



University of Guilan
Faculty of Agricultural Sciences

Cereal Research

Vol. 15, No. 1, Spring 2025 (29-47)

doi: 10.22124/CR.2025.28915.1843

pISSN: 2252-0163 eISSN: 2538-6115



RESEARCH PAPER

OPEN ACCESS

Physiological changes of selected wheat genotypes (*Triticum aestivum* L.) based on yield under rainfed conditions and supplementary irrigation

Vahid Sedghieh^{1*}, Fariborz Shekari², Amin Abbasi³, Mozaffar Roustaei⁴ and Naser Sabbaghnia⁵

1. Ph. D. Graduate, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, Maragheh University, Maragheh, Iran (* Corresponding author: vs154@yahoo.com)
2. Professor, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, Maragheh University, Maragheh, Iran
3. Associate Professor, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, Maragheh University, Maragheh, Iran
4. Research Professor, Dryland Agricultural Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Maragheh, Iran
5. Professor, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, Maragheh University, Maragheh, Iran

Comprehensive abstract

Introduction

Today, wheat production as the most important crop in the world has been affected by increasing climate changes. In this regard, it is very important to investigate the physiological and agronomical responses of tolerant and sensitive wheat genotypes to drought stress under variable rainfed conditions, along with identifying the relationships between the characteristics of resistance and sensitivity to this stress. For this purpose, the present study was conducted to investigate the effect of rainfed and supplementary irrigation conditions on physiological, biochemical and grain yield-related traits in bread wheat.

Materials and methods

The plant materials of this study were four bread wheat genotypes, including two resistant (with suitable and high grain yield under rainfed conditions) and two sensitive genotypes with poor grain yield under rainfed conditions. The genotypes were evaluated under rainfed (drought stress) and supplementary irrigation conditions in a split plots design based on randomized complete block design with three replications in the Dryland Agricultural Research Institute, Maragheh, Iran, in 2021-2022 cropping year. Supplementary irrigation was applied after planting and at the booting stage. To identify differences among genotypes, antioxidant enzymes activities, oxidative damage, biochemical characteristics, and grain yield and yield components were measured. All statistical analyses were performed using SAS software and comparison of means were done using LSD test at the probability level of 5%.

Research findings

The results of this study showed that the degree of sensitivity and tolerance of the studied genotypes in response to drought stress was significantly different. In general, the activity level of antioxidant enzymes in rainfed conditions was higher than the supplementary irrigation. The highest enzymatic activity and the lowest levels of hydrogen peroxide and malondialdehyde were observed in genotype number 4 under rainfed conditions, while the lowest enzymatic activity and the highest levels of hydrogen peroxide and malondialdehyde were recorded in genotype number 40 under supplementary irrigation conditions. Moreover, the highest proline content was observed in genotype



number 4 under rainfed conditions and the lowest proline content was observed in genotypes 30 and 40 under supplementary irrigation conditions. The yield and yield components of the studied genotypes also revealed a similar trend as a result of the internal changes of the plant, such that the highest number of spikes per unit area and number of grains per spike were observed in genotypes 4 and 33 under supplementary irrigation, while genotypes 30 and 40 had the lowest values of these traits under rainfed conditions. The 1000-kernel weight of these genotypes had a similar trend, although with a lower slope. Investigating the changes in chlorophyll content and enzymatic activities in these genotypes can justify this trend.

Conclusion

The findings of this study showed that although all studied genotypes were affected by the treatments, drought-tolerant genotypes showed better performance under stress conditions compared to sensitive genotypes by increasing proline concentration, maintaining chlorophyll capacity, and intensifying antioxidant enzyme activity, and consequently had less yield reduction under stress conditions. Preventing the increase of hydrogen peroxide and malondialdehyde in these genotypes can confirm and complement this result and help to achieve higher yield in variable rainfed conditions. In addition, among the yield components, the number of grains per spike followed by spikes per unit area had the highest direct effect on grain yield. This could justify the need to focus more on these components in field examinations in order to obtain appropriate yield easier and faster.

Keywords: Ascorbate peroxidase, Chlorophyll content, Drought stress, Hydrogen peroxide, Proline

Received: November 11, 2024

Accepted: February 11, 2025

Cite this article:

Sedghieh, V., Shekari, F., Abbasi, A., Roustaei, M., & Sabbaghnia, N. (2024). Physiological changes of selected wheat genotypes (*Triticum aestivum* L.) based on yield under rainfed conditions and supplementary irrigation. *Cereal Research*, 15(1), 29-47. doi: [10.22124/CR.2025.28915.1843](https://doi.org/10.22124/CR.2025.28915.1843).



تغییرات فیزیولوژیک ژنوتیپ‌های برگزیده گندم (*Triticum aestivum* L.) بر اساس عملکرد تحت شرایط دیم و آبیاری تکمیلی

وحید صدقیه^{۱*}، فریبرز شکاری^۲، امین عباسی^۳، مظفر روستایی^۴ و ناصر صباغ‌نیا^۵

۱- دانش‌آموخته دکتری، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه مراغه، ایران (* نویسنده مسئول):

vs154@yahoo.com

۲- استاد، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران

۳- دانشیار، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران

۴- استاد پژوهش، موسسه تحقیقات کشاورزی دیم کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مراغه، ایران

۵- استاد، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران

چکیده جامع

مقدمه: امروز تولید گندم به‌عنوان مهم‌ترین گیاه زراعی جهان، تحت تاثیر تغییرات فزاینده اقلیمی قرار گرفته است. در همین راستا، بررسی پاسخ‌های فیزیولوژیک و زراعی ژنوتیپ‌های مقاوم و حساس گندم به تنش خشکی در شرایط متغیر دیم همراه با شناسایی ارتباطات موجود میان ویژگی‌های مربوط به مقاومت و حساسیت به شرایط نامساعد محیطی، دارای اهمیت بسزایی است. به‌همین منظور، پژوهش حاضر با هدف بررسی اثر شرایط دیم و آبیاری تکمیلی بر ویژگی‌های فیزیولوژیک، بیوشیمیایی و صفات مرتبط با عملکرد دانه در گندم نان اجرا شد.

مواد و روش‌ها: مواد گیاهی این تحقیق، تعداد چهار ژنوتیپ گندم نان شامل دو ژنوتیپ متحمل (با عملکرد مناسب در شرایط دیم) و دو ژنوتیپ حساس (با عملکرد ضعیف در شرایط دیم) بودند که در دو شرایط دیم (تنش خشکی) و آبیاری تکمیلی در قالب طرح کرت‌های خرد شده بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در موسسه تحقیقات دیم کشور در مراغه در سال زراعی ۱۳۹۹-۱۴۰۰ مورد مطالعه قرار گرفتند. آبیاری تکمیلی پس از کاشت و در مرحله آبستنی انجام شد. به‌منظور شناسایی تفاوت‌های موجود در بین ژنوتیپ‌ها، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان، آسیب‌های اکسیداتیو، ویژگی‌های بیوشیمیایی و عملکرد و اجزای عملکرد دانه مورد اندازه‌گیری قرار گرفتند. تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها و مقایسه میانگین‌ها با آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد با نرم‌افزار SAS انجام شد.

یافته‌های تحقیق: نتایج این مطالعه نشان داد که تفاوت‌های معنی‌داری بین ژنوتیپ‌های مورد بررسی از نظر درجه حساسیت و تحمل آن‌ها در پاسخ به تنش خشکی وجود داشت. در مجموع، میزان فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان در شرایط دیم بیش‌تر از شرایط آبیاری تکمیلی بود. ژنوتیپ شماره ۴ در شرایط دیم، بیش‌ترین فعالیت آنزیمی و کم‌ترین میزان پراکسید هیدروژن و مالون دی‌آلدید و ژنوتیپ شماره ۴۰ در شرایط آبیاری تکمیلی، کم‌ترین فعالیت آنزیمی و بالاترین میزان پراکسید هیدروژن و مالون دی‌آلدید را نشان داد. در مورد پرولین نیز بالاترین میزان پرولین در ژنوتیپ شماره ۴ در شرایط دیم و کم‌ترین میزان

پرولین در ژنوتیپ‌های شماره ۳۰ و ۴۰ در شرایط آبیاری تکمیلی مشاهده شد. عملکرد و اجزای عملکرد ژنوتیپ‌های بررسی شده نیز به‌عنوان برآیندی از تغییرات درونی گیاه، روند مشابهی را آشکار ساختند، به‌طوری که بیش‌ترین شمار سنبله در واحد سطح و شمار دانه در هر سنبله در ژنوتیپ‌های شماره ۴ و ۳۳ تحت شرایط آبیاری تکمیلی مشاهده شد، در حالی که ژنوتیپ‌های شماره ۳۰ و ۴۰ در شرایط دیم دارای کم‌ترین مقدار این صفات بودند. وزن هزار دانه این ژنوتیپ‌ها نیز هر چند با شبیهی کم‌تر، از روند یکسانی برخوردار بود. بررسی تغییرات مقادیر کلروفیل و همچنین فعالیت‌های آنزیمی در این ژنوتیپ‌ها می‌تواند توجیه‌کننده روند مزبور باشد.

نتیجه‌گیری: یافته‌های این پژوهش نشان داد که اگرچه همه ژنوتیپ‌های مورد بررسی تحت تاثیر تیمارها قرار گرفتند، اما ژنوتیپ‌های متحمل به تنش خشکی با افزایش غلظت پرولین، حفظ ظرفیت کلروفیل و تشدید فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان کارکرد بهتری در شرایط تنش در مقایسه با ژنوتیپ‌های حساس نشان دادند و به این ترتیب، از کاهش عملکرد کم‌تری در این شرایط برخوردار بودند. جلوگیری از افزایش پراکسید هیدروژن و مالون دی‌آلدید در این ژنوتیپ‌ها می‌تواند موید و مکمل این نتیجه باشد و به برخورداری از عملکرد بالاتر در شرایط متغیر دیم کمک کند. علاوه بر این، از میان اجزای عملکرد، شمار دانه در سنبله و سپس تعداد سنبله در واحد سطح، بیش‌ترین اثر مستقیم را بر عملکرد دانه داشتند. این مسأله می‌تواند نیاز به تمرکز بیش‌تر بر این اجزا را در آزمایش‌های مزرعه‌ای در راستای دستیابی آسان‌تر و سریع‌تر به عملکرد مناسب توجیه کند.

واژه‌های کلیدی: آسکوربات پراکسیداز، پراکسید هیدروژن، پرولین، تنش خشکی، محتوای کلروفیل

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۲۳

نحوه استناد به این مقاله:

صدقیه، وحید، شکاری، فربرز، عباسی، امین، روستایی، مظفر، و صباغ‌نیا، ناصر. (۱۴۰۳). تغییرات فیزیولوژیک ژنوتیپ‌های برگزیده گندم (*Triticum aestivum* L.) بر اساس عملکرد در شرایط دیم و آبیاری تکمیلی. *تحقیقات غلات*، ۱۵(۱)، ۲۹-۴۷.
doi: [10.22124/CR.2025.28915.1843](https://doi.org/10.22124/CR.2025.28915.1843)

مقدمه

گندم نان (*Triticum aestivum* L.) مهم‌ترین محصول زراعی و تأثیرگذار در حفظ امنیت غذایی مردم جهان است (Zhan *et al.*, 2017). در حال حاضر، ۱۹ درصد از کل کالری مورد نیاز انسان از گندم فراهم می‌شود و پیش‌بینی شده است که تا سال ۲۰۵۰ این نیاز تا ۷۰ درصد نیز افزایش یابد (Erenstein *et al.*, 2022). این در حالی است که برآوردها نشان می‌دهند که تولید جهانی گندم به دلیل تغییرات آب هوایی تا میانه‌های سده کنونی به میزان ۱/۹ درصد کاهش یابد (Pequeno, 2021). چشم‌اندازهای فوق، لزوم توجه بیش‌تر به ویژگی‌های ژنوتیپ‌های مقاوم به خشکی گندم به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان را ضرورت می‌بخشد (Rahimi *et al.*, 2019).

ایران به‌عنوان سرزمینی که در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان قرار گرفته است، با متوسط بارندگی سالانه حدود ۲۵۰ میلی‌متر، دارای میانگینی کم‌تر از یک‌سوم بارندگی سالانه جهانی می‌باشد و این مقدار طی ۲۰ سال گذشته حدود ۱۴ درصد نیز کاهش یافته است (Nazeri Tahroudi *et al.*, 2016). خشکی جزو مهم‌ترین تنش‌های غیرزیستی است که با متاثر کردن وضعیت رطوبتی خاک و ناحیه ریشه‌دوانی، به‌شکل گسترده‌ای بر تولید محصولات زراعی تأثیر می‌گذارد و در همین حال، سطوح گونه‌های اکسیژن فعال (ROS) گیاه را افزایش می‌دهد که این امر موجب وارد آمدن آسیب‌های اکسیداتیو و پراکسیداسیون غشا می‌شود و تأثیر نامطلوبی بر فعالیت آنزیم‌ها و اسیدهای نوکلئیک خواهد گذاشت (Outoukarte *et al.*, 2019). در این میان، پراکسید هیدروژن (H_2O_2) با دارا بودن طولانی‌ترین نیمه‌عمر در بین گونه‌های اکسیژن فعال، اثرات مخربی بر فرایندهای حیاتی گیاه دارد و به‌دلیل تولید رادیکال‌های هیدروکسیل، موجب افزایش تأثیر تنش‌های اکسیداتیو می‌شود (Andrés *et al.*, 2022). از محصولات پراکسیداسیون لپیدی در شرایط نامساعد به‌عنوان نشانگر برای ارزیابی شدت پراکسیداسیون استفاده می‌شود که در بین آن‌ها مالون دی‌آلدئید (MDA) گسترده‌ترین ترکیب بررسی شده در یاخته‌های گیاهی است (Rawat *et al.*, 2021). این در حالی است که یکی از ویژگی‌های اساسی رقم‌های گندم متحمل به خشکی، توان کاهش پراکسیداسیون لپیدی از راه کاهش سطح مالون دی‌آلدئید و حفظ

یکپارچگی غشاها است (Upadhyay *et al.*, 2020). در میان آنتی‌اکسیدان‌های آنزیمی گوناگون، کاتالاز (CAT)، آسکوربات پراکسیداز (APX) و گایاکول پراکسیداز (GPOD) آنزیم‌هایی هستند که با سازوکارهای متفاوت در تنظیم سطوح درون‌یاخته‌ای H_2O_2 ایفای نقش می‌کنند (Hernández *et al.*, 2012). همچنین، کاهش توان تولید گیاهان زراعی که در برابر تنش خشکی قرار می‌گیرند، می‌تواند ناشی از کاهش میزان فتوسنتز آن‌ها باشد (Zafari *et al.*, 2020). کلروفیل از مهم‌ترین اجزای فتوسنتزی کلروپلاست است و مقدار نسبی آن، رابطه مثبتی با نرخ فتوسنتز دارد (Toscano *et al.*, 2016). کاهش سبزی‌نگی برگ‌ها تحت تنش خشکی، می‌تواند به‌علت جلوگیری از بیوسنتز کلروفیل، افزایش تخریب آن و یا بروز تنش‌های اکسیداتیو به‌وجود آید (haffari *et al.*, 2019). افزون بر این، گیاهان در شرایط تنش خشکی، ترکیبات آلی محلول همانند پرولین را به‌عنوان یک تنظیم‌کننده اسمزی انباشته می‌کنند که می‌تواند راه‌کاری مناسب برای رویارویی با اثرات سوء چنین تنش‌هایی از راه محافظت از ماکرومولکول‌ها، تنظیم اسمزی، حذف گونه‌های فعال اکسیژن و همچنین، جلوگیری از آسیب به فتوسیستم‌های گیاه باشد (Parveen *et al.*, 2021).

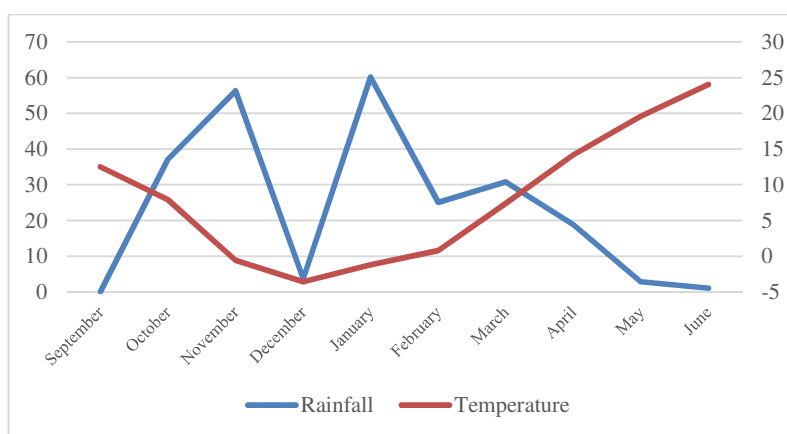
با توجه به لزوم شناسایی پاسخ ژنوتیپ‌های متحمل و حساس نوین گندم (حاصل فعالیت‌های به‌نژادی اخیر موسسه تحقیقات دیم کشور) که در شرایط دیم و آبیاری تکمیلی دارای عملکرد مناسب باشند و همچنین، با عنایت به متغیر بودن شرایط دیم از نظر میزان بارش‌های سالیانه و دسترسی گیاه به رطوبت، این مطالعه انجام شد که هدف از آن، بررسی تغییرات فیزیولوژیک، عملکرد و اجزای عملکرد ژنوتیپ‌ها در شرایط دیم و آبیاری تکمیلی بود.

مواد و روش‌ها

با اجرای یک پژوهش دو ساله روی ۴۹ ژنوتیپ گندم نان پاییزه طی سال‌های ۱۳۹۷-۹۸ و ۱۳۹۸-۹۹ در موسسه تحقیقات دیم کشور، دو ژنوتیپ حساس با عملکرد ضعیف در شرایط دیم (ژنوتیپ‌های شماره ۳۰ و ۴۰) و دو ژنوتیپ متحمل با عملکرد مناسب در شرایط دیم (ژنوتیپ‌های شماره ۴ و ۳۳) انتخاب شدند (Sedghieh *et al.*, 2025). ژنوتیپ‌ها در دو شرایط آبیاری تکمیلی و دیم به‌صورت طرح کرت‌های خرد شده در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار مورد ارزیابی قرار

سطح دریا با آب و هوای معتدل متمایل به سرد و نسبتاً مرطوب با میانگین بارندگی ۳۲۰ میلی‌متر در مختصات جغرافیایی ۴۶°۴۵' طول شرقی و ۳۷°۲۶' عرض شمالی قرار دارد. کاشت ژنوتیپ‌ها در شش ردیف توسط خطی‌کار شش‌ردیفه آزمایش‌ها در کرت‌هایی به طول ۷/۲ متر با فاصله ۱۷/۵ سانتی‌متر میان ردیف‌ها و تراکم ۳۸۰ بذریه در متر مربع در تاریخ ۲۰ مهر ۱۳۹۹ انجام شد. با توجه به وضعیت خاک مزرعه (جدول ۱)، کود اوره به میزان ۸۰ کیلوگرم در هکتار و کود سوپر فسفات تریپل به میزان ۳۰ کیلوگرم در هکتار در زمان کاشت به صورت جای‌گذاری در زیر بذر مصرف شد.

گرفتند. آبیاری مزرعه به روش بارانی به میزان ۴۰ میلی‌متر در تاریخ ۲۲ مهرماه بلافاصله پس از کاشت بذر انجام شد. همچنین، آبیاری دوم به میزان ۲۴ میلی‌متر در تاریخ ۲۸ اردیبهشت در مرحله رشد آبستنی (Booting)، کد ۴۹ زادوکس (Zadoks *et al.*, 1974)، بر اساس نمونه‌برداری از عمق ۲۰ سانتی‌متری فقط به منظور خیس کردن خاک تا عمق ۱۰ تا ۱۵ سانتی‌متری انجام شد (Tavakoli, 2001). متوسط بارندگی و درجه حرارت محل اجرای آزمایش طی دوره رشد گیاه در شکل ۱ ارائه شده است. موسسه تحقیقات کشاورزی دیم کشور در فاصله ۲۰ کیلومتری شهرستان مراغه، در ارتفاع ۱۷۲۵ متری از



شکل ۱- متوسط بارندگی و دما طی دوره رشد گیاه در سال زراعی ۱۳۹۹-۱۴۰۰

Figure 1. Average temperature and rainfall during the plant growth period in 2021-2022 cropping year

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نمونه خاک محل اجرای پژوهش

Table 1. Physical and chemical characteristics of the soil sample at the research site

Soil characteristics	Amount	Soil characteristics	Amount
Sampling depth (cm)	0-30	Electrical conductivity of saturated Extract (decsiemens/m)	0.53
Sand (percent)	20.33	Neutralizing substances (percentage)	3.4
Clay (percent)	43.67	Saturated mud reaction (pH)	7.57
Silt (percent)	36	Total nitrogen (percentage)	0.071
Soil texture	Clay loam	Absorbable phosphorus (mg/kg)	9.57

فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، آسکوربات پراکسیداز و گایاکول پراکسیداز نیز به ترتیب از روش‌های آبی (Aebi, 1984)، سایریم و همکاران (Sairam *et al.*, 1998) و یوشیمورا و همکاران (Yoshimura *et al.*, 2000) استفاده شد. میزان انباشت پراکسید هیدروژن و ترکیب آلی مالون دی‌آلدید نیز به ترتیب بر اساس روش‌های چن و همکاران (Chen *et al.*, 2000) و استوارت و بولی (Stewart & Bewley, 1980) اندازه‌گیری شدند.

اندازه‌گیری‌های بیوشیمیایی

مقدار کلروفیل کل با استفاده از روش آرنون (Arnon *et al.*, 1959) و میزان پرولین به روش بیتس و همکاران (Bates *et al.*, 1973) اندازه‌گیری شد. میزان فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز و آیزویم‌های آن با بهره‌گیری از روش سایریم و سریواستوا (Sairam & Srivastava, 2002)، در نمونه‌هایی که دو هفته پس از اعمال تنش برداشت شده بودند، اندازه‌گیری شد. برای سنجش میزان

اندازه‌گیری عملکرد و اجزای عملکرد

بوته‌های گندم در مرحله رسیدگی (با رطوبت حدود ۱۴ درصد) پس از حذف نیم متر از اطراف کرت‌ها به‌عنوان حاشیه به‌وسیله کمباین آزمایشی برداشت و پس از جدا کردن دانه‌ها، عملکرد دانه با ترازوی حساس با دقت ۰/۱ گرم اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری شمار سنبله در واحد سطح، تعداد سنبله‌ها در ۱۰ بوته تصادفی از خطوط میانی هر کرت، شمارش و به یک متر مربع تعمیم داده شد. برای شمار دانه در سنبله نیز دانه‌های موجود در ۱۰ بوته تصادفی از خطوط میانی هر کرت شمارش و سپس میانگین آن‌ها در هر سنبله محاسبه شد. وزن هزار دانه نیز با توزین پنج نمونه تصادفی هزار تایی از هر کرت با ترازوی ۰/۰۰۱ گرم و محاسبه میانگین آن‌ها اندازه‌گیری شد.

تجزیه و تحلیل داده‌ها

تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها با نرم‌افزار SAS نسخه ۹/۴ و مقایسه میانگین‌ها با آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد انجام شد.

نتایج و بحث

نتایج این مطالعه نشان داد که اثر تیمارهای آزمایشی بر کلیه صفات اندازه‌گیری شده معنی‌دار بود. همچنین، ژنوتیپ‌های مورد مطالعه با توجه به میزان حساسیت و تحمل آن‌ها، واکنش‌های متفاوتی در مقابل تنش خشکی نشان دادند. این مساله به‌ویژه در فعالیت آنزیم‌های دخیل در رویارویی با آسیب‌های اکسیداتیو مشهودتر بود.

پرولین

بیش‌ترین میزان پرولین در ژنوتیپ شماره ۴ تحت شرایط دیم با ۲۵/۵۳ میکرومول بر گرم وزن تر و کم‌ترین میزان آن در لاین‌های شماره ۴۰ و ۳۰ تحت شرایط آبیاری تکمیلی به‌ترتیب با ۴ و ۵/۳۳ میکرومول بر گرم وزن تر مشاهده شد (شکل ۲-ا). افزایش میزان پرولین در گیاهان تحت تنش و به‌ویژه در رقم‌های متحمل، به‌واسطه ساخت پرولین و غیرفعال شدن روند تخریب آن است و می‌تواند نقش مؤثر این ماده را در تحمل به خشکی تایید کند (Khosh-Khabar et al., 2022). در شرایط تنش، افزایش پرولین باعث محافظت غشای یاخته‌ای، آنزیم‌های سیتوپلاسمی، پروتئین‌ها و حذف رادیکال‌های آزاد می‌شود (Liang et al., 2013)، و از

این‌رو می‌توان از آن به‌عنوان شاخصی جهت گزینش ژنوتیپ‌های متحمل به تنش استفاده کرد (Maghsoudi et al., 2018). در پژوهش حاضر، انباشت قابل توجه پرولین در لاین شماره ۴ در شرایط دیم می‌تواند به‌عنوان نشانه‌ای مهم در ایجاد تاب‌آوری به خشکی به‌شمار آید.

میزان کلروفیل کل

بالاترین میزان کلروفیل کل با ۹/۷۳ میلی مول بر گرم وزن تر در ژنوتیپ شماره ۴ در شرایط آبیاری تکمیلی ثبت شد که با ژنوتیپ شماره ۳۳ تفاوت آماری معنی‌داری نداشت. کم‌ترین میزان کلروفیل کل با ۲/۰۳ میلی‌مول بر گرم وزن تر نیز در ژنوتیپ شماره ۴۰ در شرایط دیم مشاهده شد که تفاوت معنی‌داری با ژنوتیپ شماره ۳۰ در این شرایط نداشت (شکل ۲-ب). بالا بودن میزان کلروفیل در ژنوتیپ ۴ موجب افزایش میزان فتوسنتز و باعث افزایش ناشی از فتوسنتز شده که سرانجام می‌تواند باعث افزایش عملکرد شود. در مجموع، بروز تنش اکسیداتیو ناشی از کمبود رطوبت در کلروپلاست‌ها، باعث تولید انواع اکسیژن فعال می‌شود و اثرات نامطلوبی بر پروتئین‌ها و مراکز واکنش فتوسیستم II بر جای می‌گذارد (Jin et al., 2003)، به‌طوری که افزایش شدت و زمان قرارگیری گیاهان در شرایط تنش خشکی سبب تسریع در روند تخریب رنگریزه‌های کلروفیل، فعال‌سازی آنزیم‌های کلروفیل‌از و پراکسیداز و پراکسیداسیون لیپیدی خواهد شد (Zafari et al., 2020). نتایج پژوهش حاضر نشان داد که پایین بودن سطح پراکسید هیدروژن و مالون دی‌آلدئید در ژنوتیپ شماره ۴ در شرایط آبیاری تکمیلی ناشی از کم بودن تنش‌های اکسیداتیو بوده است، به‌طوری که برآیند این موضوع منجر به عدم تولید گونه‌های فعال اکسیژن، عدم تخریب کلروفیل و بالا بودن میزان آن در ژنوتیپ شماره ۴ در شرایط آبیاری تکمیلی شد.

پراکسید هیدروژن

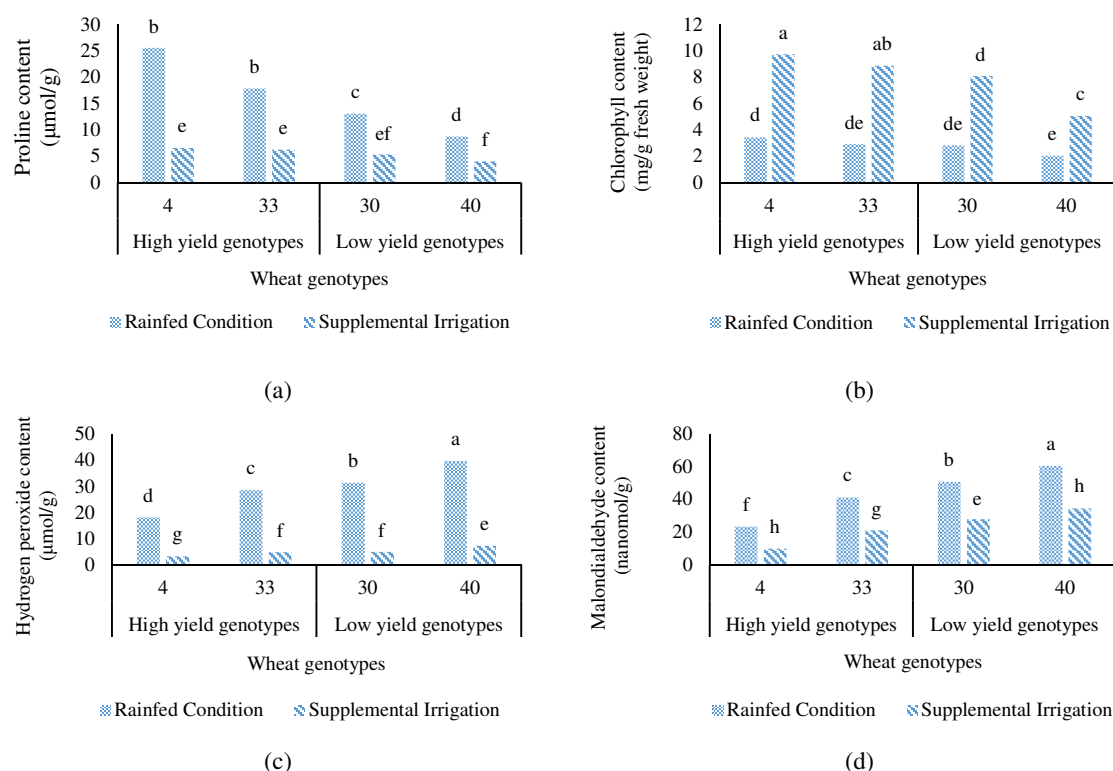
خشکی باعث انباشت چشم‌گیر پراکسید هیدروژن (H_2O_2) در شرایط دیم در هر چهار ژنوتیپ حساس و متحمل مورد بررسی شد. در بین ژنوتیپ‌های مورد بررسی، بیشینه میزان این ترکیب مربوط به ژنوتیپ شماره ۴۰ در شرایط دیم و کمینه آن مربوط به ژنوتیپ شماره ۴ در شرایط آبیاری تکمیلی بود (شکل ۲-ج). بالا بودن فعالیت این ترکیب در ژنوتیپ شماره ۴۰ بیانگر پایین بودن سازوکار دفاعی این ژنوتیپ در شرایط تنش و ناتوانی

اکسید دیسموتاز، کاتالاز، آسکوربات پراکسیداز و اکسیداز توسط چاکرابورتی و پرادهان (Chakraborty & Pradhan, 2012) نیز گزارش شده است که با تغییرات آنزیم‌های مزبور در پژوهش حاضر و به‌ویژه در ژنوتیپ شماره ۴ تحت شرایط آبیاری تکمیلی مطابقت داشت.

میزان مالون دی‌آلدئید

بیش‌ترین محتوای مالون دی‌آلدئید در ژنوتیپ شماره ۴۰ در شرایط دیم و کم‌ترین میزان آن در ژنوتیپ شماره ۴ در شرایط آبیاری تکمیلی مشاهده شد که نشان‌دهنده تحمل بهتر این ژنوتیپ در برابر گونه‌های فعال اکسیژن است (شکل ۲-د). رابطه بین میزان انباشت مالون دی‌آلدئید و گونه‌های فعال اکسیژن همواره مثبت است (Pandhair & Sekhon, 2006) و وجود این ارتباط در ژنوتیپ شماره ۴۰ در شرایط دیم موید همین مسئله است.

آن در کنترل گونه‌های فعال اکسیژن است. پراکسید هیدروژن با طول عمر نسبتاً بالا و توانایی انتشار آزادانه در میان گونه‌های فعال اکسیژن، نقش عمده‌ای در تشدید آسیب‌های وارده به یاخته‌ها در زمان بروز تنش دارد (Bienert & Chaumont, 2014). آشکار شده است که مقادیر بالای این ترکیب، به‌واسطه تولید رادیکال‌های هیدروکسیل با قابلیت واکنش‌پذیری بالا، موجب تشدید تنش اکسیداتیو می‌شود (Andrés *et al.*, 2022). گاد و کاجول (Goud & Kachole, 2011) گزارش کردند که پراکسید هیدروژن در مقادیر بالا دارای ویژگی سمی برای همه اجزای یاخته از جمله رنگدانه‌ها، پروتئین‌ها، اسیدهای نوکلئیک و کربوهیدرات‌ها است. تولید H_2O_2 نخستین فرسته (سیگنال) برای آغاز فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان به‌شمار می‌آید و از این راه از شدت تنش‌های غیرزیستی می‌کاهد (Asgher *et al.*, 2021). کاهش پراکسید هیدروژن در گندم در اثر افزایش فعالیت آنزیم‌های سوپر



شکل ۲- میزان پرولین (a)، کلروفیل کل (b)، پراکسید هیدروژن (c) و مالون دی‌آلدئید (d) در ژنوتیپ‌های گندم مطالعه شده در شرایط آبیاری تکمیلی و دیم

Figure 2. Amount of proline (a), Chlorophyll (b), Hydrogen peroxide (c) and Malondialdehyde (d) in the studied wheat genotypes under supplementary irrigation and rainfed conditions

مقاومت بیش‌تر گیاه باشد (Javadi *et al.*, 2024). افزایش فعالیت آنزیم کاتالاز طی تنش خشکی در رقم‌های مقاوم گندم (Simonovicova *et al.*, 2010) و گلرنگ (Zafari *et al.*, 2020) نیز گزارش شده است.

آنزیم آسکوربات پراکسیداز (APX)

بیش‌ترین فعالیت این آنزیم مربوط به ژنوتیپ شماره ۴ در شرایط دیم با ۸/۶۰ واحد آنزیمی بر میلی گرم پروتئین و کم‌ترین فعالیت آن مربوط به لاین‌های شماره ۴۰ و ۳۰ در شرایط آبیاری تکمیلی به ترتیب با ۰/۳۹۶۷ و ۰/۵۰۶۷ واحد آنزیمی بود (شکل ۳-b). آنزیم آسکوربات پراکسیداز مهم‌ترین آنزیم آنتی‌اکسیدانی چرخه AsH-GSH است (Rajput *et al.*, 2021)، که در حذف H_2O_2 عمدتاً در کلروپلاست‌ها، جایی که CAT وجود ندارد، و نیز در سایر بخش‌های یاخته‌ای از جمله سیتوزول، میتوکندری و پراکسی‌زوم‌ها عمل می‌کند (Dumanović *et al.*, 2021). با فعالیت این آنزیم، پراکسید هیدروژن به آب تبدیل می‌شود (Blokina & Fagerstedt, 2010). حیدری و همکاران (Heidari & Moaveni, 2009) در سورگوم و عباسی و همکاران (Abbasi *et al.*, 2021) در گندم گزارش کردند که با افزایش فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز از میزان آسیب به گونه‌های فعال اکسیژن به‌ویژه پراکسید هیدروژن کاهش یافته و در پی آن، تحمل گیاه به تنش خشکی افزایش می‌یابد.

آنزیم گایاکول پراکسیداز (GPX)

ژنوتیپ شماره ۴ در شرایط دیم با ۸۸/۱۶۷ واحد دارای بیش‌ترین فعالیت و ژنوتیپ‌های شماره ۴۰ و ۳۰ در شرایط آبیاری تکمیلی به ترتیب با ۱۵/۴۶۷ و ۱۷/۶۶۷ واحد دارای کم‌ترین فعالیت این آنزیم بودند (شکل ۳-c). گایاکول پراکسیداز یکی از آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان است که در واکنش با پراکسید هیدروژن، گایاکول را اکسید و ترکیبی به نام تتراگایاکوکوئینون تولید می‌کند (Erofeeva, 2015). عابدی و پاک‌نیت (Abedi & Pakniyat, 2010) از این آنزیم به‌عنوان یکی از عوامل اصلی کاهش اثرات سوپراکسید هیدروژن به‌ویژه در شرایط عدم کارکرد کاتالاز نام بردند. افزایش فعالیت گایاکول پراکسیداز در شرایط تنش خشکی در ژنوتیپ‌های نخود (Rezainia *et al.*, 2019) و کلزا (Ahmadi *et al.*, 2022) باعث افزایش تاب‌آوری این گیاهان شد. با این حال، کاهش فعالیت گایاکول پراکسیداز در برخی از ژنوتیپ‌ها

نتایج این مطالعه نشان داد که با افزایش کمبود آب در شرایط دیم میزان انباشت پراکسید هیدروژن افزایش یافت که نتیجه آن افزایش میزان مالون دی‌آلدئید بود (شکل‌های ۲-c و d). در واقع، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان باعث کاهش مقدار گونه‌های فعال اکسیژن می‌شود. بررسی تغییرات آنزیم‌های اکسیداتیو در این پژوهش (شکل‌های ۳-a, b و c) نشان داد که بیش‌ترین میزان آنزیم‌های کاتالاز، آسکوربات پراکسیداز و گایاکول پراکسیداز در شرایط دیم مربوط به ژنوتیپ شماره ۴۰ بود که با نتایج به‌دست آمده در ارتباط با میزان تجمع پراکسید هیدروژن و مالون دی‌آلدئید در این شرایط مطابقت داشت. یکی از ویژگی‌های ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی در مقابله با این تنش، پتانسیل جلوگیری از تضعیف یکپارچگی غشا و کاهش پراکسیداسیون لیپیدی است (Simova-Stoilova *et al.*, 2010) که با سطح پایین‌تر مالون دی‌آلدئید مشخص می‌شود (Upadhyay *et al.*, 2020). مالون دی‌آلدئید فرآورده نهایی پراکسیداسیون لیپیدهای اشباع نشده یاخته است و میزان تولید آن به‌عنوان شاخصی برای اندازه‌گیری سطح تنش‌های اکسیداتیو و نیز به‌عنوان بیومارکری برای تعیین میزان پراکسیداسیون لیپیدی ناشی از بروز تنش‌های مزبور در یاخته‌ها استفاده می‌شود (Sachdev *et al.*, 2021). یکی از دلایل مهم آسیب گیاهان تحت تنش، ایجاد تنش اکسیداتیو است که در اثر تولید انواع فعال اکسیژن در کلروپلاست و میتوکندری رخ می‌دهد و با آسیب بر درشت‌مولکول‌های زیستی نظیر لیپیدها و پروتئین‌ها، کارایی سلول را تحت تاثیر قرار می‌دهند. در این میان، از دست رفتن یکپارچگی غشای یاخته‌ای یکی از رایج‌ترین اثرات مخربی است که توسط گونه‌های فعال اکسیژن در یاخته‌های گیاهی انجام می‌شود (Sachdev *et al.*, 2021).

آنزیم کاتالاز

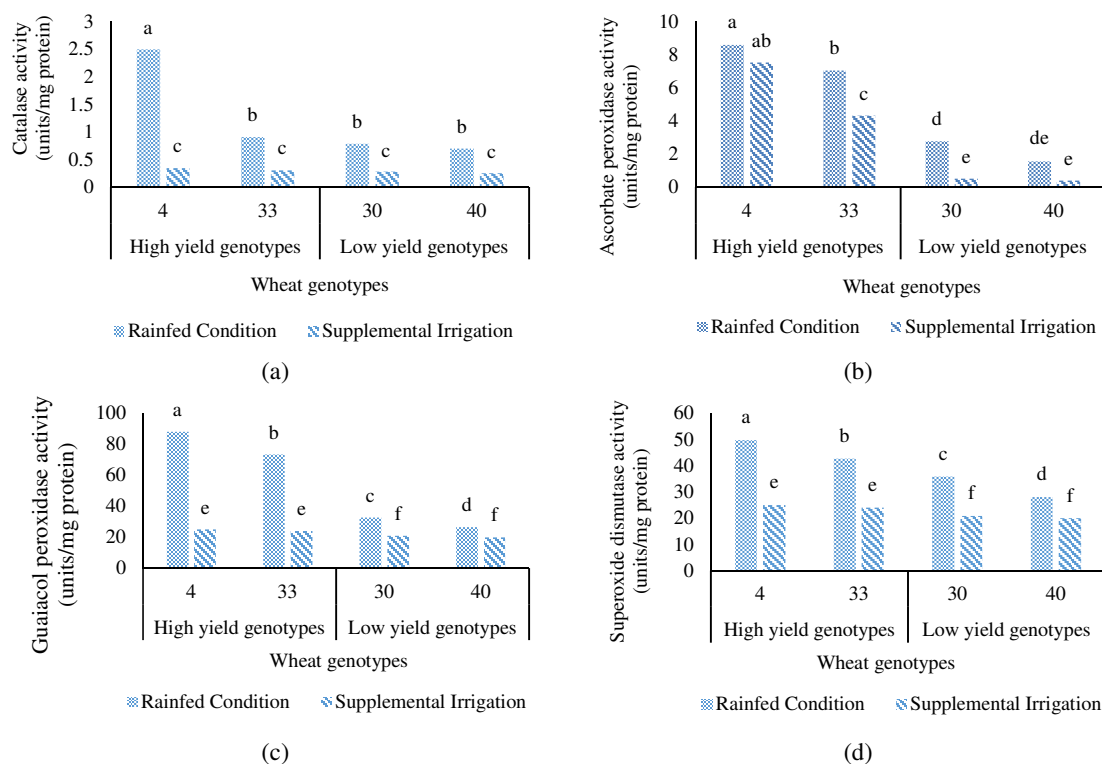
بیش‌ترین فعالیت این آنزیم در ژنوتیپ شماره ۴ در شرایط دیم با ۲/۵ واحد آنزیمی و کم‌ترین فعالیت آن در ژنوتیپ‌های شماره ۳۳، ۳۰، ۴۰ و ۴ به ترتیب با ۰/۲۴۶۷، ۰/۲۸۰۰، ۰/۲۵۰۰ و ۰/۲۷۰۶۰ واحد آنزیمی بر میلی گرم پروتئین در شرایط آبیاری تکمیلی ثبت شد (شکل ۳-a). کاتالاز یک آنزیم دارای گروه هم است که با حذف پراکسید هیدروژن، نقش مؤثری در مقاومت به خشکی دارد و در نتیجه، فعالیت بیش‌تر آن می‌تواند نشان‌دهنده

مرگ برنامه‌ریزی شده یاخته است (Breusegem *et al.*, 2001). فعالیت SOD موجب افزایش غلظت پراکسید هیدروژن و در نتیجه افزایش فعالیت آنزیم کاتالاز برای تجزیه پراکسید هیدروژن می‌شود (Sarker & Oba, 2018). از آن جایی که سوپر اکسید دیسموتاز به‌عنوان نخستین خط دفاعی برای از بین بردن رادیکال آزاد اکسیژن وارد عمل می‌شود (Alscher *et al.*, 2002)، بنابراین افزایش این آنزیم در ژنوتیپ‌های مقاوم، همانند آنچه که در گندم نان گزارش شد (Radfar *et al.*, 2023)، نشان‌دهنده فعال شدن واکنش‌های دفاع از یاخته در برابر رادیکال‌های آزاد اکسیژن و در نتیجه مهار ماده سمی پراکسید هیدروژن است که در ادامه توسط سایر اجزای ساختار دفاع آنتی‌اکسیدانی شامل کاتالاز و آسکوربات پراکسیداز تجزیه می‌شود (Drogar *et al.*, 2019). اظهار شده است که یافتن ارتباط واقعی میان بیان SOD و بهره‌وری گیاه در شرایط تنش خشکی، عامل اساسی در شناسایی ژنوتیپ‌های مقاوم به خشکی در روند به‌زادی گیاهان زراعی است (Lotfi *et al.*, 2010).

می‌تواند به‌دلیل افزایش مقدار آسکوربات پراکسیداز باشد، زیرا در این شرایط آسکوربات به‌عنوان سوبسترا جایگزین گایاکول می‌شود و تأثیری بازدارنده بر گایاکول پراکسیداز اعمال می‌کند (Mika & Luthje, 2003).

آنزیم سوپر اکسید دیسموتاز (SOD)

بیشینه فعالیت این آنزیم را ژنوتیپ شماره ۴ در شرایط دیم با ۴۹/۷۳ واحد آنزیمی بر میلی‌گرم پروتئین و کم‌ترین فعالیت آن را ژنوتیپ‌های شماره ۴۰ و ۳۰ در شرایط آبیاری تکمیلی به‌ترتیب با ۱۹/۹۳ و ۲۰/۸۶۶۷ واحد ثبت کردند (شکل ۳-d). آنزیم سوپر اکسید دیسموتاز یکی از آنزیم‌های کلیدی سازگان دفاعی یاخته‌های گیاهی است که نقش بسزایی در راستای رویارویی با اکسیداسیون مواد زیستی دارد و با فعالیت آن رادیکال سوپر اکسید به پراکسید هیدروژن تبدیل می‌شود (Alscher *et al.*, 2002). با فعالیت SOD، مقدار رادیکال سوپر اکسید در یاخته افزایش می‌یابد که برآیند آن، آسیب به ساختار یاخته‌های گیاهی و پدید آمدن ناهنجاری‌های وابسته به سوخت و ساز گیاه و سرانجام



شکل ۳- فعالیت آنزیم‌های کاتالاز (a)، آسکوربات پراکسیداز (b)، گایاکول پراکسیداز (c) و سوپر اکسید دیسموتاز (d) در ژنوتیپ‌های گندم مطالعه شده در شرایط آبیاری تکمیلی و دیم

Figure 3. The activity of catalase (a), Ascorbate peroxidase (b), guaiacol peroxidase (c) and superoxide dismutase (d) enzymes in the studied wheat genotypes under supplementary irrigation and rainfed conditions

عملکرد و اجزای عملکرد

کاهش عملکرد دانه تحت شرایط تنش خشکی، ناشی از کاهش اجزای عملکرد دانه، شامل شمار سنبله در واحد سطح، شمار دانه در سنبله و وزن هزار دانه است (Ramezani et al., 2008). تعیین میزان تغییرات هر یک از این اجزا می‌تواند شاخص مناسبی برای گزینش ژنوتیپ‌ها و رقم‌های گوناگون و واکاوی واکنش‌های فیزیولوژیک آن‌ها باشد.

شمار سنبله در واحد سطح

نتایج پژوهش حاضر نشان داد که بالاترین شمار سنبله در واحد سطح مربوط به ژنوتیپ شماره ۴ تحت شرایط آبیاری تکمیلی و کم‌ترین مقدار آن مربوط به ژنوتیپ شماره ۴۰ تحت شرایط دیم بدون تفاوت آماری با ژنوتیپ شماره ۳۰ در همین شرایط بود (شکل ۴-a). در گندم، توانایی پنجه‌زنی یکی از صفات مهم زراعی است که به‌عنوان سازوکاری تطبیقی به گیاه اجازه می‌دهد تا اندام‌های منبع اضافی را ایجاد کند و با تأثیر بر مولفه شمار سنبله در واحد سطح، به‌عنوان جزء مهمی از عملکرد (Zhang et al., 2019)، تولید دانه را متأثر سازد (Miller et al., 2010). اگرچه آغازش واقعی سنبله‌ها در دوره زایشی گیاه و پس از تبدیل آغاز (پرموردیوم) رویشی به زایشی میسر خواهد شد، ولی تشکیل پنجه‌ها به‌عنوان پیش‌اندام مورد نیاز برای سنبله‌ها در دوره رویشی و در مرحله گیاهچه‌ای گندم رخ می‌دهد (Kafi et al., 2019). در پژوهش حاضر، زمان انجام آبیاری نخست در تیمارهای برخوردار از آبیاری تکمیلی در مرحله پس از کاشت بود که این امر می‌تواند دلیلی بر افزایش شمار سنبله‌ها در این تیمارها باشد. شایان ذکر است که پس از آبیاری‌های معمول، رطوبت قابل جذب اغلب در لایه‌های صفر تا ۵۰ سانتی‌متری خاک اندوخته می‌شود که این امر می‌تواند با تشویق پنجه‌زنی و پشتیبانی از مراحل رشدی بعدی، منجر به تولید سنبله‌های افزون‌تر در گندم شود (Li et al., 2010). البته در شرایط دیم، کاهش زودهنگام دسترسی به منابع غذایی و رطوبت، که به‌طور معمول با آغاز مرحله ساقه‌روی بوته‌های گندم همراه است (Kafi et al., 2019)، باعث می‌شود که اغلب سنبله‌های ساقه اصلی و پنجه نخست و دوم تا زمان رسیدگی باقی بمانند (Li et al., 2019). در همین زمینه، مطالعات نشان داده‌اند که رقم‌هایی که شمار پنجه‌های بارور بیش‌تری دارند، از

عملکرد دانه افزون‌تری نیز برخوردار هستند (Attarbashi et al., 2002). الهام و همکاران (Elhani et al., 2007) نشان دادند که در شرایط دیم، میان افزایش عملکرد دانه در گندم دوروم و وجود سنبله روی پنجه‌های محدود گیاه همبستگی مثبت و معنی‌داری وجود داشت.

شمار دانه در سنبله

نتایج این مطالعه نشان داد که بیش‌ترین شمار دانه در سنبله مربوط به ژنوتیپ شماره ۴ در شرایط آبیاری تکمیلی بود که با میزان این مولفه برای ژنوتیپ مزبور در شرایط دیم و ژنوتیپ شماره ۳۳ در شرایط آبیاری تکمیلی، تفاوت آماری معنی‌داری وجود نداشت. کم‌ترین شمار دانه در سنبله نیز متعلق به ژنوتیپ شماره ۴۰ در شرایط دیم، بدون تفاوت آماری با ژنوتیپ شماره ۳۰ در همین شرایط بود (شکل ۴-b). شمار دانه در سنبله به‌عنوان مهم‌ترین جزء عملکرد در گندم (Savin et al., 2022)، و به‌ترین شاخص برای گزینش ژنوتیپ‌های متحمل به تنش خشکی (Roustaii, 2015)، برآیند شمار سنبله‌ها و گلچه‌های آغازش‌یافته و باقی‌مانده از مرحله ظهور برجستگی‌های دوگانه تا آغازش سنبله‌ها (برای سنبله‌ها) و از مرحله آغازش سنبله‌ها (برای گلچه‌ها) است (Kafi et al., 2019). دسترسی به عوامل بیرونی و درونی مورد نیاز برای رشد در این مراحل از فنولوژی گندم، باعث تشویق ایجاد دانه‌های بیش‌تر و متعاقب آن در مراحل بعدی، موجب باقی ماندن دانه‌های تشکیل شده روی سنبله خواهد شد (Ihsan et al., 2016). در همین خصوص، کیان و همکاران (Qian et al., 2025) گزارش کردند که اعمال تنش خشکی در مراحل گل‌شکفتگی و باروری دوگانه، با تأثیر سوء بر بقای دانه‌های گرده و توانایی تندش این دانه‌ها روی کلالة و همچنین رشد لوله گرده در خامه، به‌شدت از تبدیل گلچه‌های تشکیل یافته در مرحله زایشی به دانه جلوگیری می‌کند. از سوی دیگر، وقوع تنش خشکی پیش از مرحله گرده‌افشانی، با جلوگیری کردن از گسیل و انباشت فتوآسیملات‌ها در ساختار سنبله‌ها، موجب کاهش وزن خشک آن‌ها و کاهش قابلیت شکل‌گیری و تکوین گلچه‌ها در آن‌ها می‌شود که پیامد آن کاهش شمار دانه‌ها خواهد بود (Senapati et al., 2019; Zhang et al., 2021). از این‌رو، آبیاری‌های انجام شده در پژوهش حاضر در مراحل پس از کاشت و

آبستنی (چکمه‌ای) می‌تواند دلیلی بر افزایش شمار دانه‌های موجود در سنبله در ژنوتیپ‌های تحت آبیاری تکمیلی باشد. این در حالی است که بیش‌ترین تعداد مرگ و میر گلچه‌ها در مرحله بین آبستنی و سنبله‌دهی (Guo *et al.*, 2018)، مرحله‌ای که در پژوهش حاضر، دومین آبیاری تکمیلی انجام شد، رخ می‌دهد. شو و همکاران (Xu *et al.*, 2023) نیز گزارش کردند که وقوع تنش خشکی طی دوره‌های رویشی و زایشی گندم موجب کاهش معنی‌دار شمار دانه در سنبله، به دلیل حساسیت بالای این جزء عملکرد نسبت به خشکی و دماهای بالا، می‌شود. در همین راستا، میربهار و همکاران (Mirbahar *et al.*, 2009) نیز گزارش کردند که بالا بودن شمار دانه در سنبله در رقم‌های پربازده، اثر مستقیمی بر عملکرد دانه، به واسطه کارایی بالا در انجام فتوسنتز و گسیل فتواسیمیلات‌ها به گلچه‌ها در هر دو شرایط دیم و آبیاری تکمیلی دارد. در آزمایش حاضر نیز بالا بودن میزان کلروفیل و واکنش‌های کارآمدتر آنزیمی می‌تواند بالا بودن شمار دانه در سنبله را در ژنوتیپ‌های برگزیده پربازده توجیه کند. کافی و همکاران (Kafi *et al.*, 2019) نیز وجود ارتباط مستقیم میان دسترسی به مواد فتوسنتزی و اندازه سنبله و شمار دانه در سنبله را گزارش کردند. هوشمند امجدی و همکاران (Hoshmand Amjadi *et al.*, 2019) نیز با بررسی اثر آبیاری تکمیلی بر رقم‌های گندم دیم گزارش کردند که با وجود تفاوت زیاد بین رقم‌ها، آبیاری تکمیلی می‌تواند اثر قابل توجه و معنی‌داری بر شمار دانه در سنبله داشته باشد.

وزن هزار دانه

نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که ژنوتیپ‌های شماره ۴ و ۳۳ در هر دو شرایط آبیاری تکمیلی و دیم، بیش‌ترین و ژنوتیپ‌های شماره ۳۰ و ۴۰ در شرایط دیم، کم‌ترین میزان وزن هزار دانه را به خود اختصاص دادند (شکل ۴-۲). گزارش شده است که در برخی از شرایط، با افزایش شمار دانه در سنبله از وزن و اندازه دانه‌ها کاسته می‌شود که این امر می‌تواند منجر به کاهش وزن هزار دانه شود (Kaplan *et al.*, 2023). در پژوهش حاضر، روند چنین کاهش در ژنوتیپ‌های کم‌بازده شماره ۳۰ و ۴۰ مشاهده شد که می‌تواند دلیلی بر دسترسی کم این ژنوتیپ‌ها به شیره پرورده و یا توان اندک آن‌ها در بهره‌گیری از فرایند بازگسیل (انتقال مجدد) (Sedghieh

2023, *et al.*) باشد. چنین وضعیتی در تنش خشکی ایجاد شده در شرایط دیم تشدید شد (شکل ۴-۲). افزون بر این، با توجه به نتایج حاصل از شمار سنبله در واحد سطح و شمار دانه در سنبله، می‌توان به سرعت کم‌تر افت وزن هزار دانه در مقابل دو جزء فوق، در مقایسه ژنوتیپ‌های پربازده در برابر ژنوتیپ‌های کم‌بازده پی برد (شکل‌های ۴-۲، ۴-۳ و ۴-۴). به نظر می‌رسد این جزء تأثیر کم‌تری نسبت به سایر اجزا بر عملکرد دانه داشته باشد (Hernandez-Ochoa *et al.*, 2023). ملکی و همکاران (Maleki *et al.*, 2008) در پژوهشی با مطالعه تأثیر تنش خشکی بر تغییرات عملکرد و شاخص‌های تاب‌آوری به خشکی در شرایط آبیاری و بدون آبیاری بر ژنوتیپ‌های گندم اظهار داشتند که آبیاری تأثیر معنی‌داری بر ویژگی‌هایی نظیر عملکرد دانه و وزن هزار دانه داشت. به نظر می‌رسد خشکی با افزودن بر سرعت بازگسیل نیتروژن برگ‌ها و سایر اندام‌های سبز موجب تسریع پیری گیاه می‌شود که این امر از یک‌سو سبب پیری زودرس بوته و از سوی دیگر منجر به کوتاه شدن طول دوره پر شدن دانه‌ها می‌شود (Kamal *et al.*, 2018). در همین زمینه، میربهار و همکاران (Mirbahar *et al.*, 2009) دریافتند که بیش‌ترین کاهش در وزن هزار دانه مربوط به اعمال تنش خشکی در مراحل پایانی رشد و به‌ویژه پس از مرحله گلدهی بود و شدیداً تحت تأثیر صفات توارثی به‌ویژه شمار یاخته‌های آندوسپرمی که برهم‌کنش قابل توجهی با شرایط محیطی و طول دوره پر شدن دانه دارند (Yao *et al.*, 2019)، قرار گرفت.

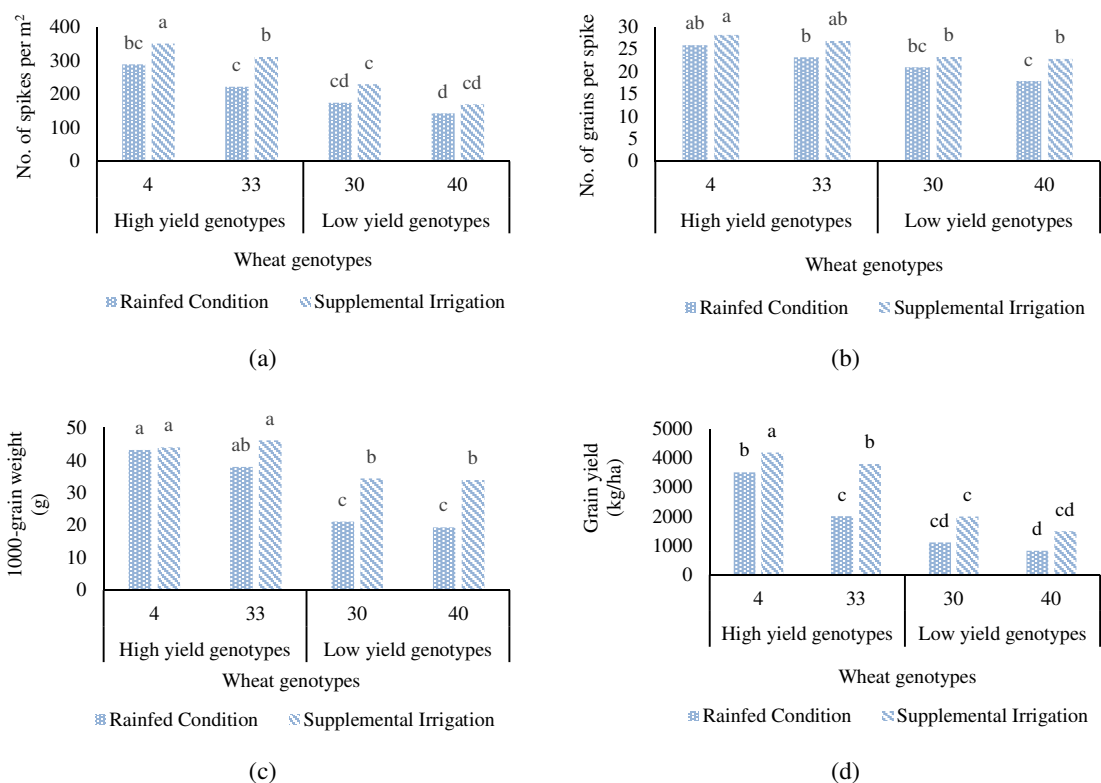
عملکرد دانه

نتایج مقایسه میانگین داده‌های عملکرد دانه نشان داد که ژنوتیپ شماره ۴ دارای بیش‌ترین مقدار عملکرد دانه در شرایط آبیاری تکمیلی بود و در مقابل، کم‌ترین مقدار این صفت در ژنوتیپ‌های شماره ۳۰ و ۴۰ در شرایط دیم بدون تفاوت معنی‌دار با یکدیگر مشاهده شد (شکل ۴-۲). بدیهی است که ژنوتیپ‌هایی که در شرایط متفاوت از لحاظ هر سه جزء شمار سنبله در واحد سطح، شمار دانه در سنبله و وزن هزار دانه برتر باشند، از عملکرد دانه بالاتری نیز برخوردار خواهند بود، ولی اغلب افزایش هر سه جزء امکان‌پذیر نمی‌باشد (Maqbool *et al.*, 2010). در پژوهش حاضر نیز در ژنوتیپ‌های برتر، روند افزایشی در اجزای فوق به‌ویژه در شرایط آبیاری تکمیلی قابل مشاهده

عملکرد دانه شود (Karimi & Jalini, 2019). یکی از توانایی‌های رقم‌های مناسب برای کشت‌های دیم، دارا بودن عملکرد بالا در شرایط بارندگی بهینه و کاهش اندک عملکرد در بارندگی کم عنوان شده است (Tigkas & Tsakiris, 2015). در واقع، این مسأله می‌تواند نشان‌دهنده درجه سازگاری زراعی انواع ژنوتیپ‌ها به شرایط واقعی دیم باشد (Dashtaki *et al.*, 2023). در پژوهش حاضر، ژنوتیپ‌های شماره ۴ و ۳۳ در هر دو شرایط دیم و آبیاری محدود دارای بالاترین مقدار عملکرد دانه و کم‌ترین تفاوت در عملکرد بودند. عنوان شده است که قابلیت توأم توانایی استفاده از آب در دسترس و برخورداری از مقاومت در برابر خشکی با کاستن از دمای پوشش سبز گندم به‌ویژه در مراحل بحرانی، موجب کاهش اثرات تنش خشکی بر گیاه می‌شود که این امر با افزایش کارایی مصرف آب و توان فتوسنتزی گیاه منجر به افزایش عملکرد دانه می‌شود (Feiziasl *et al.*, 2014; Al-Ghzawi *et al.*, 2018).

بود، ولی چنین وضعیتی در ژنوتیپ‌های کم‌بازده و در شرایط دیم مشاهده نشد و به‌ویژه جزء وزن هزار دانه با افزایش شمار سنبله و شمار دانه در سنبله از روند کاهشی برخوردار شد (شکل‌های ۴-a، b و c). به‌نظر می‌رسد در این پژوهش، عواملی مانند بالا بودن سطح کلروفیل و پیرو آن، بالا بودن فتوآسیمیلات‌های فتوسنتزی، مهار کارآمد ترکیبات پراکسید هیدروژن و مالون دی‌آلدئید، فعالیت بالای آنزیمی و حضور موثرتر پروتئین در ژنوتیپ‌های پرمحصول ۴ و ۳۳، دلیل برتری معنی‌دار آن‌ها نسبت به ژنوتیپ‌های کم‌محصول بود.

تنش خشکی تأثیر زیادی بر عملکرد دانه گندم دارد و بسته به زمان وقوع آن، می‌تواند باعث کاهش بالقوه شمار سنبله و شمار دانه در سنبله در مرحله پیش از گرده‌افشانی (Senapati *et al.*, 2019) و کاهش بالقوه و بالفعل وزن هزار دانه در مرحله پس از گرده‌افشانی (Farooq *et al.*, 2014) شود. گزارش شده است که آبیاری تکمیلی به‌عنوان یک راه‌کار موثر، در شرایطی که امکان آن فراهم باشد، می‌تواند منجر به افزایش معنی‌دار



شکل ۴- شمار سنبله در متر مربع (a)، دانه در سنبله (b)، وزن هزار دانه (c) و عملکرد دانه‌ای (d) در ژنوتیپ‌های مطالعه شده گندم در شرایط آبیاری تکمیلی و دیم

Figure 4. The number of spikes per m² (a), number of grains per spike (b), 1000-grain weight (c) and grain yield (d) in the studied wheat genotypes under supplementary irrigation and rainfed conditions

نتیجه‌گیری کلی

نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که میزان فعالیت آنزیم‌های گایاکول پراکسیداز، کاتالاز، آسکوربات پراکسیداز و سوپراکسید دیسموتاز در ژنوتیپ‌های متحمل به تنش خشکی در شرایط دیم بیش‌تر از شرایط آبیاری تکمیلی بود و پاسخ ژنوتیپ‌ها، با توجه به میزان آب در دسترس و درجه حساسیت آن‌ها به این وضعیت، متفاوت بود. در واقع، به‌نظر می‌رسد که گیاهان برای رویارویی با تنش خشکی و شرایط تنش اکسیداتیو، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی خود را افزایش می‌دهند و به‌دنبال آن، تا حد ممکن از کاهش عملکرد خود جلوگیری می‌کنند. در همین راستا، با توجه به این‌که ژنوتیپ شماره ۴ دارای بالاترین میزان فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی بود، سازوکار پاسخ بهتری را به تنش خشکی از خود نشان داد. بررسی وضعیت پرولین و کلروفیل در این ژنوتیپ و پس از آن ژنوتیپ شماره ۳۳ و پیرو آن، پایین بودن میزان پراکسید هیدروژن و مالون‌دی‌آلدید در آن‌ها می‌تواند این نتیجه را تایید کند. در مجموع، به‌نظر می‌رسد که ژنوتیپ شماره ۴ از سازگاری بیش‌تری برای شرایط متغیر مناطق دیم برخوردار است. بدیهی است که روند تغییرات اجزای عملکرد می‌تواند تعیین‌کننده تغییرات عملکرد کل در ژنوتیپ‌ها باشد. در این رابطه، ژنوتیپ‌های برتر با توجه به ویژگی‌های فیزیولوژیک آن‌ها، بهره‌برداری بیش‌تری از آبیاری تکمیلی نسبت به ژنوتیپ‌های کم‌بازده کردند که این ویژگی در دیم‌زارهایی با وضعیت بارش‌های متغیر در

سال‌های گوناگون، می‌تواند مهم تلقی شود. در بین اجزای عملکرد، شمار دانه در سنبله و در مرتبه بعد، شمار سنبله در واحد سطح، بیش‌ترین اثر مستقیم را بر عملکرد دانه داشتند که این مسأله می‌تواند نیاز به تمرکز بیش‌تر بر اجزای فوق را در آزمایش‌های مزرعه‌ای برای دست‌یابی هوشمندانه‌تر به عملکرد بهینه، توجیه کند.

تضاد منافع

نویسندگان تایید می‌کنند که این تحقیق در غیاب هرگونه روابط تجاری یا مالی می‌تواند به عنوان 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 تاکنون به‌طور کامل به هیچ زبانی و در هیچ نشریه یا همایشی چاپ و منتشر نشده است و هیچ اقدامی نیز برای انتشار آن در هیچ نشریه یا همایشی صورت نگرفته و نخواهد گرفت.

اجازه انتشار مقاله

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

References

- Tavakoli, A. (2001). Optimal management of single irrigation on dryland wheat farming. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 2(7), 41-50. [In Persian].
- Abbasi, A., Sharabyani, M. A., & Sedghi, M. (2021). Changes in spring wheat defense system using zinc and biofortified seeds with this element under drought stress. *Iranian Journal of Seed Science & Research*, 8(3), 225-244. [In Persian]. doi: [10.22124/jms.2021.5227](https://doi.org/10.22124/jms.2021.5227).
- Abedi, T., & Pakniyat, H. (2010). Antioxidant enzyme changes in response to drought stress in ten cultivars of oilseed rape (*Brassica napus* L.). *Czech Journal of Genetics & Plant Breeding*, 46(1), 27-34. doi: [17221/67/2009-CJGPB](https://doi.org/10.17221/67/2009-CJGPB).
- Aebi, H. (1984). Catalase in vitro. *Methods in Enzymology*, 105, 121-126. doi: [10.1016/s0076-6879\(84\)05016-3](https://doi.org/10.1016/s0076-6879(84)05016-3).
- Ahmadi, H., Abbasi, A., Taleei, A., Mohammadi, V., & Pueyo, J. J. (2022). Antioxidant response and calcium-dependent protein kinases involvement in canola (*Brassica napus* L.) tolerance to drought. *Agronomy*, 12(1), 125. doi: [10.3390/agronomy12010125](https://doi.org/10.3390/agronomy12010125).
- Al-Ghazawi, A. L. A., Khalaf, Y. B., Al-Ajloun, Z. I., Al-Quraan, N. A., Musallam, I., & Hani, N. B. (2018). The effect of supplemental irrigation on canopy temperature depression, chlorophyll content, and water use efficiency in three wheat (*Triticum aestivum* L. and *T. durum* Desf.) varieties grown in dry regions of Jordan. *Agriculture*, 5(5), 67. doi: [10.3390/agriculture8050067](https://doi.org/10.3390/agriculture8050067).

- Alscher, R. G., Erturk, N., & Heath, L. S. (2002). Role of superoxide dismutases (SODs) in controlling oxidative stress in plants. *Journal of Experimental Botany*, 53(372), 1331-1341. doi: [10.1093/jexbot/53.372.1331](https://doi.org/10.1093/jexbot/53.372.1331).
- Andrés, C. M. C., de la Lastra, J. M. P., Juan, C. A., Plou, F. J., & Pérez-Lebeña, E. (2022). Chemistry of hydrogen peroxide formation and elimination in mammalian cells, and its role in various pathologies. *Stresses*, 2(3), 256-274. doi: [10.3390/stresses2030019](https://doi.org/10.3390/stresses2030019).
- Arnon, D. I., Allen, M. B., & Whatley, F. R. (1959). Photosynthesis by isolated chloroplast. IV. General concept and comparison of three photochemical reactions. *Biochemica et Biophysica Acta*, 20, 449-461. doi: [10.1016/0006-3002\(56\)90339-0](https://doi.org/10.1016/0006-3002(56)90339-0).
- Asgher, M., Ahmed, S., Sehar, Z., Gautam, H., Gandhi, S. G., & Khan, N. A. (2021). Hydrogen peroxide modulates activity and expression of antioxidant enzymes and protects photosynthetic activity from arsenic damage in rice (*Oryza sativa* L.). *Journal of Hazardous Materials*, 401, 123365. doi: [10.1016/j.jhazmat.2020.123365](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123365).
- Attarbashi, M., Ghaleshi, S., & Zynalzadeh, A. (2002). Relationship of phenology and physiological traits with grain yield of wheat under rainfed conditions. *Iranian Journal of Agricultural Science*, 33(1), 21-28. [In Persian].
- Bates, L. S., Waldran, R. P., & Teare, I. D. (1973). Rapid determination of free proline for water stress studies. *Plant & Soil*, 39, 205-208. doi: [10.1007/BF00018060](https://doi.org/10.1007/BF00018060).
- Bienert, G. P., & Chaumont, F. (2014). Aquaporin-facilitated transmembrane diffusion of hydrogen peroxide. *Biochimica et Biophysica Acta*, 1840(5), 1596-1604. doi: [10.1016/j.bbagen.2013.09.017](https://doi.org/10.1016/j.bbagen.2013.09.017).
- Blokhina, O. K., & Fagerstedt, V. (2010). Oxidative metabolism, ROS & NO under oxygen deprivation. *Plant Physiology & Biochemistry*, 48(5), 359-373. doi: [10.1016/j.plaphy.2010.01.007](https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2010.01.007).
- Breusegem, F. V., Vranova, E., Dat, J. F., & Inze, D. (2001). The role of active oxygen species in plant signal transduction. *Plant Science*, 161(3), 405-414. doi: [10.1016/S0168-9452\(01\)00452-6](https://doi.org/10.1016/S0168-9452(01)00452-6).
- Chakraborty, U., & Pradhan, B. (2012). Oxidative stress in five wheat varieties (*Triticum aestivum* L.) exposed to water stress and study of their antioxidant enzyme defense system, water stress responsive metabolites and H₂O₂ accumulation. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 24(2), 117-130. doi: [10.1590/S1677-04202012000200005](https://doi.org/10.1590/S1677-04202012000200005).
- Chen, L. M., Lin, C. C., & Kao, C. H. (2000). Copper toxicity in rice seedlings: Changes in antioxidative enzyme activities, H₂O₂ level, and cell wall peroxidase activity in roots. *Botanical Bulletin of Academia Sinica*, 41, 99-103.
- Dashtaki, M., Bihamta, M. R., Majidi, S., & Azizi-Nejad, R. (2023). Effect of end-of-season drought stress on yield, yield components and some morphological and phenological characteristics of bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *Plant Research Journal (Iranian Biology Journal)*, 36(3), 242-175. doi: [20.1001.1.23832592.1402.36.3.4.9](https://doi.org/10.1001.1.23832592.1402.36.3.4.9).
- Dumanović, J., Nepovimova, E., Natić, M., Kuča, K., & Jačević, V. (2021). The significance of reactive oxygen species and antioxidant defense system in plants: A concise overview. *Frontiers in Plant Science*, 11, 552969. doi: [10.3389/fpls.2020.552969](https://doi.org/10.3389/fpls.2020.552969).
- Drogar, H., Fakheri, B., Mahdinejad, N., & Mohammadi, R. (2019). Evaluation of some biochemical traits in several cultivated and wild wheat species under drought stress. *Environmental Stresses in Agricultural Sciences*, 12(3), 685-696. doi: [10.22077/escs.2019.1473.1325](https://doi.org/10.22077/escs.2019.1473.1325).
- Elhani, S., Martos, V., Rharrabti, Y., Royo, C., & Garcia del Moral, L. F. (2007). Contribution of main stem and tillers to durum wheat (*Triticum turgidum* L. var. durum) grain yield and its components grown in Mediterranean environments. *Field Crops Research*, 103(1), 25-35. doi: [10.1016/j.fcr.2007.05.008](https://doi.org/10.1016/j.fcr.2007.05.008).
- Erenstein, O., Jaleta, M., Mottaleb, K. A., Sonder, K., Donovan, J., & Braun, H. J. (2022). Global trends in wheat production, consumption and trade. In: Reynolds, M. P., & Braun, H. J. (Eds.). *Wheat Improvement: Food Security in a Changing Climate*. Cham: Springer International Publishing. pp. 47-66. doi: [10.1007/978-3-030-90673-3_4](https://doi.org/10.1007/978-3-030-90673-3_4).
- Erofeeva, E. A. (2015). Dependence of guaiacol peroxidase activity and lipid peroxidation rate in drooping birch (*Betula pendula* Roth) and Tillet (*Tilia cordata* Mill) leaf on motor traffic pollution intensity. *Dose-Response*, 13(2), 1559325815588510. doi: [10.1177/1559325815588510](https://doi.org/10.1177/1559325815588510).
- Farooq, M., Hussain, M., & Siddique, K. H. M. (2014). Drought stress in wheat during flowering and grain-filling periods. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 33(4), 331-349. doi: [10.1080/07352689.2014.875291](https://doi.org/10.1080/07352689.2014.875291).

- Feiziasl, V., Fotovat, A., Astarae, A. R., Lakzian, A., & Mousavi, S. B. (2014). Effect of optimized nitrogen application in reducing drought stress effect on grain yield of some rainfed bread wheat genotypes. *Seed & Plant Production Journal*, 30(2), 169-198. [In Persian]. doi: [10.22092/sppj.2017.110544](https://doi.org/10.22092/sppj.2017.110544).
- Ghaffari, H., Tadayon, M. R., Nadeem, M., Cheema, M., & Razmjoo, J. (2019). Proline-mediated changes in antioxidant enzymatic activities and the physiology of sugar beet under drought stress. *Acta Physiologiae Plantarum*, 41, 22-35. doi: [10.1007/s11738-019-2815-z](https://doi.org/10.1007/s11738-019-2815-z).
- Goud, P. B., & Kachole, M. S. (2011). Effect of exogenous hydrogen peroxide on peroxidase and polyphenol oxidase in *Cajanus cajan* (L.) Millsp. detached leaves. *International Journal of Current Research*, 3(10), 61-65.
- Guo, Z., Chen, D., & Schnurbusch, T. (2018). Plant and floret growth at distinct developmental stages during the stem elongation phase in wheat. *Frontiers in Plant Science*, 9, 330. doi: [10.3389/fpls.2018.00330](https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00330).
- Heidari, Y., & Moaveni, P. (2009). Study of drought stress on ABA accumulation & proline among in differen genotypes forage corn. *Research Journal of Biological Sciences*, 4(10), 1121-1124. doi: [10.36478/rjbsci.2009.1121.1124](https://doi.org/10.36478/rjbsci.2009.1121.1124).
- Hernández, I., Cela, J., Alegre, L., & Munné-Bosch, S. (2012). Antioxidant defenses against drought stress. In: Aroca, R. (Ed.). *Plant Responses to Drought stress*. Springer, Berlin, Heidelberg, Germany. pp. 231-258. doi: [10.1007/978-3-642-32653-0_9](https://doi.org/10.1007/978-3-642-32653-0_9).
- Hernandez-Ochoa, I. M., Gaiser, T., Hugging, H., & Ewert, F. (2023). Yield components and yield quality of old and modern wheat cultivars as affected by cultivar release date, N fertilization and environment in Germany. *Field Crops Research*, 302, 109094. doi: [10.1016/j.fcr.2023.109094](https://doi.org/10.1016/j.fcr.2023.109094).
- Hoshmand Amjadi, H., Siosemardeh, A., & Hosseinpanahi, A. (2019). Evaluation of yield and yield components of wheat varieties under supplemental irrigation levels. *Plant Production & Genetics*, 1(1), 23-32. [In Persian].
- Ihsan, M. Z., El-Nakhlawy, F. S., Ismail, S. M., Fahad, S., & Daur, I. (2016). Wheat phenological developmentmand growth studies as affected by drought and late season high temperature stress under arid environment. *Frontiers in Plant Science*, 7, 795. doi: [10.3389/fpls.2016.00795](https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00795).
- Javadi, A., Ghahremanzadeh, M., Sassi, M., Javanbakht, O., & Hayati, B. (2024). Impact of climate variables change on the yield of wheat and rice crops in Iran (application of stochastic model based on Monte Carlo simulation). *Computational Economics*, 63(3), 983-1000. doi: [10.1007/s10614-023-10389-0](https://doi.org/10.1007/s10614-023-10389-0).
- Jin, E. S., Yokthongwattana, K., Polle, J. E. W., & Melis A. (2003). Role of the reversible xanthophyll cycle in the photosystem II damage and repair cycle in *Dunaliella salina*. *Plant Physiology*, 132(1), 325-364. doi: [10.1104/pp.102.019620](https://doi.org/10.1104/pp.102.019620).
- Kafi, M., Jafaranjad, A., & Jami Al-Ahmadi, M. (2019). Wheat, ecology, physiology and yield estimation. Publications of Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. 478 p. [In Persian].
- Kamal, N. M., Gorafi, Y. S. A., Mega, R., & Tsujimoto, H. (2018). Physiological response of wheat to chemical desiccants used to simulate post-anthesis drought stress. *Agronomy*, 8(4), 44. doi: [10.3390/agronomy8040044](https://doi.org/10.3390/agronomy8040044).
- Kaplan, E. A., Keskin, Ş., Pehlivan, A., Şanal, T., Ünsal, C. F., Avcioğlu, R., & Sade, F. B. (2023). Yield and quality characteristics of durum wheat genotypes under rainfed conditions in central anatolia region. *Genetika*, 55(2), 759-773. doi: [10.2298/GENSR2302759E](https://doi.org/10.2298/GENSR2302759E).
- Karimi, M., & Jalini, M. (2019). Supplemental irrigation in cultivation of rainfed wheat. *Journal of Water & Sustainable Development*, 6(1), 29-34. [In Persian]. doi: [10.22067/jwsd.v6i1.77251](https://doi.org/10.22067/jwsd.v6i1.77251).
- Khosh-Khabar, H., Maleki, A., Mirzaei Heydari, M., & Babaei, F. (2022). The effect of drought stress on the performance and agrophysiological traits of bread wheat genotypes (*Triticum aestivum* L.) in irrigated and rainfed conditions. *Journal of Crop Ecophysiology*, 16(1), 61-80. [In Persian]. doi: [10.30495/JCEP.2022.1885605.1642](https://doi.org/10.30495/JCEP.2022.1885605.1642).
- Li, J., Zhang, Z., Liu, Y., Yao, C., Song, W., Xu, X., Zhang, M., Zhou, X., Gao, Y., Wang, Z., Sun, Z., & Zhang, Y. (2019). Effects of micro-sprinkling with different irrigation amount on grain yield and water use efficiency of winter wheat in the North China Plain. *Agricultural Water Management*, 224, 105736. doi: [10.1016/j.agwat.2019.105736](https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105736).
- Li, Q., Dong, B., Qiao, Y., Liu, M., & Zhang, J. (2010). Root growth, available soil water, and water-use efficiency of winter wheat under different irrigation regimes applied at different growth stages

- in North China. *Agricultural Water Management*, 97(10), 1676-1682. doi: [10.1016/j.agwat.2010.05.025](https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.05.025).
- Liang, X., Zhang, L., Natarajan, S. K., & Becker, D. F. (2013). Proline mechanisms of stress survival. *Antioxidants & Redox Signaling*, 19(9), 998-1011. doi: [10.1089/ars.2012.5074](https://doi.org/10.1089/ars.2012.5074).
- Lotfi, N., Vahdati, K., Hassani, D., Kholdebarin, B., & Amiri, R. (2010). Peroxidase, guaiacol peroxidase and ascorbate peroxidase activity accumulation in leaves and roots of walnut trees in response to drought stress. *Acta Horticulturae*, 861, 309-316. doi: [10.17660/ActaHortic.2010.861.42](https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2010.861.42).
- Maqbool, R., Sajjad, M., & Khaliq, I. (2010). Morphological diversity and traits association in bread wheat. *American-Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Sciences*, 8(2), 216-224.
- Maghsoudi, K., Emam, Y., Niazi, A., Pessarakli, M., & Arvin, M. J. (2018). P5CS expression level and proline accumulation in the sensitive and tolerant wheat cultivars under control and drought stress conditions in the presence/absence of silicon and salicylic acid. *Journal of Plant Interactions*, 13(1), 461-471. doi: [10.1080/17429145.2018.1506516](https://doi.org/10.1080/17429145.2018.1506516).
- Maleki, A., Babaei, F., Cheharsooghi Amin, H., Ahmadi, J., & Asadi Dizaji, A. (2008). The study of seed yield stability and drought tolerance indices of bread wheat genotypes under irrigated and non-irrigated conditions. *Research Journal of Biological Sciences*, 3(8), 841-844.
- Mika, A., & Luthje, S. (2003). Properties of guaiacol peroxidase activities isolated from corn root plasma membranes. *Plant Physiology*, 132(3), 1489-1498. doi: [10.1104/pp.103.020396](https://doi.org/10.1104/pp.103.020396).
- Miller, B. C., Hill, J. E., & Roberts, S. R. (1991). Plant population effects on growth and yield in water-seeded rice. *Agronomy Journal*, 83(2), 291-297. doi: [10.2134/agronj1991.00021962008300020006x](https://doi.org/10.2134/agronj1991.00021962008300020006x).
- Mirbahar, A. A., Markhand, G. S., Mahari, A. R., Abro, S. A., & Kanhar, N. A. (2009). Effect of water stress on yield and yield components of wheat (*Triticum aestivum* L.) varieties. *Pakistan Journal of Botany*, 41(3), 1303-1310.
- Nazeri Tahroudi, M., Khalili, K., & Ahmadi F. (2016). Spatial and regional analysis of precipitation trend over Iran in the last half of century. *Water & Soil*, 30(2), 643-654. [In Persian]. doi: [10.22067/jsw.v30i2.39130](https://doi.org/10.22067/jsw.v30i2.39130).
- Outoukarte, I., El-Keroumi, A., Dihazi, A., & Naamani, K. (2019). Use of morpho-physiological parameters and biochemical markers to select drought tolerant genotypes of durum wheat. *Journal of Plant Stress Physiology*, 5, 1-7. doi: [10.25081/jpsp.2019.v5.3700](https://doi.org/10.25081/jpsp.2019.v5.3700).
- Pandhair, V., & Sekhon, B. S. (2006). Reactive oxygen species and antioxidants in plants: an overview. *Journal of Plant Biochemistry & Biotechnology*, 15, 71-78. doi: [10.1007/BF03321907](https://doi.org/10.1007/BF03321907).
- Parveen, A., Arslan Ashraf, M., Hussain, I., Perveen, S., Rasheed, R., Mahmood, Q., & Alqarawi, A. A. (2021). Promotion of growth and physiological characteristics in water-stressed *Triticum aestivum* in relation to foliar-application of salicylic acid. *Water*, 13(9), 1316. doi: [10.3390/w13091316](https://doi.org/10.3390/w13091316).
- Pequeno, D. N. L. (2021). International Maize and Wheat Improvement Center (CIMMYT), Apdo. Postal 6-641, Mexico. <https://repository.cimmyt.org>.
- Qian, D., Wang, M., Niu, Y., Yang, Y., & Xiang, Y. (2025). Sexual reproduction in plants under high temperature and drought stress. *Cell Reports*, 44(3), 115390. doi: [10.1016/j.celrep.2025.115390](https://doi.org/10.1016/j.celrep.2025.115390).
- Radfar, M., Ramezanpour, S. S., Soltanloo, H., & Kianmehr, L. (2023). The effect of drought stress on enzymatic and molecular changes of some antioxidants in parental and mutant bread wheat genotype using RNAseq. data. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 16(3), 765-785. [In Persian]. doi: [10.22077/escs.2023.4970.2094](https://doi.org/10.22077/escs.2023.4970.2094).
- Rahimi, Y., Bihamta, M. R., Taleei, A., Alipour, H., & Ingvarsson, P. K. (2019). Applying an artificial neural network approach for drought tolerance screening among Iranian wheat landraces and cultivars grown under well-watered and rainfed conditions. *Acta Physiologiae Plantarum*, 41, 156-165. doi: [10.1007/s11738-019-2946-2](https://doi.org/10.1007/s11738-019-2946-2).
- Rajput, V. D., Harish Singh, R. K., Verma, K. K., Sharma, L., Quiroz-Figueroa, F. R., Meena, M., Gour, V. S., Minkina, T., Sushkova, S., & Mandzhieva, S. (2021). Recent developments in enzymatic antioxidant defence mechanism in plants with special reference to abiotic stress. *Biology (Basel)*, 10(4), 267. doi: [10.3390/biology10040267](https://doi.org/10.3390/biology10040267).
- Ramezanpour, M. R., Dastfal, M., & Malakouti, M. J. (2008). The effect of potassium in reducing drought stress in wheat in Darab region of Fars. *Journal of Soil Research*, 22(1), 127-135. [In Persian]. doi: [10.22092/jjsr.2008.126992](https://doi.org/10.22092/jjsr.2008.126992).

- Rawat, N., Singla-Pareek, S. L., & Pareek, A. (2021). Membrane dynamics during individual and combined abiotic stresses in plants and tools to study the same. *Physiologia Plantarum*, 171(4), 653-676. doi: [10.1111/ppl.13217](https://doi.org/10.1111/ppl.13217).
- Rezainia, M., Bihanta, M., Peighambari, S. A., & Abbasi, A. R. (2019). Effect of drought stress on antioxidant enzymes activities and some physiological traits in chickpea (*Cicer Arietinum* L.). *Journal of Crop Breeding*, 11(30), 11-22. [In Persian]. doi: [10.29252/jcb.11.30.11](https://doi.org/10.29252/jcb.11.30.11).
- Roustaii, M. (2015). Effect of supplementary irrigation on grain yield and some agronomic traits of bread wheat genotypes in Maragheh conditions of Iran. *Seed & Plant*, 31(1), 205-225. [In Persian]. doi: [10.22092/spij.2017.111254](https://doi.org/10.22092/spij.2017.111254).
- Sachdev, S., Ansari, S. A., Ansari, M. I., Fujita, M., & Hasanuzzaman, M. (2021). Abiotic stress and reactive oxygen species: Generation, signaling, and defense mechanisms. *Antioxidants (Basel)*, 10(2), 277. doi: [10.3390/antiox10020277](https://doi.org/10.3390/antiox10020277).
- Sairam, R., Deshmukh, S., & Saxena, C. (1998). Role of antioxidant systems in wheat genotypes tolerance to water stress. *Biologia Plantarum*, 41, 387-394. doi: [10.1023/A:1001898310321](https://doi.org/10.1023/A:1001898310321).
- Sairam, R. K., & Srivastava, G. C. (2002). Changes in antioxidant activity in sub-cellular fractions of tolerant and susceptible wheat genotypes in response to long term salt stress. *Plant Science*, 162(6), 897-904. doi: [10.1016/S0168-9452\(02\)00037-7](https://doi.org/10.1016/S0168-9452(02)00037-7).
- Sarker, U., & Oba, S. (2018). Catalase, superoxide dismutase and ascorbate-glutathione cycle enzymes confer drought tolerance of Amaranthus tricolor. *Scientific Reports*, 8(1), 16496. doi: [10.1038/s41598-018-34944-0](https://doi.org/10.1038/s41598-018-34944-0).
- Savin, R., Cossani, C. M., Dahan, R., Ayad, J. Y., Albrizio, R., Todorovic, M., Karrou, M., & Slafer, G. A. (2022). Intensifying cereal management in dryland Mediterranean agriculture: Rainfed wheat and barley responses to nitrogen fertilisation. *European Journal of Agronomy*, 137, 126518. doi: [10.1016/j.eja.2022.126518](https://doi.org/10.1016/j.eja.2022.126518).
- Sedghieh, V., Shekari, F., Abbasi, A., & Sabbaghnia, N. (2025). Evaluation of drought tolerance ability in wheat Genotypes through comprehensive stress indices. *Hayati Journal of Biosciences* 32(1), 117-131. doi: [10.4308/hjb.32.1.117-131](https://doi.org/10.4308/hjb.32.1.117-131).
- Sedghieh, V., Shekari, F., Roustaei, M., Abbasi, A., & Sabbaghnia, N. (2023). Assessment of assimilate remobilization and current photosynthesis of bread wheat genotypes in grain filling under rainfed and supplemental irrigated conditions. *Iranian Dryland Agronomy Journal*, 12(1), 127-147. [In Persian]. doi: [10.22092/idadj.2022.354714.337](https://doi.org/10.22092/idadj.2022.354714.337).
- Senapati, N., Stratonovitch, P., Paul, M. J., & Semenov, M. A. (2019). Drought tolerance during reproductive development is important for increasing wheat yield potential under climate change in Europe. *Journal of Experimental Botany*, 70(9), 2549-2560. doi: [10.1093/jxb/ery226](https://doi.org/10.1093/jxb/ery226).
- Simonovicova, A., Bartekova, J., Janovova, L., & Luptakova, A. (2010). Behaviour of Fe, Mg and Ca in acid mine drainage and experimental solutions in the presence of *Aspergillus niger* species isolated from various environment. *Nova Biotechnologica et Chimica*, 10(1), 23-32. doi: [10.36547/nbc.1116](https://doi.org/10.36547/nbc.1116).
- Simova-Stoilova, L., Vaseva, I., Grigorova, B., Demirevska, K., & Feller, U. (2010). Proteolytic activity and cysteine protease expression in wheat leaves under severe soil drought and recovery. *Plant Physiology & Biochemistry*, 48(2-3), 200-206. doi: [10.1016/j.plaphy.2009.11.003](https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2009.11.003).
- Stewart, R. R., & Bewley, J. D. (1980). Lipid peroxidation associated with accelerated aging of soybean axes. *Plant Physiology*, 65(2), 245-248. doi: [10.1104/pp.65.2.245](https://doi.org/10.1104/pp.65.2.245).
- Tigkas, D., & Tsakiris, G. (2015). Early estimation of drought impacts on rainfed wheat yield in Mediterranean climate. *Environmental Processes*, 2, 97-114. doi: [10.1007/s40710-014-0052-4](https://doi.org/10.1007/s40710-014-0052-4).
- Toscano, S., Farieri, E., Ferrante, A., & Romano, D. (2016) Physiological and biochemical responses in two ornamental shrubs to drought stress. *Frontiers in Plant Science*, 7, 645 doi: [10.3389/fpls.2016.00645](https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00645).
- Upadhyay, D., Budhlakoti, N., Singh, A. K., Bansal, R., Kumari, J., Chaudhary, N., Padaria, J. C., Sareen, S., & Kumar, S. (2020). Drought tolerance in *Triticum aestivum* L. genotypes associated with enhanced antioxidative protection and declined lipid peroxidation. *3 Biotechnology*, 10(6), 281. doi: [10.1007/s13205-020-02264-8](https://doi.org/10.1007/s13205-020-02264-8).
- Xu, Z., Lai, X., Ren, Y., Yang, H., Wang, H., Wang, C., Xia, J., Wang, Z., Yang, Z., Geng, H., & Shi, X. (2023). Impact of drought stress on yield-related agronomic traits of different genotypes in spring wheat. *Agronomy*, 13(12), 2968. doi: [10.3390/agronomy13122968](https://doi.org/10.3390/agronomy13122968).

- Yao, Yanrong, Lihua Lv, Lihua Zhang, Haipo Yao, Zhiqiang Dong, Jingting Zhang, Junjie Ji, Xiuling Jia, and Huijun Wang. (2019). Genetic gains in grain yield and physiological traits of winter wheat in Hebei Province of China, from 1964 to 2007. *Field Crops Research*, 239, 114-123. doi: [10.1016/j.fcr.2019.03.011](https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.03.011).
- Yoshimura, K., Yabuta, Y., Ishikawa, T., & Shigeoka, S. (2000). Expression of spinach ascorbate peroxidase isoenzymes in response to oxidative stresses. *Plant Physiology*, 123(1), 223-234. doi: [10.1104/pp.123.1.223](https://doi.org/10.1104/pp.123.1.223).
- Zadoks, J. C., Chang, T. T., & Konzak, C. F. (1974). A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed Research*, 14(6), 415-421. doi: [10.1111/j.1365-3180.1974.tb01084.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.1974.tb01084.x).
- Zafari, M., Ebadi, A., Jahanbakhsh, S., & Sedghi, M. (2020). Safflower (*Carthamus tinctorius*) biochemical properties, yield, and oil content affected by 24-epibrassinosteroid and genotype under drought stress. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 68(22), 6040-6047. doi: [10.1021/acs.jafc.9b06860](https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b06860).
- Zhan, H., Yue, H., Zhao, X., Wang, M., Song, W., & Nie, X. (2017). Genome-wide identification and analysis of MAPK and MAPKK gene families in bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *Genes*, 8(10), 284. doi: [10.3390/genes8100284](https://doi.org/10.3390/genes8100284).
- Zhang, H., Richards, R., Riffkin, P., Berger, J., Christy, B., O'Leary, G., Acuna, T. B., & Merry, A. (2019). Wheat grain number and yield: The relative importance of physiological traits and source-sink balance in southern Australia. *European Journal of Agronomy*, 110, 125935. doi: [10.1016/j.eja.2019.125935](https://doi.org/10.1016/j.eja.2019.125935).
- Zhang, Z., Li, J., Hu, N. Y., Li, W., Qin, W. L., Li, J. P., Gao, Y. M., Liu, Y., Sun, Z. C., & Yu, K. (2021). Spike growth affects spike fertility through the number of florets with green anthers before floret abortion in wheat. *Field Crops Research*, 260, 108007. doi: [10.1016/j.fcr.2020.108007](https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.108007).