University of Guilan
Faculty of Agricultural Sciences

Cereal Research
Vol. 15, No. 4, 2025 (351-367)
Home page: https://cr.guilan.ac.ir/
pISSN: 2252-0163 eISSN: 2538-6115

Responses of morphological, phenological and yield traits of bread wheat cultivars and early maturing near-isogenic lines to irrigation cut-off at reproductive growth stages

Mozhdeh Jalilifar[1], Afrasyab Rahnama[2]✉ and Roohollah Abdolshahi[3]

1. Ph.D. Student, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran; 2. Professor, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran; 3. Associate Professor, Department of Plant Production and Genetics, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.

✉ Corresponding Author: a.rahnama@scu.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received: 26 August 2025
Revised: 24 October 2025
Accepted: 19 November 2025
Available online: 22 December 2025

Keywords:
Days to flowering
Drought stress
Early maturity
Grain filling period

Abstract

Introduction: In arid and semi-arid regions, drought stress particularly during the reproductive and late-season stages, often accompanied by high temperatures substantially reduces wheat yield. The use of early-maturing cultivars with shortened growth cycles, which complete development prior to the onset of stress, represents an effective strategy to mitigate these adverse effects. This study aimed to investigate the effects of drought stress on morphological, phenological, and functional traits of early-maturing near-isogenic wheat lines subjected to irrigation cutt-off during reproductive growth.

Materials and Methods: The experiment was carried out in split-plot based on a randomized complete block design with three replications at the research field of Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Khuzestan province, Iran, in 2024-2025 growing season. Irrigation treatments at three levels, including full irrigation (control), irrigation cut-off from the beginning of flowering to early dough stage (code 61-83 in BBCH scale) and irrigation cut-off from early dough stage to full grain maturity (code 83-92 in BBCH scale) was considered as main factor, and five bread wheat cultivars and near-isogenic lines as sub-factor. The measured traits included phenological and morphological traits, yield components, biological yield and harvest index. To group the studied genotypes and traits, cluster analysis method was used and the respective dendrogram was drawn as a heat map using R-studio ver. 2023 software. Data analysis of variance was conducted using SAS ver. 9.1 software and comparison of means was performed using Duncan's multiple range test.

Results and Discussion: The results of this study indicated that irrigation cut-off at different growth stages significantly reduced the number and weight of grains per spike, 1000-grain weight, and days to maturity, ultimately leading to decreased grain yield across all cultivars and near-isogenic lines. However, greater reductions were obsberved in the cultivars compared with their corresponding near-isogenic lines. Under irrigation cut-off applied at the flowering stage, the grain yield of Roshan and it's near-isogenic line, Mahdavi and it's near-isogenic line, and Mehregan decreased by 33%, 38%, 29%, 29% and 20%, respectively, and under irrigation cut-off at the grain-filling stage decreased by 12%, 15%, 15%, 15% and 8%, respectively, compared with full irrigation treatment. Across all irrigation cut-off treatments, the number of days from seed sowing to maturity in near-isogenic lines of Roshan and Mahdavi was 10 to 15 days fewer than their parental cultivars. This earliness likely contributed to reduced exposure to drought stress during critical reproductive stages, enhancing yield stability.

Conclusion: Overall, the findings of this study showed that the the near-isogenic lines outperformed their parent cultivars in terms of yield and other agronomic traits. The near-isogenic line of Mahdavi, by employing an earliness strategy and shortening the time to flowering and maturity, achieved the highest grain yield under both full irrigation and cut-off irrigation treatments. Therefore, similar to the Mehregan cultivar, it is recommended for cultivation under mild water stress conditions in the Khuzestan region.

Cite this article: Jalilifar, M., Rahnama, A., & Abdolshahi, R. (2025). Responses of morphological, phenological and yield traits of bread wheat cultivars and early maturing near-isogenic lines to irrigation cut-off at reproductive growth stages. *Cereal Research*, *15*(4), 351-367. doi: 10.22124/CR.2025.31509.1878.

© The Author(s) retain the copyright.
DOI: https://doi.org/10.22124/CR.2025.31509.1878. **Punlisher:** University of Guilan

تحقیقات غلات
دوره پانزدهم، شماره چهارم، ۱۴۰۴ (۳۶۷-۳۵۱)
Home page: https://cr.guilan.ac.ir/
شاپا چاپی: ۰۱۶۳-۲۲۵۲ شاپا الکترونیکی: ۶۱۱۵-۲۵۳۸

بررسی واکنش صفات مورفولوژیک، فنولوژیک و عملکردی رقم‌ها و لاین‌های ایزوژن نزدیک زودرس گندم نان به قطع آبیاری در مراحل رشد زایشی

مژده جلیلی‌فر[۱]، افراسیاب راهنما[۲]✉ و روح‌اله عبدالشاهی[۳]

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران؛ ۲- استاد، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران؛ ۳- دانشیار، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران.

✉ نویسنده مسئول: a.rahnama@scu.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۰۴
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۸/۰۲
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۲۸
انتشار آنلاین: ۱۴۰۴/۱۰/۰۱

واژه‌های کلیدی:
تنش خشکی
دورهٔ پرشدن دانه
روز تا گلدهی
زودرسی

چکیده

مقدمه: در مناطق خشک و نیمه‌خشک، تنش خشکی به‌ویژه در مراحل رشد زایشی و انتهای فصل، با دمای بالا همراه است. استفاده از رقم‌های زودرس با چرخهٔ رشد کوتاه‌تر که قادر باشند قبل از مواجهه با تنش‌های خشکی و دمای بالا، دوره رشد خود را کامل کنند، یکی از راه‌کارهای مؤثر برای کاهش اثرات نامطلوب این تنش‌ها است. هدف از اجرای این آزمایش، بررسی واکنش صفات مورفولوژیک، فنولوژیک و عملکردی لاین‌های ایزوژن نزدیک زودرس گندم به تنش خشکی ناشی از قطع آبیاری در مراحل رشد زایشی بود.

مواد و روش‌ها: این آزمایش به‌صورت مزرعه‌ای در قالب کرت‌های خردشده بر مبنای طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در سال زراعی ۱۴۰۴- ۱۴۰۳ در دانشگاه شهید چمران اهواز (خوزستان) اجرا شد. آبیاری در سه سطح، شامل آبیاری کامل (شاهد) و قطع آبیاری از مرحلهٔ شروع گلدهی تا اوایل خمیری‌شدن و از اوایل خمیری‌شدن تا رسیدگی کامل دانه (به‌ترتیب مراحل ۸۳-۶۱ و ۹۲-۸۳ در مقیاس BBCH) به‌عنوان عامل اصلی و پنج رقم و لاین ایزوژن نزدیک گندم نان به‌عنوان عامل فرعی در نظر گرفته شد و صفات فنولوژیک، مورفولوژیک، اجزای عملکرد، عملکرد زیست‌توده و شاخص برداشت اندازه‌گیری شدند. برای گروه‌بندی ژنوتیپ‌ها و صفات مورد مطالعه، از تجزیه خوشه استفاده و دندروگرام مربوطه به‌صورت نقشه حرارتی با استفاده از نرم‌افزار R-studio ver. 2023 رسم شد. تجزیه واریانس داده‌ها نیز با استفاده از نرم‌افزار SAS نسخهٔ ۹/۱ و مقایسه میانگین‌ها با آزمون دانکن انجام شد.

نتایج و بحث: نتایج این پژوهش نشان داد که قطع آبیاری در مراحل رشد زایشی، از طریق کاهش معنی‌دار تعداد و وزن دانه در سنبله، وزن هزار دانه و روز تا رسیدگی، سبب کاهش عملکرد دانه در تمامی رقم‌ها و لاین‌های ایزوژن شد، اما مقدار کاهش در رقم‌ها بیش‌تر از لاین‌های ایزوژن مربوطه بود. در تیمار قطع آبیاری در مرحلهٔ گلدهی، عملکرد دانه در رقم و لاین ایزوژن روشن، رقم و لاین ایزوژن مهدوی و رقم مهرگان به‌ترتیب ۳۳، ۳۸، ۲۹، ۲۹ و ۲۰ درصد و در تیمار قطع آبیاری در مرحلهٔ پرشدن دانه به‌ترتیب ۱۲، ۱۵، ۱۵، ۱۵ و ۸ درصد در مقایسه با آبیاری کامل کاهش یافت. در تمامی تیمارهای قطع آبیاری، تعداد روز از کاشت تا رسیدگی در لاین‌های ایزوژن روشن و مهدوی ۱۰ تا ۱۵ روز کم‌تر از رقم‌های مادری آن‌ها بود. زودرسی این لاین‌های ایزوژن به‌عنوان یکی از عوامل مؤثر در کاهش آثار تنش خشکی در مراحل حساس گلدهی و پر شدن دانه و پایداری و حفظ عملکرد بالاتر آن‌ها بود.

نتیجه‌گیری: به‌طورکلی، نتایج این پژوهش نشان داد که لاین‌های ایزوژن مورد بررسی از نظر عملکرد و سایر صفات زراعی نسبت به رقم‌های مادری خود برتری داشتند. لاین ایزوژن مهدوی با بهره‌گیری از راهبرد زودرسی و کاهش تعداد روز تا رسیدگی در تمامی تیمارهای قطع آبیاری، بیش‌ترین عملکرد دانه را تولید کرد و همانند رقم مهرگان برای کشت در شرایط تنش کم‌آبی در منطقهٔ خوزستان توصیه می‌شود.

نحوه استناد به این مقاله: جلیلی‌فر، مژده، راهنما، افراسیاب، و عبدالشاهی، روح‌اله. (۱۴۰۴). بررسی واکنش صفات مورفولوژیک، فنولوژیک و عملکردی رقم‌ها و لاین‌های ایزوژن نزدیک زودرس گندم نان به قطع آبیاری در مراحل رشد زایشی. *تحقیقات غلات*، ۱۵(۴)، ۳۶۷-۳۵۱.
doi: 10.22124/CR.2025.31509.1878

ناشر: دانشگاه گیلان

© حق چاپ برای نویسنده(گان) محفوظ است.

مقدمه

گندم، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین گیاهان زراعی، به‌طور گسترده در سراسر جهان کشت می‌شود و نقش حیاتی در تأمین امنیت غذایی مردم دنیا دارد. با این‌حال، تولید آن اغلب توسط تنش خشکی به‌ویژه در مراحل حساس رشد، مانند گرده‌افشانی و پرشدن دانه، با چالش مواجه می‌شود (Gupta *et al*., 2020). رویدادهای مهم اقلیمی مؤثر بر امنیت غذایی جهان، نظیر گرما و خشکی، با توجه به مکان و زمان متفاوت هستند، اما غالب‌ترین آن‌ها تنش خشکی است (Harrison, 2021; Rahnama *et al*., 2024b).

رشد و نمو گیاهان عمدتاً تحت تأثیر انواع مختلف تنش‌های غیرزیستی مانند دمای بالا، خشکی و شوری قرار می‌گیرد (Salehi *et al*., 2023; Rahnama *et al*., 2024a). تنش کمبود آب، یکی از مهم‌ترین عوامل محدود کنندهٔ رشد و عملکرد گندم در بسیاری از مناطق کشت آن، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک که در انتهای فصل رشد در معرض تنش خشکی قرار دارند، محسوب می‌شود (Mahfuz Bazzaz *et al*., 2019). کاهش جذب آب ناشی از تنش خشکی باعث ایجاد تنش اسمزی می‌شود و در نتیجه گیاه در معرض کم‌آبی سلولی قرار می‌گیرد (Xiong & Zhu., 2002). تنش خشکی در مرحلهٔ رشد زایشی عمدتاً به‌دلیل کاهش سرعت فتوسنتز، عقیمی دانهٔ گرده، کاهش رشد دانه و تجمع مادهٔ خشک سبب کاهش ظرفیت مقصد فتوسنتزی و در نهایت کاهش قابل توجه عملکرد دانهٔ گندم می‌شود (Barnabás *et al*., 2008; Araus *et al*., 2008).

یکی از اهداف به‌نژادی، انطباق فنولوژی گیاه با شرایط محیطی مورد نظر است، به‌طوری‌که علاوه بر رشد رویشی مناسب، گلدهی و رشد دانه در شرایط بهینه رخ دهد. بر همین اساس، انطباق رسیدگی گندم با فصل رشد را می‌توان با طراحی ژن‌های مرتبط با گلدهی و رسیدگی به‌دست آورد (Hill & Li, 2022). در بسیاری از مناطق مدیترانه‌ای، زودرسی غلات معتدله، صفتی مطلوب و یکی از مؤثرترین سازوکارهای فرار از خشکی است، زیرا از مواجههٔ گیاه با تنش‌های محیطی مانند گرما و خشکی در انتهای فصل رشد جلوگیری می‌کند (Hill & Li, 2022; Kianpour *et al*., 2024). به‌عبارت دیگر، زودرسی یک ویژگی انطباقی مهم برای تولید گندم در شرایط تنش خشکی انتهای فصل است، زیرا گیاه می‌تواند با کوتاه کردن چرخهٔ رشد، مواجهه مراحل گلدهی و پر شدن دانه با کمبود آب را طی دورهٔ خشکی به‌حداقل برساند (Blum, 2011; Dorrani-Nejad *et al*., 2022). اصلاح و معرفی رقم‌های زودرس گندم نان با توان بالای عملکرد یکی از مهم‌ترین اهداف به‌نژادگران گندم است (Rousset *et al*., 2011; Hill & Li, 2022). گنجاندن زودرسی در برنامه‌های به‌نژادی و کاهش تعداد روز تا گلدهی و رسیدگی، موجب فرار از خشکی آخر فصل می‌شود و عملکرد دانه را در حفظ می‌کند (Reynolds *et al*., 2009; Slafer *et al*., 2014)، زیرا گیاه فرصت کم‌تری برای مواجهه با تنش شدید دارد. با این‌حال، این راهبرد برای همهٔ اقلیم‌ها و شرایط محیطی قابل تعمیم نیست و اثر آن به شرایط اقلیمی، شدت تنش و سایر مدیریت‌های زراعی بستگی دارد. به‌عبارت دیگر، گل‌دهی دیرهنگام به‌دلیل مواجهه با تنش‌های گرما و خشکی، باعث کاهش عملکرد دانه می‌شود (Hyles *et al*., 2020). گزارش شده است که دورهٔ رشد رویشی کوتاه‌تر و سنبله‌دهی زودهنگام برای تولید گندم در شرایط تنش خشکی آخر فصل، به‌دلیل کاهش احتمال مواجهه با خشکی طی مراحل گل‌دهی و پر شدن دانه بسیار مهم است (Dorrani-Nejad *et al*., 2022).

لاین‌های ایزوژن نزدیک (NILs; Near isogenic lines)، که در جایگاه‌های ژنی هدف متفاوت هستند و در عین حال پیشینهٔ ژنتیکی مشترکی دارند، برای تشریح اساس ژنتیکی صفات پیچیده مانند فنولوژی و تحمل به خشکی ارزش‌مند هستند (Perez-Rial *et al*., 2024). ارزیابی لاین‌های ایزوژن همراه با رقم‌های مربوطه تحت تنش خشکی در مراحل گرده‌افشانی تا رسیدگی، می‌تواند اطلاعات مفیدی در مورد واکنش‌های مورفوفنولوژیک و عملکردی مرتبط با زودرسی و انطباق با خشکی ارائه دهد (Banyai *et al*., 2017). با وجود انجام مطالعات اخیر در زمینهٔ زودرسی گندم تحت تنش خشکی آخر فصل (Dorrani-Nejad *et al*., 2022)، تا کنون به‌طور دقیق تأثیر زودرسی لاین‌های ایزوژن گندم بر فنولوژی و عملکرد در شرایط تنش خشکی در مراحل زایشی به‌ویژه در کشت‌های پاییزه و زمستانه در منطقهٔ خوزستان (که دوران گلدهی و پرشدن دانه با تنش خشکی و گرمای آخر فصل مواجه می‌شود)، مورد بررسی قرار نگرفته است. بر این اساس، هدف از مطالعه حاضر

ارزیابی اثرات تنش خشکی در دو مرحلهٔ مهم زایشی بر صفات مورفولوژیک، فنولوژیک و عملکردی رقم‌ها و لاین‌های ایزوژن نزدیک گندم نان، با تمرکز بر صفات زودرسی در لاین‌های ایزوژن بود.

مواد و روش‌ها

به‌منظور بررسی واکنش صفات مورفولوژیک، فنولوژیک و عملکردی لاین‌های ایزوژن نزدیک زودرس رقم‌های گندم نان نسبت به تنش خشکی ناشی از قطع آبیاری در مراحل رشد زایشی، آزمایشی مزرعه‌ای به‌صورت کرت‌های خردشده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در دانشگاه شهید چمران اهواز در سال زراعی ۱۴۰۴- ۱۴۰۳ اجرا شد. مکان آزمایش در جنوب غربی شهرستان اهواز، در حاشیه غربی رود کارون، با موقعیت جغرافیایی ۳۱ درجه و ۲۰ دقیقه شمالی و ۴۸ درجه و ۴۱ دقیقه شرقی و ارتفاع ۲۰ متر از سطح دریا قرار دارد. اطلاعات هواشناسی محل اجرای آزمایش طی فصل رشد در جدول ۱ ارائه شده است.

قطع آبیاری در سه سطح شامل شاهد (بدون قطع آبیاری)، قطع آبیاری از مرحلهٔ شروع گلدهی (مرحلهٔ ۶۱ بر اساس مقیاس BBCH) تا اوایل خمیری شدن (مرحلهٔ ۸۳ بر اساس مقیاس BBCH)، و قطع آبیاری از اوایل خمیری‌شدن تا رسیدگی کامل دانه (مرحلهٔ ۹۲ بر اساس مقیاس BBCH) در کرت‌های اصلی و پنج رقم و لاین ایزوژن نزدیک زودرس گندم نان شامل روشن، مهدوی، لاین ایزوژن روشن، لاین ایزوژن مهدوی و رقم مهرگان (به‌عنوان شاهد منطقه) در کرت‌های فرعی قرار گرفتند. رقم روشن نسبتاً دیررس با تیپ رشدی بهاره، رقم مهدوی نسبتاً دیررس با تیپ رشدی بهاره بینابین، و رقم مهرگان نسبتاً زودرس با تیپ رشدی بهاره هستند. لاین‌های ایزوژن، حاصل تلاقی این رقم‌ها با رقم Excalibur و پنج تلاقی برگشتی با والد تکراری هستند که در برنامه‌های به‌نژادی بک‌کراس در دانشگاه شهید باهنر کرمان طی سال‌های ۱۳۹۱ تا ۱۳۹۷ تهیه شدند. Excalibur یک رقم استرالیایی زودرس و متحمل به خشکی و زنگ زرد است که به‌عنوان والد اهداکننده در تمامی تلاقی‌ها به‌منظور انتقال صفات زودرسی استفاده شده است. پس از سه بار تلاقی برگشتی، اولین و جدیدترین ژنوتیپ‌های هر جمعیت BC3F2 به‌عنوان لاین‌های ایزوژن نزدیک در سال ۱۳۹۷ انتخاب شدند (Dorrani-Nejad *et al*., 2022).

جدول ۱- اطلاعات هواشناسی مکان اجرای آزمایش طی سال زراعی ۴۰۴- ۱۴۰۳

Table 1. Meteorological information of the experimental site during the 2024-2025 growing season

Month	November 2024	December 2024	January 2025	February 2025	March 2025	April 2025	May 2025
Maximum temperature ($^{\circ}$C)	25.8	20.5	20.1	19.9	26.7	35.2	42.5
Minimum temperature (^{0}C)	12.0	5.9	6.5	6.4	12.1	19.3	22.4
Mean daily temperature (^{0}C)	18.9	13.2	13.3	13.7	19.4	27.2	32.5
Total rainfall (mm)	10.6	3.2	13.7	5.4	13	4	1.5

کاشت در تاریخ پنجم آذرماه انجام شد. بذرهای گندم پس از ضدعفونی با قارچ‌کش تیرام با غلظت دو در هزار، در هر کرت روی شش ردیف سه متری با فاصله خطوط ۳۰ سانتی‌متر و تراکم ۴۰۰ بوته در متر مربع در عمق دو تا سه سانتی‌متری کشت شدند. به‌منظور جلوگیری از نشت آب بین تیمارها، فاصله بین دو کرت اصلی و همچنین فاصله بین تکرارها دو متر در نظر گرفته شد. از زمان کاشت تا شروع گلدهی، آبیاری به‌طور منظم به‌منظور تأمین کامل نیاز آبی گیاه انجام شد. با توجه به تفاوت در زمان ظهور مراحل رشدی رقم‌ها و لاین‌های ایزوژن، قطع آبیاری با در نظر گرفتن مرحلهٔ رشدی مربوط به هر رقم و لاین انجام شد. درصد رطوبت حجمی خاک برای تمامی تیمارهای تنش قبل از شروع هر آبیاری با استفاده از دستگاه رطوبت‌سنج TDR (ProCheck, Decagon Devices, USA) اندازه‌گیری شد. تیمار آبیاری مطلوب زمانی اعمال شد که رطوبت موجود در خاک در ناحیه ریشه معادل ۸۰ درصد آب قابل استفاده در خاک بود.

پیش از شروع آزمایش، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه با نمونه‌برداری از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری خاک تعیین شد. نیازهای کودی خاک بر اساس نتایج آزمون خاک و مقادیر بحرانی عناصر غذایی نیتروژن، فسفر و پتاسیم مشخص و کودهای لازم به خاک اضافه شدند. طبق نتایج

آزمون خاک (جدول ۲)، مقدار ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار فسفر از منبع سوپرفسفات تریپل و ۸۰ کیلوگرم پتاسیم از منبع سولفات پتاسیم همزمان با کشت به‌عنوان کود پایه به خاک افزوده شد. همچنین ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن خالص از منبع اوره به صورت تقسیط در دو مرحله، یکی همزمان با کاشت و دیگری به‌صورت سرک در مراحل ساقه‌دهی و اوایل گل‌دهی مصرف شد. کنترل علف‌های هرز در طول فصل رشد با توجه به تراکم و نوع گونه‌های غالب (باریک‌برگ و پهن‌برگ) به‌کمک سموم آتلانتیس و توفوردی و همچنین وجین دستی انجام گرفت. به استثنای اعمال تنش خشکی، کلیه عملیات کاشت، داشت و برداشت در هر دو شرایط تنش و بدون تنش به‌طور یکسان اجرا شد.

جدول ۲- ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک مزراعه آزمایشی در عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متر

Table 2. Physico-chemical properties of experimental field soil at 0-30 cm depth

Textural	pH	Electrical conductivity	Available potassium	Available phosphorus	Total nitrogen	Organic carbon	Field capacity	Permanent wilting point
		$dS.m^{-1}$	$mg.kg^{-1}$		%			
Sandy loam	7.45	3.50	231	11.32	0. 098	0.43	32	13

صفات فنولوژیک شامل تعداد روز از کاشت تا سنبله‌دهی و رسیدگی کامل اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری صفات مورفولوژیک شامل ارتفاع بوته، طول پدانکل و اجزای عملکرد (وزن سنبله، وزن هزار دانه، تعداد دانه و وزن دانه در سنبلهٔ اصلی)، تعداد ۱۰ بوته تصادفی از هر واحد آزمایشی، در زمان رسیدگی کامل برداشت شد. به‌منظور اندازه گیری عملکرد دانه، عملکرد زیست‌توده و شاخص برداشت، پس از رسیدگی کامل دانه‌ها در پایان فصل رشد (کد ۹۵ مقیاس زیداکس)، چهار ردیف میانی از هر کرت پس از حذف حاشیه به‌عنوان خطوط نمونه‌برداری در نظر گرفته شدند. برداشت از سطحی معادل یک متر مربع از هر کرت انجام شد. عملیات برداشت با توجه به تفاوت در زمان رسیدگی رقم‌ها و لاین‌های ایزوژن، در بازهٔ زمانی ۲۰ تا ۳۰ فروردین‌ماه صورت گرفت.

محاسبات آماری

تجزیه واریانس داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS نسخهٔ ۹/۱ انجام شد و مقایسه میانگین‌ها با آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد صورت گرفت. تجزیهٔ هیت مپ و نقشه و دندروگرام مربوط با آن با استفاده از نرم افزار R-studio version 2023 انجام شد.

نتایج و بحث

تعداد دانه در سنبلهٔ اصلی

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که بین تیمارهای قطع آبیاری و ژنوتیپ‌ها (رقم‌ها و لاین‌های ایزوژن)، از نظر تعداد دانه در سنبلهٔ اصلی تفاوت معنی‌داری وجود داشت (جدول ۳). بیش‌ترین تعداد دانه در سنبلهٔ اصلی (۴۴/۷۳ عدد) در تیمار آبیاری کامل و کم‌ترین آن (۳۶/۰۷ عدد) در تیمار قطع آبیاری در مرحلهٔ گلدهی مشاهده شد. همچنین، قطع آبیاری در مرحلهٔ پر شدن دانه تفاوت معنی‌داری با آبیاری کامل نداشت (جدول ۴). این یافته‌ها همسو با پژوهش‌های پیشین، تأکید می‌کند که تنش خشکی انتهای فصل بیش‌تر بر تعداد دانه موثر است تا اندازهٔ آن و در حقیقت کاهش تعداد دانه علت اصلی کاهش عملکرد در شرایط کم‌آبی است (Dolferus *et al*., 2011; Safhi & Thabet, 2025). تعداد دانه در سنبله در محدودهٔ نسبتاً وسیعی از زمان شروع سنبلچه انتهایی تا زمان باروری تخمک‌ها تعیین می‌شود. کاهش تعداد دانه عمدتاً به عقیمی دانه گرده در اثر خشکی طی مرحلهٔ میکروسپور جوان و اختلال در لقاح تخمک نسبت داده می‌شود (Saini & Westgate, 2000; Ji *et al*., 2011). پلات و همکاران (Plaut et al., 2004) گزارش کردند که تنش خشکی پس از گلدهی تأثیر معنی‌داری بر تعداد دانه نداشت، اما با کاهش سرعت و مدت پرشدن دانه، وزن خشک دانه را کاهش داد.

نتایج این مطالعه نشان داد که لاین‌های ایزوژن به‌دلیل زودرسی و انطباق فنولوژیک با شرایط محیطی، با کاهش طول دورهٔ رشد تا گلدهی و رسیدگی و فرار از مواجهه شدن با خشکی، پایداری تعداد دانه بیش‌تری نسبت به رقم‌ها نشان دادند (جدول ۴). ایزولاین مهدوی با ۵۲/۲۲ دانه در سنبله، بیش‌ترین تعداد دانه را داشت و از ثبات بیش‌تری برخوردار

بود، در حالی‌که رقم روشن و ایزولاین آن، به‌مراتب تعداد دانه کم‌تری نسبت به سایر رقم‌ها و لاین‌ها نشان دادند. بر این اساس، ایزولاین مهدوی دارای بیش‌ترین تعداد دانه و ثبات عملکرد بود که نشان‌دهندهٔ سازگاری و تحمل بالاتر آن در برابر تنش‌های ناشی از قطع آبیاری است. این نتایج با یافته‌های سایر محققان نیز همخوانی داشت، به‌طوری‌که بانیای و همکاران (Banyai *et al*., 2017) گزارش کردند که ایزولاین‌های گندم دوروم تحت رژیم‌های مختلف آبی، دارای تعداد دانه در سنبله بیش‌تری نسبت به رقم‌ها بودند و عملکرد بهتری داشتند. همچنین، رقم مهرگان، تعداد دانه در سنبلهٔ اصلی یکسانی با ایزولاین مهدوی داشت (جدول ۴). ارتباط مستقیم تعداد دانه در سنبلهٔ اصلی با عملکرد دانه در این ژنوتیپ‌ها بیانگر اهمیت این صفت به‌عنوان شاخصی مؤثر در انتخاب و بهبود ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی است. بنابراین، استفاده از ژنوتیپ‌های متحمل مانند مهدوی همراه با مدیریت مناسب آبیاری، به‌ویژه در مرحلهٔ گلدهی، می‌تواند به بهبود عملکرد و کاهش اثرات منفی تنش آبی کمک کند. همبستگی مثبت و معنی‌دار تعداد دانه در سنبلهٔ اصلی و عملکرد دانه ($r = 0.7^{**}$) نیز نشان می‌دهد که این صفت یکی از اجزای اصلی تعیین‌کنندهٔ عملکرد است. بنابراین، آبیاری مناسب و استفاده از لاین‌های زودرس سازگار با منطقه می‌تواند به پایداری عملکرد کمک کند. نتایج پژوهش‌های قبلی نیز تأکید کرده‌اند که بهبود عملکرد دانه گندم از طریق افزایش تعداد دانه بهتر از افزایش وزن دانه است (Sadras, 2007; Dolferus *et al*., 2011).

وزن دانه در سنبلهٔ اصلی

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که تفاوت معنی‌داری بین تیمارهای قطع آبیاری و همچنین رقم‌ها و لاین‌های ایزوژن از نظر وزن دانه در سنبلهٔ اصلی وجود داشت (جدول ۳). بیش‌ترین و کم‌ترین میانگین وزن دانه به‌ترتیب مربوط به تیمار آبیاری کامل (۱/۸۲۱ گرم) و قطع آبیاری در مرحلهٔ پر شدن دانه (۱/۴۸۸ گرم) بود. جالب توجه آن‌که در تیمار قطع آبیاری در مرحلهٔ گلدهی، کاهش معنی‌داری در وزن دانه نسبت به آبیاری کامل مشاهده نشد (جدول ۴). این نتیجه بیانگر حساسیت مرحلهٔ پر شدن دانه به تنش رطوبتی است که با یافته‌های پژوهش‌های قبلی هم‌راستا بود (Blum, 2011; Fischer, 2011). این یافته نشان می‌دهد که اعمال تنش آبی در مرحله گلدهی، به‌ویژه اگر با رطوبت نسبی بالای خاک و دمای مناسب همراه باشد، لزوماً موجب کاهش معنی‌دار وزن دانه‌ها نمی‌شود. پر شدن دانه شامل فرآیندی از بیوسنتز و تجمع نشاسته است. چهار آنزیم مهم، شامل آدنوزین دی فسفات- گلوکز- پیروفسفریلاز، ساکارز سنتاز، آنزیم انشعاب‌ساز نشاسته و نشاسته سنتاز نقش مهمی طی دوره پر شدن دانه ایفا می‌کنند (Hurkman *et al*., 2003). کاهش فعالیت نشاسته سنتاز مسئول کاهش سرعت رشد دانه در شرایط تنش خشکی است، در حالی‌که غیرفعال شدن آدنوزین دی فسفات- گلوکز- پیروفسفریلاز ممکن است باعث توقف رشد شود (Ahmadi & Baker, 2001).

تنش خشکی طی دورهٔ پر شدن دانه ممکن است سرعت پر شدن دانه را تسریع کند. این افزایش سرعت پر شدن دانه عمدتاً به افزایش فعالیت مخزن از طریق تنظیم آنزیم‌های کلیدی دخیل در تبدیل ساکارز به نشاسته، به‌ویژه ساکارز سنتاز، نشاسته سنتاز محلول و آنزیم انشعاب‌ساز نشاسته نسبت داده می‌شود (Yang *et al*., 2004). از دیدگاه فیزیولوژیک، تغییر وزن دانه بستگی به تعداد سلول‌های آندوسپرم، انتقال مواد فتوسنتزی و مدت و سرعت پر شدن دانه دارد. در مقایسه ژنوتیپ‌ها نیز ایزولاین مهدوی در هر دو تیمار قطع آبیاری، کم‌ترین کاهش وزن دانه و بیش‌ترین ثبات عملکرد را داشت، در حالی‌که رقم روشن و ایزولاین آن بیش‌ترین کاهش وزن دانه را نشان دادند. این تفاوت‌ها نشان‌دهندهٔ پتانسیل ژنتیکی متفاوت ژنوتیپ‌ها در تحمل تنش آبی است و انتخاب ژنوتیپ‌های پایدار مانند ایزولاین مهدوی می‌تواند به افزایش تاب‌آوری گندم کمک کند. همبستگی معنی‌دار و مثبت قوی بین وزن دانه و تعداد دانه در سنبلهٔ اصلی ($r = 0.78^{**}$) بیانگر آن است که کاهش وزن دانه در سنبله اصلی عمدتاً تحت تأثیر کاهش تعداد دانه در سنبله بوده است و عواملی که منجر به کاهش تعداد دانه شده‌اند، به‌طور مستقیم بر کاهش وزن نهایی دانه‌ها نیز تأثیر گذاشته‌اند. یافته‌های مشابهی در پژوهش‌های پیشین نیز گزارش شده است.

جدول ۳- تجزیه واریانس صفات مورفوفنولوژیک و عملکردی رقم‌ها و لاین‌های ایزوژن نزدیک زودرس گندم تحت تأثیرتیمارهای قطع أبیاری

Table 3. Analysis of variance of morpho-phenological and yield related traits of wheat cultivars and early maturing near-isogenic lines under irrigation cut-off treatments

Source of variation	df	Mean square											
		GY	GNS	GWS	SW	TGW	BY	HI	PH	PL	DH	DM	GFP
Block	2	328901**	190**	0.054 ^{ns}	0.050 ^{ns}	43.9**	5473745*	26.4 ^{ns}	253**	132**	1.75 ^{ns}	2.95*	0.28 ^{ns}
Irrigation (A)	2	3939200**	262**	0.486**	0.208**	48.1**	14697705**	78.2*	383**	40.9**	0.822 ^{ns}	41.3**	55.7**
Erorr (a)	4	15035	8.82	0.003	0.003	4.23	731091	26.7	27.43	4.78	1.68	0.88	4.28
Lines and cultivars (B)	4	1295954**	704**	2.05**	1.29**	366**	27330622**	471**	2110**	825**	859**	639**	26.9**
A× B	8	31880*	1.29 ^{ns}	0.013 ^{ns}	0.001 ^{ns}	3.21 ^{ns}	119755 ^{ns}	8.52 ^{ns}	29.9**	1.31 ^{ns}	0.572 ^{ns}	2.63**	2.50 ^{ns}
Erorr (b)	24	14208	12.1	0.023	0.029	3.69	1068546	21.2	8.6	7.27	1.48	0.772	1.59
CV (%)	-	5.85	8.35	8.97	8.31	3.74	11.89	12.65	2.89	8.57	1.37	0.694	5.15

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

† GY, grain yield; GNS, grain number per spike; GWS, grain weight per spike; SW, spike weight; TGW, thousand grain weight; BY, biological yield; HI, harvest index; PH, plant height; PL, peduncle length; DH, days to heading; DM, days to maturity; GFP, grain filling period.

جدول ۴- مقایسه میانگین اجزای عملکرد رقم‌ها و لاین‌های ایزوژن نزدیک زودرس گندم تحت تیمارهای قطع آبیاری

Table 4. Comparison of means of yield components of wheat cultivars and early maturing near-isogenic lines under irrigation cut-off treatments

Treatment	GNS	GWS (g)	SW (g)	TGW (g)	BY (kg.ha^{-1})	HI (%)	PL (cm)	DH	GFP (day)
Irrigation cut-off treatments									
Full irrigation	44.73^{a}	1.821^{a}	2.17^{a}	52.8^{a}	9622^{a}	38.52^{a}	32.75a	88^{a}	26.2^{a}
Irrigation cut-off during flowering	36.07^{b}	1.773^{a}	1.94^{b}	51.6^{a}	7649^{b}	33.18^{b}	29.99^{b}	88^{a}	24.87^{b}
Irrigation cut-off during grain-filling	43.27^{a}	1.488^{b}	2.03^{ab}	49.3^{b}	8796^{ab}	36.67^{ab}	32.42^{a}	88^{a}	22.8^{c}
Near isogene lines and cultivars									
Roshan	33.67^{c}	1.124^{e}	1.70^{c}	54.36^{b}	6944^{b}	38.72^{b}	43.81^{a}	102^{a}	23.33^{b}
Near-isogenic line of Roshan	33.11^{c}	1.305^{d}	1.62^{c}	59.6^{a}	8099^{b}	33.93^{bc}	33.83^{b}	89^{b}	23.67^{b}
Mahdavi	39.67^{b}	1.758^{c}	2.45^{a}	48.81^{d}	10240^{a}	29.64^{c}	29.57^{c}	88^{b}	26^{a}
Near-isogenic line of Mahdavi	52.22^{a}	2.272^{a}	2.37^{a}	51.07^{c}	10818^{a}	31.79^{c}	32.84^{b}	75^{d}	26.67^{a}
Mehregan	49.45^{a}	2.01^{b}	2.11^{b}	42.46^{e}	7342^{b}	47.86^{a}	17.21^{d}	85^{c}	22.11^{c}

Means followed by samilar letters in each column and each experimental factor are not significantly different by Duncan's test at 5% probability level.

GNS, grain number per spike; GWS, grain weight per spike (g); SW, spike weight (g); TGW, thousand grain weight (g); BY, biological yield (kg.ha^{-1}); HI, harvest index (%); PL, peduncle length (cm); DH, days to heading; GFP, grain filling period (day).

جدول ۵- ضرایب همبستگی بین صفات فنولوژیک و عملکردی رقم‌ها و لاین‌های ایزوژن نزدیک زودرس گندم تحت تیمارهای قطع آبیاری

Table 5. Correlation coefficients between phenological and yield traits of wheat cultivars and early maturing near-isogenic lines under irrigation cut-off treatments

Traits	GY	GNS	GWS	TGW	SW	PH	BY	HI	PL	DH	DM	GFP
GY	1											
GNS	0.70**	1										
GWS	0.58**	0.78**	1									
TGW	-0.33*	-0.49**	-0.48**	1								
SW	0.55**	0.58**	0.70**	-0.55**	1							
PH	-0.76ns	-0.20ns	-0.31*	0.83**	-0.50**	1						
BY	0.46**	0.41**	0.53**	-0.07ns	0.76**	-0.03ns	1					
HI	0.31*	0.13ns	-0.046ns	-0.29ns	-0.30*	-0.13ns	-0.68**	1				
PL	-0.34*	-0.32*	-0.52**	0.65**	-0.31*	0.56**	-0.02ns	-0.32*	1			
DH	-0.50**	-0.66**	-0.81**	0.42**	-0.53**	0.10ns	-0.44**	0.04ns	0.63**	1		
DM	-0.041**	-0.63**	-0.77**	0.46**	-0.47**	0.13ns	-0.38**	0.04ns	0.62**	0.96**	1	
GFP	0.21 ns	0.10 ns	0.43**	0.11ns	0.51**	0.06ns	0.65**	-0.51*	0.1ns	-0.26ns	-0.13 ns	1

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

† GY, grain yield; GNS, grain number per spike; GWS, grain weight per spike; SW, spike weight; TGW, thousand grain weight; BY, biological yield; HI, harvest index; PH, plant height; PL, peduncle length; DH, days to heading; DM, days to maturity; GFP, grain filling period.

وزن سنبلهٔ اصلی

مطابق با یافته‌های این مطالعه، تفاوت معنی‌داری بین تیمارهای قطع آبیاری و رقم‌ها و لاین‌های ایزوژن از نظر وزن سنبله اصلی مشاهده شد، اما برهم‌کنش بین این دو عامل معنی‌دار نبود (جدول ۳). نتایج نشان داد که قطع آبیاری در مرحلهٔ پرشدن دانه تأثیر بیش‌تری بر وزن سنبلهٔ اصلی داشت، به‌طوری که تیمارهای قطع آبیاری در مراحل گلدهی و پر شدن دانه به‌ترتیب سبب کاهش شش و ۱۱ درصدی وزن سنبله نسبت به آبیاری کامل شد. مطابق با یافته‌های مطالعه حاضر، مطالعات پیشین نیز نشان دادند که مرحلهٔ پر شدن دانه از حساس‌ترین مراحل رشد نسبت به کمبود آب است و تنش خشکی در این مرحله می‌تواند به‌طور قابل توجهی وزن دانه و در نتیجه وزن سنبله را کاهش دهد (Blum, 2011; Farooq *et al*., 2014). همانند نتایج به‌دست آمده برای وزن دانه در سنبلهٔ اصلی، رقم و ایزولاین مهدوی بیش‌ترین (به‌ترتیب ۲/۴۵ و ۲/۳۷ گرم) و رقم و ایزولاین روشن کم‌ترین (به‌ترتیب ۱/۷۰ و ۱/۶۲ گرم) وزن سنبلهٔ اصلی را داشتند (جدول ۴).

همبستگی مثبت و معنی‌دار وزن سنبله با وزن دانه در سنبله ($r = 0.67^{**}$) و تعداد دانه در سنبله ($r = 0.57^{**}$) نشان‌دهنده تأثیر مستقیم وزن و تعداد دانه بر وزن کل سنبله است. در مطالعات پیشین نیز گزارش شده است که تنش خشکی در مراحل پر شدن دانه منجر به کاهش وزن دانه و تعداد دانه می‌شود که به‌صورت مستقیم بر وزن سنبله اثرگذار است (Saini & Westgate, 2000). با توجه به ضرایب همبستگی، کاهش بیش‌تر وزن سنبله در تیمار قطع آبیاری در مرحله پر شدن دانه را می‌توان ناشی از کاهش وزن دانه در سنبله دانست.

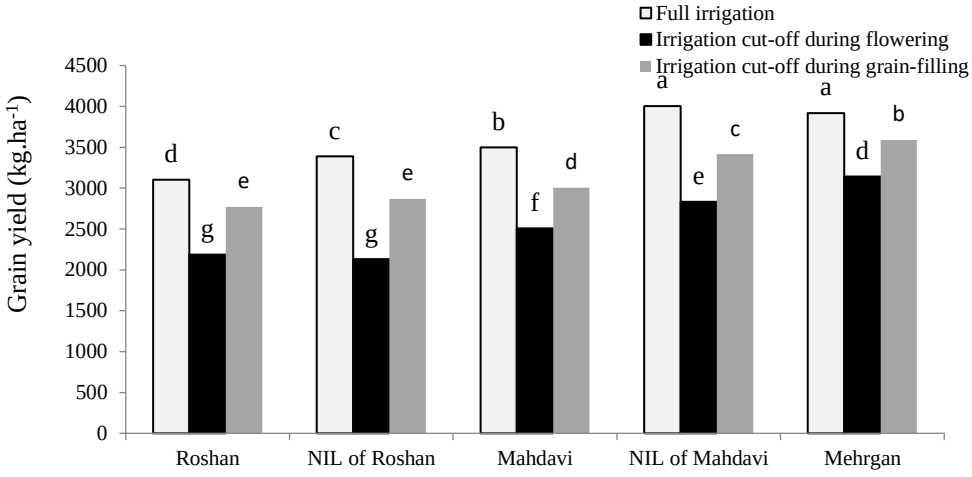
وزن هزار دانه

نتایج نشان داد که وزن هزار دانه به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر تیمارهای قطع آبیاری و ژنوتیپ‌ها (رقم‌ها و لاین‌ها) قرار گرفت (جدول ۳). این نتایج بیانگر حساسیت این صفت به تنش خشکی و تفاوت‌های ژنتیکی بین ژنوتیپ‌ها است. یافته‌های پیشین نیز بر وجود تنوع ژنتیکی معنی‌دار بین ژنوتیپ‌های گندم از نظر وزن هزار دانه تأکید کرده‌اند (Joshi *et al*., 2016; Kianpour *et al*., 2024). بیش‌ترین وزن هزار دانه در آبیاری کامل (۵۲/۸ گرم) و کم‌ترین مقدار آن در تیمار قطع آبیاری در مرحلهٔ پر شدن دانه (۴۹/۳ گرم) مشاهده شد، اما وزن هزار دانه در تیمار قطع آبیاری در مرحلهٔ گلدهی با آبیاری کامل تفاوت معنی‌داری نداشت (جدول ۴)، که بیانگر حساسیت کم‌تر این صفت نسبت به سایر صفات عملکردی در برابر کم‌آبی در این مرحله است. مطالعات پیشین نیز نشان داده‌اند که اعمال تنش خشکی در مراحل پایانی رشد، معمولاً تأثیر کم‌تری بر وزن هزار دانه نسبت به تعداد دانه دارد، زیرا گیاه در شرایط تنش با کاهش تعداد دانه‌های تشکیل شده، توانایی تخصیص مجدد منابع فتوسنتزی به دانه‌های باقی‌مانده را بهبود می‌بخشد و در نتیجه سبب پایداری نسبی وزن هزار دانه می‌شود (Blum, 2011). وزن دانه که به سرعت و مدت پر شدن آن وابسته است، از اجزای اصلی عملکرد محسوب می‌شود. ایزولاین روشن با ۵۹/۶ گرم بیش‌ترین و رقم مهرگان با ۴۲/۴۶ گرم کم‌ترین وزن هزار دانه را داشت. برتری ایزولاین روشن ممکن است به‌دلیل تعداد کم‌تر دانه در سنبله و دسترسی بیش‌تر منابع غذایی برای هر دانه باشد. این پدیده به‌عنوان اثر جبرانی بین اجزای عملکرد، به‌ویژه در شرایط تنش، در حفظ ثبات عملکرد نقش دارد (Slafer *et al*., 2014). همچنین، ایزولاین‌ها، به‌ویژه ایزولاین روشن، وزن هزار دانه بالاتری نسبت به رقم‌ها داشتند که ممکن است ناشی از انتخاب هدف‌مند در بهبود عملکرد تحت تنش باشد. این موضوع با گزارش‌های پیشین در باره تنوع ژنتیکی وزن هزار دانه در جو نیز هم‌راستا بود (Oraki *et al*., 2016). ثبات نسبی وزن هزار دانه در شرایط تنش و تفاوت معنی‌دار بین ژنوتیپ‌ها نشان داد که این صفت می‌تواند به‌عنوان شاخص پایداری عملکرد در شرایط کم‌آبی استفاده شود. بنابراین، انتخاب ژنوتیپ‌های با وزن هزار دانه بالا و پایدار، رویکرد مؤثری در به‌نژادی تحمل به خشکی است.

عملکرد دانه

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر قطع آبیاری و ژنوتیپ و برهم‌کنش آن‌ها بر عملکرد دانه معنی‌دار بود (جدول ۳). در مطالعات پیشین نیز تأکید شده است که گزینش ژنوتیپ‌های متحمل، نه صرفاً بر اساس عملکرد آن‌ها در شرایط بدون تنش، بلکه باید بر اساس واکنش آن‌ها در شرایط تنش انجام شود (Blum, 2011). در آبیاری کامل، ایزولاین مهدوی و رقم مهرگان بیش‌ترین و رقم روشن کم‌ترین عملکرد دانه را داشتند. این روند در شرایط خشکی نیز حفظ شد، به‌طوری‌که دو رقم مهرگان و مهدوی عملکرد بهتری داشتند و رقم روشن بیش‌ترین

کاهش را نشان داد (شکل ۱). کاهش عملکرد دانه در تیمار قطع آبیاری در مرحلهٔ گلدهی بیش‌تر از مرحلهٔ پرشدن دانه بود و تنش در مرحلهٔ گلدهی تأثیر قابل توجهی بر تعداد دانه و عملکرد نهایی داشت. کاهش عملکرد ژنوتیپ‌های روشن، ایزولاین روشن، مهدوی، ایزولاین مهدوی و مهرگان در قطع آبیاری در مرحلهٔ گلدهی به‌ترتیب ۳۰، ۳۸، ۲۸، ۲۹ و ۲۰ درصد و در مرحلهٔ پر شدن دانه ۱۱، ۱۵، ۱۴، ۱۵ و ۸ درصد بود. تفاوت در کاهش عملکرد ژنوتیپ‌ها بیانگر تنوع سازوکارهای ژنتیکی و فیزیولوژیک آن‌ها در واکنش به کم‌آبی است (شکل ۱).



شکل ۱- مقایسه میانگین عملکرد دانه در رقم‌ها و لاین‌های ایزوژن نزدیک زودرس گندم تحت تیمارهای قطع آبیاری

Figure 1. Comparison of means of grain yield in wheat cultivars and early maturing near-isogenic lines under irrigation cut-off treatments

عملکرد دانهٔ رقم و ایزولاین مهدوی در هر دو تیمار قطع آبیاری بالاتر از روشن بود، اگرچه درصد کاهش عملکرد تقریباً مشابه بود. این مطلب نشان می‌دهد که علاوه بر کاهش نسبی، سطح پایهٔ عملکرد نیز در تحمل به خشکی مهم است، به‌طوری که ژنوتیپ‌های با عملکرد بالا در شرایط مطلوب و صفات تحمل به خشکی، می‌توانند در شرایط تنش نیز عملکرد خوبی داشته باشند (Richards *et al*., 2010). همچنین، رقم مهرگان سازگاری مناسبی با قطع آبیاری داشت و عملکرد پایدار خود را حفظ کرد. مطالعات پیشین نیز تأثیر تنش خشکی در مراحل بحرانی رشد، مانند گلدهی و پر شدن دانه، بر عملکرد دانه را گزارش کرده‌اند (Dorrani-Nejad *et al*., 2022).

در این پژوهش، ایزولاین‌ها عملکرد دانهٔ بالاتری نسبت به رقم‌ها داشتند که ناشی از تفاوت‌های فنولوژیک بود. این نتایج با یافته‌های مطالعات پیشین مبنی بر برتری عملکرد دانه ایزولاین‌های گندم تحت رژیم‌های مختلف کم‌آبیاری همخوانی داشت (Banyai *et al*., 2017). رقم‌ها به‌دلیل تأخیر در ظهور سنبله و ورود به مرحلهٔ پر شدن دانه در دماهای بالای انتهای فصل، عملکرد کم‌تری نشان دادند، در حالی‌که ایزولاین‌ها به‌دلیل زودرسی و تطابق فنولوژیک با شرایط محیطی، از مواجهه با دمای بالای انتهای فصل پرهیز کردند و عملکرد پایدارتری داشتند. این یافته‌ها نشان می‌دهد که زودرسی و سنبله‌دهی زودهنگام صفات مهمی برای فرار از تنش خشکی و گرمای انتهای فصل هستند و اهمیت آن‌ها در مدیریت تنش‌های محیطی و بهبود عملکرد در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک مهم و برجسته است (Farooq *et al*., 2009; Dorrani-Nejad *et al*., 2022; Kianpour *et al*., 2024).

عملکرد دانه با وزن دانه در سنبله ($r = 0.56^{**}$) و تعداد دانه در سنبله ($r = 0.70^{**}$) همبستگی مثبت و معنی‌داری داشت (جدول ۵)، که نشان می‌دهد این دو صفت از شاخص‌های مهم و تعیین‌کنندهٔ عملکرد دانهٔ گندم تحت شرایط تنش خشکی (Kianpour *et al*., 2024) و بیانگر موفقیت در گرده‌افشانی و رشد دانه‌ها هستند. در واقع، گیاهانی که توان حفظ تعداد و وزن دانه را تحت شرایط تنش دارند، عملکرد بالاتری تولید می‌کنند و می‌توانند به‌عنوان صفات هدف در برنامه‌های به‌نژادی انتخاب شوند. زودرسی با حفظ سایر ویژگی‌های مثبت، رویکردی مؤثر برای افزایش تحمل و پایداری عملکرد گندم تحت شرایط تنش خشکی است.

عملکرد زیست‌توده

نتایج نشان داد که تیمارهای قطع آبیاری و ژنوتیپ‌ها (رقم‌ها و لاین‌ها)، به‌طور معنی‌داری بر عملکرد زیست‌توده تأثیر گذاشتند (جدول ۳). کاهش ۲۰ و ۹ درصدی درصدی عملکرد زیست‌توده به‌ترتیب در تیمارهای قطع آبیاری در مراحل گلدهی و پر شدن دانه نسبت به آبیاری کامل، بیانگر حساسیت بالاتر مرحلهٔ گلدهی به تنش آبی است. این یافته‌ها با مطالعات پیشین مبنی بر حساسیت بالای مرحلهٔ گلدهی به خشکی همخوانی داشت (Farooq *et al*., 2014; Rehman *et al*., 2021). ایزولاین مهدوی سازگاری بهتری با تنش آبی داشت و با ۱۱۰۱۸ کیلوگرم در هکتار، بیش‌ترین زیست‌توده را تولید کرد. یافته‌های قبلی نیز گزارش کردند که تولید مادهٔ خشک بالا و حفظ آن در شرایط تنش، شاخص مهمی برای تحمل و سازگاری گیاه به تنش است (Reynolds *et al*., 2009). کاهش زیست‌توده تحت تنش خشکی در مرحلهٔ گلدهی ممکن است ناشی از کاهش ارتفاع بوته، جذب نور کم‌تر و اختلال در فتوسنتز و تولید دانه باشد. این سازوکار به‌عنوان سازوکار اصلی کاهش عملکرد تحت تنش آبی مطرح شده است (Blum, 2011). همچنین، کاهش تولید مادهٔ خشک باعث کاهش عملکرد دانه و در نهایت کاهش زیست‌توده می‌شود. ارتباط مثبت و معنی‌دار بین عملکرد زیست‌توده با تعداد دانه در سنبله ($r = 0.41^{**}$)، وزن دانه در سنبله ($r = 0.53^{**}$) و عملکرد دانه ($r = 0.46^{**}$) نشان می‌دهد که افزایش مادهٔ خشک گیاه به بهبود عملکرد دانه کمک می‌کند و بهبود زیست‌توده می‌تواند عملکرد دانه را نیز افزایش دهد (Slafer *et al*., 2014). نتایج این پژوهش نشان داد که برتری عملکرد زیست‌توده با عملکرد دانه هم‌راستا بود (جدول ۵). گزارش شده است که تنش خشکی از مرحلهٔ گلدهی تا پرشدن دانه به‌شدت بر تجمع مادهٔ خشک و عملکرد دانه تأثیر دارد و مدیریت بهینهٔ تنش آبی در این دوره برای حفظ عملکرد و پایداری محصول حیاتی است (Rehman *et al*., 2021). بنابراین، استفاده از ژنوتیپ‌های متحمل مانند ایزولاین مهدوی و مدیریت دقیق آبیاری در مراحل حساس رشد، راه‌کارهای مؤثری برای بهبود عملکرد دانه در شرایط کم‌آبی هستند.

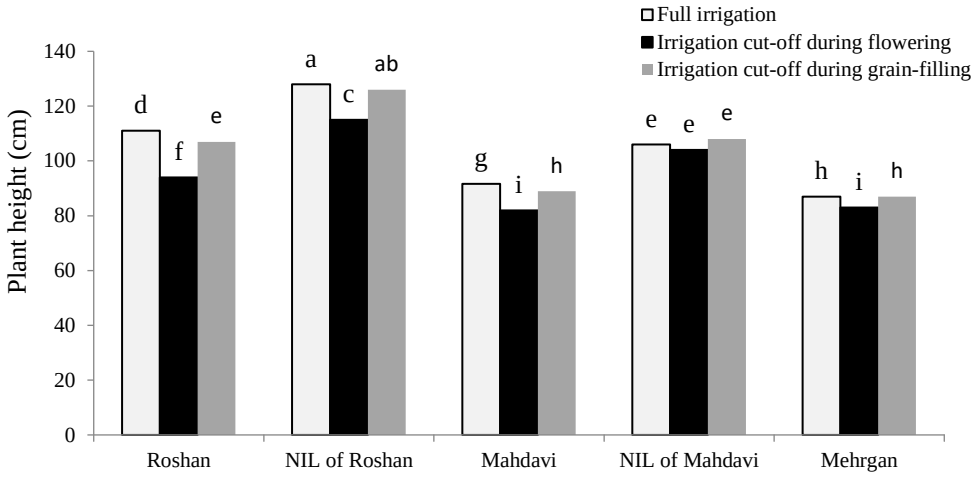
شاخص برداشت

نتایج نشان داد که اثر قطع آبیاری و ژنوتیپ (رقم‌ها و لاین‌ها)، بر شاخص برداشت معنی‌دار بود (جدول ۳). در آبیاری کامل و قطع آبیاری در مرحلهٔ گلدهی به‌ترتیب بیش‌ترین (۳۸/۵۲ درصد) و کم‌ترین (۳۳/۱۸ درصد) مقدار شاخص برداشت را نشان دادند (جدول ۴). در بین ژنوتیپ‌ها نیز رقم مهرگان دارای بالاترین و رقم مهدوی و ایزولاین آن دارای کم‌ترین شاخص برداشت بودند. شاخص برداشت معیاری برای سنجش کارایی تخصیص مواد فتوسنتزی به تولید دانه است. نتایج پژوهش نشان داد که تنش خشکی، به‌ویژه در مرحلهٔ گلدهی، رشد زایشی را بیش‌تر از رشد رویشی تحت تأثیر قرار داد و باعث کاهش معنی‌دار شاخص برداشت در تمامی ژنوتیپ‌ها شد. این کاهش ناشی از حساسیت بیش‌تر بخش زایشی به تنش خشکی و محدود شدن انتقال مواد فتوسنتزی به دانه است که سبب کاهش عملکرد دانه و در نتیجه کاهش شاخص برداشت می‌شود.

تفاوت شاخص برداشت بین ژنوتیپ‌ها نشان‌دهندهٔ رویکردهای مختلف سازگاری به خشکی است. برای مثال، رقم مهرگان با شاخص برداشت بالاتر، منابع بیش‌تری را به دانه اختصاص می‌دهد، در حالی‌که ایزولاین مهدوی با وجود زیست‌تودهٔ بالا، شاخص برداشت کم‌تری داشت که ممکن است ناشی از تمرکز بر حفظ بخش رویشی باشد (Reynolds *et al*., 2009). شاخص برداشت به‌عنوان معیار کلیدی در به‌نژادی گیاهی برای بهبود عملکرد در شرایط تنش آبی شناخته شده است و انتخاب ژنوتیپ‌های با شاخص برداشت بالا می‌تواند راهبرد مؤثری در افزایش بهره‌وری در مناطق خشک و کم‌آب باشد (Slafer *et al*., 2014; Rehman *et al*., 2021).

ارتفاع بوته

نتایج نشان داد که اثر تیمارهای قطع آبیاری، ژنوتیپ (رقم‌ها و لاین‌ها) و برهم‌کنش آن‌ها بر ارتفاع بوته معنی‌دار بود (جدول ۳). معنی‌دار شدن برهم‌کنش قطع آبیاری × رقم‌ها و لاین‌ها بیانگر تفاوت واکنش رشدی ژنوتیپ‌ها نسبت به قطع آبیاری است. در شرایط آبیاری کامل، لاین ایزوژن روشن با ارتفاع بوتهٔ ۱۲۸ سانتی‌متر بیش‌ترین و رقم مهرگان با ۸۷/۴ سانتی‌متر کم‌ترین ارتفاع بوته را داشتند که بیانگر تفاوت پتانسیل رشد ژنتیکی آن‌ها است. به‌طور کلی، قطع آبیاری در مرحلهٔ گلدهی، ارتفاع بوته را به‌طور معنی‌داری در تمامی ژنوتیپ‌ها کاهش داد، اما قطع آبیاری در مرحلهٔ پر شدن دانه تأثیر قابل‌توجهی بر ارتفاع بوته نداشت (شکل ۲).



شکل ۲- مقایسه میانگین ارتفاع بوته در رقم‌ها و لاین‌های ایزوژن نزدیک زودرس گندم تحت تیمارهای قطع آبیاری

Figure 2. Comparison of means of plant height in wheat cultivars and early maturing near-isogenic lines under irrigation cut-off treatments

قطع آبیاری در مرحلهٔ گلدهی، ارتفاع بوته رقم روشن، لاین ایزوژن روشن، رقم مهدوی، لاین ایزوژن مهدوی و رقم مهرگان را به‌ترتیب به‌میزان ۱۲، ۹، ۹، ۵ و ۴ درصد کاهش داد که بیانگر حساسیت بالای این مرحله به تنش آبی و تأیید یافته‌های سایر محققان در مورد حساسیت مراحل ابتدایی زایشی گندم به تنش خشکی است. تنوع ژنتیکی قابل توجهی در ارتفاع بوتهٔ رقم‌ها و لاین‌ها وجود داشت. کاهش ارتفاع بوته در تنش خشکی انتهای فصل در ارتباط با توقف رشد رویشی، تسریع فاز زایشی و تبدیل سریع جوانهٔ رویشی به زایشی است (Slafer *et al.*, 2014). پژوهش‌های پیشین نشان داده‌اند که خشکی انتهای فصل با کاهش تولید هورمون‌های رشد مانند جیبرلین و اکسین، باعث کاهش طول ساقه و ارتفاع بوته می‌شود (Wang *et al.*, 2018). همچنین، ژنوتیپ‌های متحمل‌تر دارای سازوکارهای تنظیمی بهتری مانند حفظ و بهینه‌سازی مصرف آب هستند که اثرات منفی تنش آبی بر رشد را کاهش می‌دهند (Chaves, 2003).

طول پدانکل

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر قطع آبیاری و ژنوتیپ (رقم‌ها و لاین‌ها)، بر طول پدانکل معنی‌دار بود (جدول ۳). قطع آبیاری در مرحله گلدهی موجب کاهش معنی‌دار طول پدانکل شد، به‌طوری که بیش‌ترین طول پدانکل در تیمار آبیاری کامل (۳۲/۷۵ سانتی‌متر) و کم‌ترین آن در قطع آبیاری در مرحلهٔ گلدهی (۲۹/۶۰ سانتی‌متر) مشاهده شد. همچنین، طول پدانکل در تیمار قطع آبیاری در مرحلهٔ پر شدن دانه (۳۲/۷۵ سانتی‌متر) تفاوت معنی‌داری با تیمار آبیاری کامل نداشت (جدول ۴). این نتایج بیانگرحساسیت بیش‌تر مرحلهٔ گلدهی به تنش خشکی است که با یافته‌های سایر محققان مطابقت داشت. همانند ارتفاع بوته، لاین ایزوژن روشن با طول پدانکل ۴۳/۸۱ سانتی‌متر بیش‌ترین و رقم مهرگان با ۱۷/۸۸ سانتی‌متر کم‌ترین طول پدانکل را داشتند که نشان‌دهندهٔ تفاوت پتانسیل ژنتیکی آن‌ها است (جدول ۴). مطالعات قبلی نیز نشان داده‌اند که تنش خشکی در انتهای فصل موجب کاهش ارتفاع بوته و طول پدانکل می‌شود (Safhi & Thabet, 2025). این کاهش به‌دلیل کاهش تولید هورمون‌های رشد مانند جیبرلین و اکسین در شرایط خشکی است که باعث کوتاه‌تر شدن طول ساقه و بوته می‌شود (Wang *et al.*, 2003).

تعداد روز از کاشت تا سنبله‌دهی

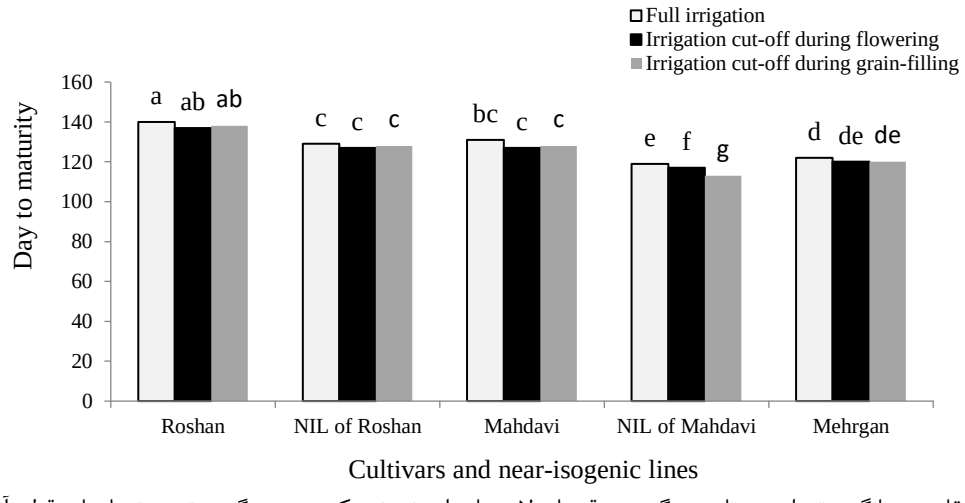
نتایج نشان داد که تفاوت معنی‌داری بین رقم‌ها و لاین‌ها از نظر تعداد روز از کاشت تا سنبله‌دهی وجود داشت، اما اثر قطع آبیاری و برهم‌کنش بین این دو عامل بر این صفت معنی‌دار نبود (جدول ۳). این نتایج نشان می‌دهد که زمان آغاز دورهٔ زایشی گندم بیش‌تر تحت تأثیر عوامل ژنتیکی است و تنش خشکی پس از گلدهی تأثیری بر آن ندارد. تعداد روز از کاشت تا سنبله‌دهی شاخص مهمی برای تعیین عملکرد دانه در گندم است، چرا که این دوره بیانگر مدت زمان لازم برای توسعهٔ رویشی و آغاز فرآیند زایشی گیاه است (Farooq *et al.*, 2014).

نتایج نشان داد که رقم روشن با میانگین ۹۷ روز بیش‌ترین و ایزولاین مهدوی با ۷۰ روز کم‌ترین روز تا سنبله‌دهی را داشتند (جدول ۴). همچنین، ایزولاین‌ها به‌طور قابل توجهی دورهٔ سنبله‌دهی کوتاه‌تری نسبت به رقم‌های مربوطه داشتند و حدود ۱۴ روز زودتر به این مرحله رسیدند که احتمالاً به‌دلیل تغییرات ژنتیکی و بهبود تطابق با شرایط محیطی در ایزولاین‌ها بوده است. کوتاه شدن دورهٔ رشد زایشی در ایزولاین‌ها ممکن است راهبردی برای فرار از خشکی و گرمای انتهای فصل باشد و باعث شود گیاه زودتر به مرحلهٔ تولید دانه برسد که در شرایط کم‌آبی می‌تواند یک مزیت نسبی باشد (Blum, 2011; Kianpour *et al*., 2024). قطع آبیاری در هر دو مرحله گلدهی تا پر شدن دانه و پر شدن دانه تا رسیدگی کامل تفاوت معنی‌داری با شرایط آبیاری کامل از نظر تعداد روز تا سنبله‌دهی نشان نداد. این موضوع بیانگر آن است که مراحل نمو زایشی گندم و انتقال به دورهٔ بعد تحت تأثیر مستقیم تنش آبی در تیمارهای مختلف قرار نمی‌گیرند، زیرا ژنوتیپ‌ها قادرند زمان‌بندی رشد خود را تنظیم کنند تا اثر تنش کاهش یابد. مطالعات پیشین نیز تأکید کرده‌اند که تنش خشکی در مراحل پس از گلدهی اثر کم‌تری بر مدت زمان سنبله‌دهی دارد، ولی ممکن است اثرات بیش‌تری بر کیفیت و کمیت دانه‌ها داشته باشد (Passioura., 2007). همچنین، انتخاب ژنوتیپ‌های با دورهٔ رشد کوتاه‌تر می‌تواند راه‌کار مؤثری برای مدیریت تنش خشکی و گرما در مناطق گرم و کم‌بارش باشد (Bapela *et al*., 2022; Kianpour *et al*., 2024).

تعداد روز از کاشت تا رسیدگی

نتایج نشان داد که اثر تیمارهای قطع آبیاری و رقم و برهم‌کنش آن‌ها بر تعداد روز از کاشت تا رسیدگی گندم معنی‌دار بود (جدول ۳). قطع آبیاری در مراحل رشد زایشی باعث کاهش معنی‌دار روز تا رسیدگی در ژنوتیپ‌ها شد، به‌گونه‌ای که در شرایط آبیاری کامل، متوسط تعداد روز تا رسیدگی ۱۲۸ روز بود، در حالی‌که در تیمارهای قطع آبیاری، این مقدار به ۱۲۴ روز کاهش یافت. چنین کاهش‌هایی در طول دورهٔ فنولوژیک بیانگر واکنش گیاه به تنش خشکی است که منجر به تسریع در رشد و در نهایت رسیدگی می‌شود (Farooq *et al*., 2014).

مقایسه میانگین بین ژنوتیپ‌ها نشان داد که رقم روشن، ایزولاین روشن و رقم مهرگان به‌ترتیب با ۱۳۸، ۱۲۹ و ۱۲۸ روز دارای بیش‌ترین تعداد روز از کاشت تا رسیدگی بودند، در حالی‌که کم‌ترین روز تا رسیدگی در رقم مهدوی (۱۲۰ روز) و ایزولاین مهدوی (۱۱۶ روز) ثبت شد (شکل ۳). ایزولاین‌ها به‌طور متوسط دورهٔ رسیدگی کوتاه‌تری نسبت به والدین خود داشتند که بیانگر تأثیر اصلاح ژنتیکی در کاهش طول دورهٔ رشد و سازگاری بهتر با تنش‌های انتهای فصل است (Slafer *et al*., 2014). قطع آبیاری در دو مرحله از رشد، کاهش متفاوتی در تعداد روز تا رسیدگی ژنوتیپ‌ها ایجاد کرد. در مرحلهٔ گلدهی، کاهش تعداد روز تا رسیدگی برای رقم روشن، ایزولاین روشن، رقم مهدوی، ایزولاین مهدوی و مهرگان به‌ترتیب ۲، ۲، ۲، ۲ و ۳ درصد و در مرحلهٔ پرشدن دانه به‌ترتیب ۲، ۱، ۳، ۵ و ۲ درصد بود.

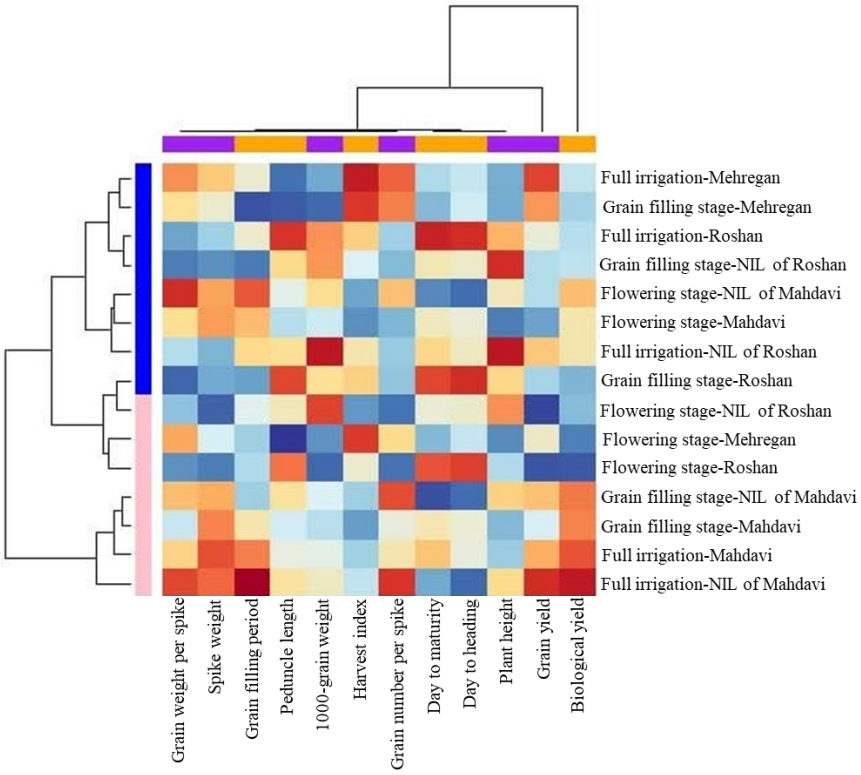


شکل ۳- مقایسه میانگین تعداد روز تا رسیدگی در رقم‌ها و لاین‌های ایزوژن نزدیک زودرس گندم تحت تیمارهای قطع آبیاری

Figure 3. Comparison of means of days to maturity in wheat cultivars and early maturing near-isogenic lines under irrigation cut-off treatments

در شرایط آبیاری کامل، ایزولاین‌های روشن و مهدوی به‌ترتیب ۱۰ و ۱۲ روز زودتر از والدین خود به مرحله رسیدگی کامل رسیدند. این اختلاف در دوره رسیدگی در تیمارهای قطع آبیاری در مرحلهٔ گلدهی و پر شدن دانه نیز حفظ شد و یا افزایش یافت. این یافته‌ها نشان می‌دهند که ایزولاین‌ها در واکنش به قطع آبیاری، مراحل فنولوژیک را سریع‌تر طی می‌کنند و زودتر به مرحله رسیدگی می‌رسند که این ویژگی به‌عنوان سازوکاری برای فرار از تنش در مناطق گرم و خشک اهمیت دارد (Blum, 2011). کاهش تعداد روز تا رسیدگی در چنین شرایطی نشان‌دهندهٔ سازگاری فنولوژیک ژنوتیپ‌ها با تنش خشکی است، به‌طوری که کوتاه‌تر شدن دورهٔ رشد باعث کاهش اثرات منفی تنش و حفظ عملکرد می‌شود. نتایج نشان داد که رقم‌ها با دورهٔ رشد طولانی‌تر، به‌دلیل هم‌زمانی بیش‌تر مراحل زایشی با تنش خشکی و گرمای انتهای فصل، عملکرد کم‌تری داشتند، در حالی‌که ایزولاین‌های با دورهٔ رشد کوتاه‌تر از شرایط نامساعد در مرحلهٔ پرشدن دانه اجتناب و عملکرد بهتری تولید کردند. این یافته‌ها با مطالعات دیگر مبنی بر این‌که رقم‌های زودرس عملکرد پایدارتری در شرایط تنش دارند و کاهش عملکرد کم‌تری را نسبت به رقم‌های دیررس تجربه می‌کنند، همخوانی داشت (Kianpour *et al.*, 2024). به‌طور کلی، این مطالعه نشان داد که روز تا رسیدگی تحت تأثیر ژنتیک و تنش خشکی است و ایزولاین‌های با دورهٔ رشد کوتاه‌تر، عملکرد بهتری در شرایط قطع آبیاری داشتند. بنابراین، انتخاب ژنوتیپ‌های زودرس به‌عنوان راهبردی مناسب در مناطق گرم و خشک توصیه می‌شود.

بررسی نمودار حرارتی (شکل ۴) نشان داد که بیش‌تر صفات در رقم‌ها و لاین‌های ایزوژن گندم در تیمار قطع آبیاری در مرحلهٔ گلدهی دارای کم‌ترین مقدار بودند، در حالی‌که در تیمار آبیاری کامل بالاترین مقادیر را نشان دادند. نتایج نشان داد که رقم و لاین ایزوژن روشن تحت شرایط قطع آبیاری در مرحلهٔ گلدهی دارای کم‌ترین عملکرد دانه بودند، در حالی‌که لاین ایزوژن مهدوی و مهرگان بالاترین عملکرد دانه را تحت شرایط آبیاری کامل نشان دادند.



شکل۴- نمودار حرارتی و دندروگرام تجزیه خوشه‌ای صفات مورفوفنولوژیک و عملکردی رقم‌ها و لاین‌های ایزوژن نزدیک زودرس گندم نان. همبستگی‌های قوی مثبت و منفی به‌ترتیب با مربع‌های قرمز تیره و آبی تیره نشان داده شده‌اند.

Figure 4. Heatmap and dendrogram of cluster analysis of morpho-phenological and yield traits of bread wheat cultivars and early maturing near-isogenic lines. Strong positive and negative correlations are represented by dark red and dark blue squares, respectively.

نتایج نقشه حرارتی و دندروگرام مربوطه چهار گروه اصلی را نشان داد (شکل ۴). گروه اول (شامل رقم مهرگان در شرایط آبیاری کامل و قطع آبیاری در مرحلهٔ پر شدن دانه و رقم روشن در شرایط آبیاری کامل و ایزولاین آن در تیمار قطع آبیاری در مرحلهٔ پر شدن دانه)، دارای عملکرد دانه و وزن دانه در سنبلهٔ اصلی نسبتاً بالا و عملکرد زیست‌توده پایین و تغییرات متفاوت در سایر صفات بودند. گروه دوم (شامل رقم و ایزولاین مهدوی در شرایط قطع آبیاری در مرحلهٔ گلدهی و ایزولاین روشن در تیمار آبیاری کامل)، که عملکرد دانه و زیست‌توده متوسط و تغییرات متفاوت در سایر صفات را نشان دادند. گروه سوم (شامل رقم روشن در تیمار قطع آبیاری در مرحلهٔ پر شدن دانه و رقم و ایزولاین روشن و رقم مهرگان در تیمار قطع آبیاری در مرحلهٔ گلدهی) که در اغلب صفات دارای کم‌ترین مقادیر بودند. گروه چهارم (شامل رقم و ایزولاین مهدوی در تیمار آبیاری کامل و قطع آبیاری در مرحلهٔ پر شدن دانه) که دارای بالاترین عملکرد دانه و زیست‌توده، تعداد و وزن دانه در سنبله و وزن سنبلهٔ اصلی و تغییرات متفاوت در سایر صفات بودند (شکل ۴).

نتیجه‌گیری کلی

به‌طور کلی نتایج این مطالعه نشان داد که قطع آبیاری در مراحل مختلف رشد از طریق کاهش صفات فنولوژیک مانند تعداد روز از کاشت تا رسیدگی و اجزای عملکرد شامل تعداد و وزن دانه در سنبله، به‌طور متفاوتی عملکرد دانه رقم‌ها و ایزولاین‌های گندم را کاهش داد. ایزولاین‌ها با دورهٔ رشد کوتاه‌تر و عملکرد بالاتر نسبت به رقم‌های والدی، سازگاری بهتری با شرایط خشکی داشتند. کاهش عملکرد ناشی از قطع آبیاری در مرحلهٔ گلدهی به‌مراتب بیش‌تر از مرحلهٔ پر شدن دانه بود. ژنوتیپ‌های مهرگان و مهدوی با صفات فیزیولوژیک بهتر، عملکرد بالاتری در شرایط خشکی داشتند. زودرسی و کاهش تعداد روز تا سنبله‌دهی و رسیدگی ایزولاین‌ها موجب فرار فنولوژیک از تنش و بهبود پایداری عملکرد شد. لاین ایزوژن مهدوی با زودرسی و پایداری عملکرد، بهترین عملکرد را در شرایط قطع آبیاری داشت و برای مناطق تنش‌زای خوزستان توصیه می‌شود. در نهایت، انتخاب ژنوتیپ‌های زودرس با عملکرد پایهٔ بالاتر، به‌ویژه برای مناطق گرم و خشک، رویکرد مناسبی برای مدیریت تنش خشکی و حفظ عملکرد است. همچنین، تأکید می‌شود که اصلاح ژنتیکی و انتخاب دقیق ژنوتیپ‌ها در برنامه‌های به‌نژادی گندم تحت شرایط کم‌آبی ضروری است.

سپاسگزاری

بدینوسیله از معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه شهید چمران اهواز در راستای تأمین بخشی از هزینه‌های اجرای این پژوهش به شماره پژوهانه SCU.AA1403.96 سپاسگزاری می‌شود.

تضاد منافع

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

رعایت اخلاق در نشر

نویسندگان اعلام می‌کنند که در نگارش این مقاله به‌طور کامل از اخلاق نشر از جمله سرقت ادبی، سوء رفتار، جعل داده‌ها و انتشار دوگانه، پیروی کرده‌اند. همچنین، این مقاله حاصل یک کار تحقیقاتی اصیل بوده و تا کنون به‌طور کامل به 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 به‌صورت دسترسی باز موافقت کرده و کلیه حقوق استفاده از محتوا، جدول‌ها، شکل‌ها، تصویرها و غیره را به ناشر واگذار می‌کنند.

References

Ahmadi, A., & Baker, D. A. (2001). The effect of water stress on the activities of key regulatory enzymes of the sucrose to starch pathway in wheat. *Plant Growth Regulation, 35*, 81-91. doi: 10.1023/A:1013827600528.

Araus, J. L., Slafer, G. A., Royo, C., & Serret, M. D. (2008). Breeding for yield potential and stress adaptation in cereals. *Critical Reviews in Plant Sciences*, *27*(6), 377-412. doi: 10.1080/07352680802467736.

Banyai, J., Maccaferri, M., Cane, M. A., Monostori, I., Spitko, T., Kuti, C., Meszaros, K., Lang, L., Pal, M., & Karsai, I. (2017). Phenotypical and physiological study of near-isogenic durum wheat

lines under contrasting water regimes. *South African Journal of Botany*, *108*, 248-255. doi: 10.1016/j.sajb.2016.11.001.

Bapela, T., Shimelis, H., Tsilo, T. J., & Mathew, I. (2022). Genetic improvement of wheat for drought tolerance: Progress, challenges and opportunities. *Plants (Basel)*, *11*(10), 1331. doi: 10.3390/plants11101331.

Barnabás, B., Jäger, K., & Fehér, A. (2008). The effect of drought and heat stress on reproductive processes in cereals. *Plant, Cell & Environment*, *31*(1), 11-38. doi: 10.1111/j.1365-3040.2007.01727.x.

Blum, A. (2011). Drought resistance - Is it really a complex trait? *Functional Plant Biology*, *38*(10), 753-757. doi: 10.1071/FP11068.

Chaves, M. M., Maroco, J. P., & Pereira, J. S. (2003). Understanding plant responses to drought - from genes to the whole plant. *Functional Plant Biology*, *30*(3), 239-264. doi: 10.1071/FP02076.

Dolferus, R., Ji, X., & Richard, R. A. (2011). Abiotic stress and control of grain number in cereals. *Plant Science*, *181*, 331-34. doi: 10.1016/j.plantsci.2011.05.015.

Dorrani-Nejad, M., Kazemipour, A., Maghsoudi-Moud, A. A., & Abdolshahi, R. (2022). Wheat breeding for early heading: Does it improve grain yield under drought stress and well-watered conditions? *Environmental & Experimental Botany*, *200*, 104902. doi: 10.1016/j.envexpbot.2022.104902.

Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, N., Fujita, D., & Basra, S. M. A. (2009). Plant drought stress: Effects, mechanisms and management. *Agronomy for Sustainable Development*, *29*(1), 185-212. doi: 10.1051/agro:2008021.

Farooq, M., Hussain, M., Wahid, A., & 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.

Fischer, R. A. (2011). Wheat physiology: A review of recent developments. *Crop & Pasture Science*, *62*(2), 95-114. doi: 10.1071/CP10344.

Gupta, N. K., Dhanda, S. S., & Sharma, I. (2020). Drought stress and its impact on cereal crops: a review. *International Journal of Current Microbiology & Applied Sciences*, *9*(3), 2042-2054.

Harrison, M. T. (2021). Climate change benefits negated by extreme heat. *Nature Food*, *2*(11), 855-856. doi: 10.1038/s43016-021-00387-6.

Hill, C. B., & Li, C. (2022). Genetic improvement of heat stress tolerance in cereal crops. *Agronomy*, *12*(5), 1205. doi: 10.3390/agronomy12051205.

Hurkman, W. J., McCue, K. F., Altenbach, S. B., Korn, A., Tanaka, C. K., Kothari, K. M., Johnson, E. L., Bechtel, D. B., Wilson, J. D., Anderson, O. D., & DuPont, F. M. (2003). Effect of temperature on expression of genes encoding enzymes for starch biosynthesis in developing wheat endosperm. *Plant Science*, *164*, 873-881.

Hyles, J., Bloomfield, M. T., Hunt, J. R., Trethowan, R. M., & Trevaskis, B. (2020). Phenology and related traits for wheat adaptation. *Heredity*, *125*, 417-430. doi: 10.1038/s41437-020-0320-1.

Ji, X., Dong, B., Shiran, B., Talbot, M. J., Edlington, J. E., Hughes, T., White, R. G., Gubler, F., & Dolferus, R. (2011). Control of abscisic acid catabolism and abscisic acid homeostasis is important for reproductive stage stress tolerance in cereals. *Plant Physiology*, *156*, 647-662. doi: 10.1104/pp.111.176164.

Joshi, A. K., Mishra, B., Chatrath, R., Ortiz Ferrara, G., & Singh, R. P. (2016). Wheat improvement in India: Present status, emerging challenges and future prospects. *Euphytica*, *157*(3), 431-446. doi: 10.1007/s10681-007-9385-7.

Kianpour, S., Rahnama, A., Monsefi, A., & Abdolshahi, R. (2024). Evaluating morpho-phenological and yield traits of bread wheat cultivars and near-isogenic lines in response to terminal heat stress in Ahvaz, Iran. *Cereal Research*, *13*(4), 331-349. [In Persian]. doi: 10.22124/CR.2024.26382.1804.

Mahfuz Bazzaz, M., Hossain, A., Khaliq, Q. A., Abdul Karim, M., Farooq, M., & Teixeira da Silva, J. A. (2019). Assessment of tolerance to drought stress of thirty-five bread wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes using boxplots and cluster analysis. *Agriculturae Conspectus Scientificus*, *84*(4), 333-345.

Oraki, A., Siahpoosh, M. R., Rahnama, A., & Lakzadeh, I. (2016). The effects of terminal heat stress on yield, yield components, and some morpho-phenological traits of barley genotypes (*Hordeum vulgare* L.) in Ahvaz weather conditions. *Iranian Journal of Field Crop Science*, *47*(1), 29-40. [In Persian]. doi: 10.22059/ijfcs.2016.63586.

Passioura, J. (2007). The drought environment: Physical, biological and agricultural perspectives. *Journal of Experimental*

Botany, *58*(2), 113-117. doi: 10.1093/jxb/erl212.

Perez-Rial, A., Carmona, A., Ali, L., Rubio, J., Millan, T., Castro, P., & Die, J. V. (2024). Phenotypic and genetic characterization of a near-isogenic line pair: Insights into flowering time in chickpea. *BMC Plant Biology*, *24*, 709. doi: 10.1186/s12870-024-05411-y.

Plaut, Z., Butow, B. J., Blumenthal, C. S., and Wrigley, C. W. 2004. Transport of dry matter into developing wheat kernels and its contribution to grain yield under post-anthesis water deficit and elevated temperature. *Field Crops Research*, *86*, 185-198. doi: 10.1016/j.fcr.2003.08.005.

Rahnama, A., Hosseinalipour, B., Farrokhian Firouzi, A., Harrison, M. T., & Ghorbanpour, M. (2024a). Root architecture traits and genotypic responses of wheat at seedling stage to water-defcit stress. *Cereal Research Communications*, *52*, 1499-510. doi: 10.1007/s42976-023-00481-4.

Rahnama, A., Salehi, F., Meskarbashee, M., Mehdi Khanlou, K., Ghorbanpour, M., & Harrison, M. T. (2024b). High temperature perturbs physicochemical parameters and fatty acids composition of safflower (*Carthamus tinctorius* L.). *BMC Plant Biology*, *24*, 1080. doi: 10.1186/s12870-024-057813.

Rehman, H. U., Tariq, A., Ashraf, I., Ahmed, M., Muscolo, A., Basra, S. M. A., & Reynolds, M. (2021). Evaluation of physiological and morphological traits for improving spring wheat adaptation to terminal heat stress. *Plants*, *10*(3), 455. doi: 10.3390/plants10030455.

Reynolds, M., Foulkes, M. J., Slafer, G. A., Berry, P., Parry, M. A., Snape, J. W., & Angus, W. J. (2009). Raising yield potential in wheat. *Journal of Experimental Botany*, *60*(7), 1899-1918. doi: 10.1093/jxb/erp016.

Richards, R. A., Rebetzke, G. J., Watt, Condon, A. G., Spielmeyer, W., & Dolferus, R. (2010). Breeding for improved water productivity in temperate cereals: phenotyping, quantitative trait loci, markers and the selection environment. *Functional Plant Biology*, *37*, 85-97. doi: 10.1071/FP09219.

Rousset, M., Bonnin, I., Remoué, C., Falque, M., Rhoné, B., Veyrieras, J. B., Madur, D., Murigneux, A., Balfourier, F., & Le Gouis, J. (2011). Deciphering the genetics of flowering time by an association study on candidate genes in bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *Theoretical & Applied Genetics*, *123*, 907-926. doi: 10.1007/s00122-011-1636-2.

Sadras, V. O. (2007). Evolutionary aspects of the trade-off between seed size and number in crops. *Field Crops Research*, *100*(2-3), 125-138. doi: 10.1016/j.fcr.2006.07.004.

Safhi, F. A., & Thabet, S. G. (2025). Deciphering genetic control of peduncle length in drought-stressed barley through genome-wide association study. *Plant Biotechnology Reports*, *19*, 373-387. doi: 10.1007/s11816-025-00983-z.

Saini, H. S., & Westgate, M. E. (2000). Reproductive development in grain crops during drought. *Advances in Agronomy*, *68*, 59-96. doi: 10.1016/S0065-2113(08)60843-3.

Salehi, F., Rahnama, A., Meskarbashee, M., Mehdi Khanlou, K., & Ghorbanpour, M. (2023). Physiological and metabolic changes of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) cultivars in response to terminal heat stress. *Journal of Plant Growth Regulation*, *42*, 6585-6600. doi: 10.1007/s00344-023-10911-6.

Slafer, G. A., Savin, R., & Sadras, V. O. (2014). Coarse and fine regulation of wheat yield components in response to genotype and environment. *Field Crops Research*, *157*, 71-83. doi: 10.1016/j.fcr.2013.11.002.

Wang, W., Vinocur, B., & Altman, A. (2003). Plant responses to drought, salinity and extreme temperatures: towards genetic engineering for stress tolerance. *Planta*, *218*(1), 1-14. doi: 10.1007/s00425-003-1105-5.

Xiong, L., & Zhu, J. K. (2002). Molecular and genetic aspects of plant responses to osmotic stress. *Plant, Cell & Environment*, *25*, 131-139. doi: 10.1046/j.1365-3040.2002.00782.x.

Yang, J., Zhang, J., Wang, Z., Xu, G., & Zhu, Q. (2004). Activities of key enzymes in sucrose-to-starch conversion in wheat grains subjected to water deficit during grain filling. *Plant Physiology*, *135*, 1621-1629. doi: 10.1104/pp.104.041038.