 2020. Study of bread wheat genotype physiological and biochemical responses to drought stress. *Helix-The Scientific Explorer| Peer Reviewed Bimonthly International Journal*, 10, 87-92. <https://www.helixscientific.pub/index.php/home/article/view/221>

- Giannopolitis, C. N., & Ries, S. K. 1977. Superoxide dismutases: II. Purification and quantitative relationship with water-soluble protein in seedlings. *Plant physiology*, 59(2), 315-318. <https://doi.org/10.1104/pp.59.2.309>
- Grzesiak, S., Hordyńska, N., Szczyrek, P., Grzesiak, M. T., Noga, A., & Szechyńska-Hebda, M. 2019. Variation among wheat (*Triticum easativum* L.) genotypes in response to the drought stress: I–selection approaches. *Journal of Plant Interactions*, 14, 30-44. <https://doi.org/10.1080/17429145.2018.1550817>
- Hasanuzzaman, M., Mahmud, J. A., Anee, T. I., Nahar, K., & Islam, M. T. 2018. Drought stress tolerance in wheat: omics approaches in understanding and enhancing antioxidant defense. Abiotic stress-mediated sensing and signaling in plants: an omics perspective, 267-307. https://doi.org/10.1007/978-981-10-7479-0_10
- Hayat, S., Hayat, Q., Alyemeni, M. N., Wani, A. S., Pichtel, J., & Ahmad, A. 2012. Role of proline under changing environments: a review. *Plant signaling and behavior*, 7, 1456-1466. <https://doi.org/10.4161/psb.21949>
- Khosropour, E., Weisany, W., Tahir, N. A. R., & Hakimi, L. (2022). Vermicompost and biochar can alleviate cadmium stress through minimizing its uptake and optimizing biochemical properties in *Berberis integerrima bunge*. *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 17476-17486. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17073-6>
- Lahbouki, S., Ech-chatir, L., Er-Raki, S., Outzourhit, A., & Meddich, A. 2022. Improving drought tolerance of *Opuntia ficus-indica* under field using Subsurface Water Retention Technology: Changes in physiological and biochemical parameters. *Canadian Journal of Soil Science*, (ja). 12, 234-243. DOI: [10.1139/cjss-2022-0022](https://doi.org/10.1139/cjss-2022-0022)
- Martínez, J. P., Lutts, S., Schanck, A., Bajji, M., & Kinet, J. M. (2004). Is osmotic adjustment required for water stress resistance in the Mediterranean shrub *Atriplex halimus* L?. *Journal of plant physiology*, 161, 1041-1051. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2003.12.009>
- Miri, M., Ghooshchi, F., Tohidi-Moghadam, H. R., Larijani, H. R., & Kasraie, P. 2021. Ameliorative effects of foliar spray of glycine betaine and gibberellic acid on cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp.) yield affected by drought stress. *Arabian Journal of Geosciences*, 14, 1-9. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-07228-7>
- Mkhabela, S. S., Shimelis, H., Odindo, A. O., & Mashilo, J. 2019. Response of selected drought tolerant wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes for agronomic traits and biochemical markers under drought-stressed and non-stressed conditions. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B—Soil & Plant Science*, 69, 674-689. <https://doi.org/10.1080/09064710.2019.1641213>
- Muhammad, F., Raza, M. A. S., Iqbal, R., Zulfiqar, F., Aslam, M. U., Yong, J. W. H., ... & Ibrahim, M. A. (2022). Ameliorating drought effects in wheat using an exclusive or co-applied rhizobacteria and zno nanoparticles. *Biology*, 11, 1564. <https://doi.org/10.3390/biology11111564>
- Nasiroleslami, E., Mozafari, H., Sadeghi-Shoae, M., Habibi, D., & Sani, B. 2021. Changes in yield, protein, minerals, and fatty acid profile of wheat (*Triticum aestivum* L.) under fertilizer management involving application of nitrogen, humic acid, and seaweed extract. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2, 2642-2651. <https://doi.org/10.1007/s42729-021-00552-7>
- Nasirzadeh, L., Sorkhilaleloo, B., Majidi Hervan, E., & Fatehi, F. 2021. Changes in antioxidant enzyme activities and gene expression profiles under drought stress in tolerant, intermediate, and susceptible wheat genotypes. *Cereal Research Communications*, 49, 83-89. <https://doi.org/10.1007/s42976-020-00085-2>
- Ozturk, A., Erdem, E., Aydın, M., & Karaoglu, M. M. (2022). The effects of drought after anthesis on the grain quality of bread wheat depend on drought severity and drought resistance of the variety. *Cereal Research Communications*, 50, 105-116. <https://doi.org/10.1007/s42976-021-00155-z>
- Pandey, A., Harohalli Masthigowda, M., Kumar, R., Pandey, G. C., Awaji, S. M., Singh, G., & Pratap Singh, G. (2023). Physio-biochemical characterization of wheat genotypes under temperature stress. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 29, 131-143. <https://doi.org/10.1007/s12298-022-01267-4>
- Pastuszak, J., Dziurka, M., Hornyák, M., Szczerba, A., Kopeć, P., & Płażek, A. (2022). Physiological and biochemical parameters of salinity resistance of three durum wheat genotypes. *International Journal of Molecular Sciences*, 23, 8397. <https://doi.org/10.3390/ijms23158397>

- Paul, G. K., Mahmud, S., Dutta, A. K., Sarkar, S., Laboni, A. A., Hossain, M. S., ... & Saleh, M. A. (2022). Volatile compounds of *Bacillus pseudomycoloides* induce growth and drought tolerance in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Scientific Reports*, 12, 19137. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-22354-2>
- Rahman, M. A., Woo, J. H., Song, Y., Lee, S. H., Hasan, M. M., Azad, M. A. K., & Lee, K. W. (2022). Heat shock proteins and antioxidant genes involved in heat combined with drought stress responses in perennial rye grass. *Life*, 12, 1426. doi.org/10.3390/life12091426
- Ru, C., Wang, K., Hu, X., Chen, D., Wang, W., & Yang, H. (2023). Nitrogen modulates the effects of heat, drought, and combined stresses on photosynthesis, antioxidant capacity, cell osmoregulation, and grain yield in winter wheat. *Journal of Plant Growth Regulation*, 42, 1681-1703. <https://doi.org/10.1007/s00344-022-10650-0>
- Shah, S. M. D. M., Shabbir, G., Malik, S. I., Raja, N. I., Shah, Z. H., Rauf, M., & Yang, S. H. 2022. Delineation of Physiological, Agronomic and Genetic Responses of Different Wheat Genotypes under Drought Condition. *Agronomy*, 12, 1056. <https://doi.org/10.3390/agronomy12051056>
- Shirvani, F., Mohammadi, R., Daneshvar, M., & Ismaili, A. 2022. Genetic variability, response to selection for agro-physiological traits, and traits-enhanced drought tolerance in durum wheat. *Acta Ecologica Sinica*. <https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2022.10.009>
- Soltani, A., Alimaghani, S. M., Nehbandani, A., Torabi, B., Zeinali, E., Zand, E., & Van Ittersum, M. K. (2020). Future food self-sufficiency in Iran: A model-based analysis. *Global Food Security*, 24, 100351. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2020.100351>
- Verma, K. K., Song, X. P., Zeng, Y., Li, D. M., Guo, D. J., Rajput, V. D., & Li, Y. R. 2020. Characteristics of leaf stomata and their relationship with photosynthesis in *Saccharum officinarum* under drought and silicon application. *ACS omega*, 5, 24145-24153. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c03820>
- Wasaya, A., Manzoor, S., Yasir, T. A., Sarwar, N., Mubeen, K., Ismail, I. A., & EL Sabagh, A. 2021. Evaluation of fourteen bread wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes by observing gas exchange parameters, relative water and chlorophyll content, and yield attributes under drought stress. *Sustainability*, 13, 4799. <https://doi.org/10.3390/su13094799>
- Zadegan, K., Monem, R., & Pazoki, A. 2023. Silicon Dioxide Nanoparticles Improved Yield, Biochemical Attributes, and Fatty Acid Profile of Cowpea (*Vigna unguiculata* [L.] Walp) Under Different Irrigation Regimes. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 1-12. <https://doi.org/10.1007/s42729-023-01297-1>