Karafan
Quarterly Scientific Journal of National University of Skill
Winter 2026, Vol. 22, No. 4, p. 140-159
Journal Homepage: https://karafan.nus.ac.ir/?lang=en
doi:10.48301/KSSA.2025.541588.3283

Response of Selected Irrigated Wheat Lines and the Commercial Cultivar Mihan to Terminal Irrigation Cut-Off During Grain Filling period

Esmail Nabizadeh[1]*, Parvaneh Shojaee[1], Khadijeh Ahmadi[2], Ali Ghaderi[3]

[1]Institute of Agriculture, Water, Food, and Nutraceuticals, Mah.C., Islamic Azad University, Mahabad, Iran.
[2]Faculty of Agricultural Sciences, Shahed University, Tehran, Iran.
[3]Department of Horticultural, Shirvan Branch, Islamic Azad University, Shirvan, Iran

ARTICLE INFO

Article Type:
Original Research

Received: 10.14.2024
Revised: 11.20.2024
Accepted: 12.09.2024

Keyword:
Terminal drought stress
Wheat breeding lines
Grain yield
Stress tolerance index (STI)
Geometric mean productivity (GMP)
Biological yield

***Corresponding Author:**
Esmail Nabizadeh
Email:
nabizadeh.esmaeil@gmail.com

ABSTRACT

This study aimed to assess the responses of selected irrigated bread wheat lines and the commercial cultivar Mihan to terminal drought stress (irrigation withholding during grain filling) in the 2023-2024 growing season in Bukan, Iran (temperate-cold climate, annual rainfall 250 mm). The experiment used a randomized complete block design with split-plot arrangement and three replications: main plots were irrigation levels (well-watered vs. cutoff at grain filling), and subplots were seven genotypes (lines 5118, 5209, 5013, 5216, 5005, 5220, and Mihan). Drought stress significantly affected days to maturity and thousand-grain weight ($p<0.05$), grain yield, and grains per spike ($p<0.01$). Genotypic effects were significant ($p<0.01$) for all traits except harvest index. Line 5005 showed the highest grain yield (9213 kg ha^{-1} well-watered; 9044 kg ha^{-1} stressed), grains per spike (64-66), stress tolerance index (STI=9140), and geometric mean productivity (GMP=9176.7 kg ha^{-1}), identifying it as the most tolerant and stable genotype. Line 5216 exhibited the least reduction in grain weight under stress. Average grain yield reduction was 1.57%, indicating mild stress impact and genotypic variation in drought response differentiating this from studies reporting 20-30% losses. Line 5005 is recommended for drought-prone cultivation and as a resistant parent in breeding programs.

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Wheat (*Triticum aestivum* L.) is one of the most important strategic cereal crops worldwide, playing a pivotal role in global food security and human nutrition. Due to its high contribution to daily energy and protein intake, wheat occupies a unique place in agricultural production systems. In Iran, wheat is considered the most important crop, and a substantial portion of the country's cultivated lands is allocated annually to its production. Despite this significance, limited water resources and the frequent occurrence of drought in recent years have posed serious challenges to sustainable wheat production. Among the different growth stages of wheat, the grain-filling stage is regarded as one of the most sensitive to water deficit. Drought stress during this stage accelerates leaf senescence, reduces the supply of assimilates to grains, and ultimately decreases kernel weight and yield. Therefore, identifying drought-tolerant lines and cultivars at this stage is a crucial strategy for improving yield stability and enhancing water-use efficiency in arid and semi-arid regions. The present study was designed to evaluate the response of selected irrigated wheat lines and the commercial cultivar 'Mihan' to terminal irrigation cut-off at the grain-filling stage and to identify superior genotypes under drought conditions.

Methodology

The field experiment was conducted during the 2023–2024 cropping season in Boukan, northwestern Iran, which is characterized by a temperate–cold climate. The experimental design was a randomized complete block with a split-plot arrangement and three replications. Irrigation regime was assigned to main plots at two levels: full irrigation and irrigation cut-off at grain filling. Subplots consisted of six selected wheat lines (5118, 5209, 5013, 5216, 5005, and 5220) along with the commercial cultivar 'Mihan'. Standard agronomic practices were applied, including land preparation, fertilization with urea, triple superphosphate, and sulfur, and seed disinfection with Raxil fungicide. Seeds were sown at a target density of 450 seeds per square meter. Traits measured included phenological parameters (days to 50% flowering, days to physiological maturity), morphological traits (plant height, spike length, number of spikes per square meter), and yield-related traits (number of grains per spike, thousand-kernel weight, grain yield, and biological yield). Final harvest was performed on a two-square-meter area in each subplot, and grain and biomass were oven-dried at 75°C for 48 hours to determine yield on a zero-moisture basis. Data were statistically analyzed using SAS software, and means were compared with Duncan's multiple range test at the 5% probability level.

Results and Discussion

The results demonstrated that drought stress significantly affected several traits. Days to physiological maturity decreased from 251 under optimal irrigation to 249 under stress, reflecting shortened growth duration due to accelerated leaf senescence and reduced assimilate supply. Plant height was also significantly reduced under water deficit, with line 5013 being the tallest and line 5209 the shortest across treatments. In terms of yield components, the number of spikes per square meter was not markedly influenced by drought, as this trait is determined before flowering. In contrast, the number of grains per spike and thousand-kernel weight were directly affected by stress. Line 5005 exhibited the highest grain number per spike, while line 5220 had the lowest. Thousand-kernel weight declined across most genotypes under drought; however, line 5216 maintained relatively stable kernel weight with the smallest reduction, indicating superior tolerance. Grain yield, as the most critical trait, was reduced by an average of

1.57% under drought. This relatively mild reduction highlights the inherent tolerance of the genotypes tested. Line 5005 produced the highest yield under both conditions (9,213 and 9,044 kg ha^{-1} under optimal and stress conditions, respectively), followed by line 5216. In contrast, the cultivar Mihan and lines 5118 and 5220 recorded the lowest yields. Stress tolerance indices, including the Stress Tolerance Index (STI) and Geometric Mean Productivity (GMP), further confirmed line 5005 as the most stable and drought-tolerant genotype. Biological yield was also negatively affected by drought, but line 5216 maintained the highest biomass production, suggesting an ability to sustain vegetative growth even under reduced water availability. Overall, the findings reveal that genotypes adopted different adaptive strategies to cope with terminal drought. Line 5005 effectively maintained grain yield by mobilizing stem and leaf reserves, while line 5216 achieved stability through maintaining kernel weight and producing greater biomass. Conversely, the cultivar Mihan and some other lines exhibited more pronounced yield reductions, indicating their sensitivity to drought stress.

Conclusions

This study confirmed that the grain-filling stage is one of the most drought-sensitive phases in wheat, but the magnitude of yield reduction strongly depends on genotype. In general, drought stress decreased thousand-kernel weight and biomass, yet drought-tolerant lines minimized yield loss through physiological mechanisms such as efficient remobilization of stored assimilates and sustained photosynthesis. Among the studied genotypes, line 5005 was identified as the most superior and stable, combining high yield under both optimal and stressed conditions with favorable drought tolerance indices. This line can be recommended as an ideal candidate for cultivation in drought-prone areas and as a resistant parent in breeding programs. Additionally, line 5216, due to its ability to maintain kernel weight and biomass under stress, can serve as a complementary genotype in breeding schemes. Utilizing such drought-tolerant genotypes represents an effective strategy to ensure yield stability and sustainable wheat production under conditions of water scarcity and future climate variability.

فصلنامه علمی دانشگاه ملی مهارت
زمستان ۱٤۰٤، دوره ۲۲، شماره ٤، ۱٤۰-۱۵۹
آدرس نشریه: https://karafan.nus.ac.ir/
doi:10.48301/KSSA.2025.541588.3283

پاسخ لاین‌های منتخب گندم آبی و رقم تجاری میهن به قطع آبیاری در مرحله پر شدن دانه

اسمعیل نبی‌زاده[۱*]، پروانه شجاعی[۱]، خدیجه احمدی[۲]، علی قادری[۳]

۱- دانشکده کشاورزی، آب، غذا و فراسودمندها، واحد مهاباد، دانشگاه آزاد اسلامی، مهاباد، ایران.
۲- گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه شاهد، تهران، ایران.
۳- گروه علوم باغبانی، واحد شیروان، دانشگاه آزاد اسلامی، شیروان، ایران

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۷/۲۳
بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۸/۳۰
پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۹/۱۹

کلید واژگان:
تنش خشکی ترمینال
لاین‌های اصلاحی گندم
عملکرد دانه
شاخص تحمل تنش
میانگین هندسی بهره‌وری
عملکرد بیولوژیک

***نویسنده مسئول:** اسمعیل نبی‌زاده
پست الکترونیکی:
nabizadeh.esmaeil@gmail.com

چکیده

این پژوهش با هدف ارزیابی واکنش لاین‌های منتخب گندم آبی و رقم تجاری میهن به تنش خشکی ترمینال (قطع آبیاری در مرحله پر شدن دانه) در سال زراعی ۱۴۰۲-۱۴۰۳ در اراضی بوکان (اقلیم معتدل-سرد) انجام شد. آزمایش در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با آرایش کرت‌های خردشده و سه تکرار اجرا گردید. عامل اصلی شامل دو سطح آبیاری (مطلوب و قطع در پر شدن دانه) و عامل فرعی هفت ژنوتیپ (شش لاین: ۵۱۱۸، ۵۲۰۹، ۵۰۱۳، ۵۲۱۶، ۵۰۰۵، ۵۲۲۰ و رقم میهن) بود. تنش خشکی بر صفاتی مانند روز تا رسیدگی ($p<0.05$)، وزن هزار دانه ($p<0.05$)، عملکرد دانه و تعداد دانه در سنبله ($p<0.01$) تأثیر معنی‌دار داشت. اثر ژنوتیپ بر همه صفات جز شاخص برداشت معنی‌دار بود ($p<0.01$). لاین ۵۰۰۵ با عملکرد دانه ۹۲۱۳ کیلوگرم بر هکتار (مطلوب) و ۹۰۴۴ کیلوگرم بر هکتار (تنش)، تعداد دانه در سنبله ۶۴-۶۶، STI = ۹۱۴۰ و GMP =7/9176، مقاوم‌ترین ژنوتیپ شناسایی شد. لاین ۵۲۱۶ کمترین کاهش وزن دانه را تحت تنش نشان داد. میانگین کاهش عملکرد دانه ۱/۵۷٪ بود، که بیانگر تفاوت ژنوتیپی در پاسخ به تنش است. لاین ۵۰۰۵ برای کشت در مناطق خشک و برنامه‌های اصلاحی توصیه می‌شود.

مقدمه

در سطح جهانی، سطح زیر کشت گندم طی سال‌های اخیر حدود ۲۱۵ تا ۲۲۰ میلیون هکتار گزارش شده و تولید جهانی آن حدوداً به ۷۹۰ الی ۸۱۶ میلیون تن می‌رسد [۸]. این میزان تولید، نقش بی‌بدیلی در تأمین غذا و تعادل غذایی جمعیت جهان دارد. گندم همچنین یکی از مهم‌ترین منابع تأمین پروتئین گیاهی در کشورهای در حال توسعه است، به طوری که در بسیاری از مناطق فقیرنشین، تا ۶۰ درصد پروتئین غذایی از این محصول تأمین می‌شود [۷]. در ایران، سهم این محصول در تأمین نیاز کالری روزانه مردم چشمگیر است و طبق آمار وزارت جهاد کشاورزی، در سال‌های اخیر گندم همواره رتبه اول را در بین محصولات کشاورزی به خود اختصاص داده است. با وجود پتانسیل بالا، یکی از مهم‌ترین چالش‌های پیش روی تولید پایدار گندم، تغییرات اقلیمی و به‌ویژه تنش خشکی است. خشکسالی یکی از گسترده‌ترین و مخرب‌ترین تنش‌های غیرزیستی در مناطق خشک و نیمه‌خشک محسوب می‌شود و می‌تواند در تمامی مراحل رشد گیاه تأثیرگذار باشد [۲۱].

بیش از ۸۵ درصد از مساحت ایران در اقلیم خشک و نیمه‌خشک قرار دارد و این شرایط باعث شده که تولید گندم به شدت تحت تأثیر کمبود منابع آبی قرار گیرد، که در ایران تولید گندم حدوداً ۱۶ میلیون تن در سال بود[۱۳]. خشکسالی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین تنش‌های غیرزیستی، با ایجاد تغییرات گسترده در صفات مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی، رشد و تولید گندم را به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک به‌شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی در مراحل اولیه رشد و درک مکانیسم‌های ژنتیکی و فیزیولوژیکی مؤثر بر تحمل، گامی کلیدی در بهبود برنامه‌های اصلاحی و افزایش پایداری تولید گندم تحت شرایط کم‌آبی است [۱]. تأثیر خشکی به مرحله‌ای بستگی دارد که گیاه در آن با تنش مواجه می‌شود. مراحل جوانه‌زنی، گلدهی و پر شدن دانه حساس‌ترین مراحل به کم‌آبی هستند. تنش خشکی در این دوره‌ها منجر به کاهش یکنواختی جوانه‌زنی، رشد، تعداد دانه در سنبله، وزن هزار دانه و در نهایت کاهش عملکرد نهایی می‌شود [۱۱؛ ۱۴]. بسته‌شدن روزنه‌ها، کاهش کارایی فتوسنتزی، تسریع پیری برگ‌ها، کاهش انتقال مواد فتوسنتزی به دانه‌ها و چروکیدگی دانه از جمله پیامدهای مستقیم تنش خشکی در دوره پر شدن دانه است [۵].

در مناطق فاریاب که تأمین آب زراعی به منابع سطحی یا سفره‌های زیرزمینی وابسته است، اغلب کشاورزان با محدودیت شدید منابع آبی مواجه هستند. در این شرایط، گندم اغلب تحت تنش آبی قرار می‌گیرد و نیاز آبی گیاه به‌طور کامل تأمین نمی‌شود. شدت و تداوم تنش، نوع رقم، و شرایط خاک از عوامل تعیین‌کننده در میزان کاهش عملکرد هستند. بررسی‌ها نشان داده که استفاده از ارقام متحمل به خشکی، مدیریت دقیق آبیاری، و اصلاح الگوهای کشت می‌تواند تا حدود زیادی تأثیرات منفی تنش خشکی را کاهش دهد [۱۹]. تحقیقات فیزیولوژیکی و مرفولوژیکی نشان داده‌اند که برخی ویژگی‌ها نظیر عمق ریشه، نسبت سطح برگ، غلظت کلروفیل، و کارایی مصرف آب، ارتباط نزدیکی با تحمل به خشکی دارند [۱۳]. انتخاب ارقام مقاوم با بهره‌گیری از مطالعات ژنتیکی و فناوری‌های نوین مانند ژنوتیپینگ و سنجش از دور، افق‌های تازه‌ای را در اصلاح ارقام گندم برای مناطق خشک ایجاد کرده است. همچنین استفاده از بیوتکنولوژی برای انتقال ژن‌های مرتبط با تحمل به خشکی، از جمله راهبردهای نوین برای مقابله با چالش‌های اقلیمی در کشاورزی پایدار به شمار می‌آید [۳].

در این زمینه، شناخت دقیق‌تر از تأثیر مرحله‌ای تنش خشکی بر اجزای عملکرد گندم و تحلیل تفاوت‌های واکنشی بین ارقام مختلف، می‌تواند مبنای مناسبی برای برنامه‌ریزی‌های اصلاحی و مدیریتی باشد. هدف از پژوهش بررسی تأثیر خشکی در مراحل حساس رشدی گندم، به ارزیابی عملکرد ارقام مختلف در شرایط تنش آبی است.

روش انجام آزمایش

مشخصات آزمایش

این پژوهش مزرعه‌ای طی سال زراعی ۱۴۰۳-۱۴۰۲ در اراضی روستای ساری‌قامیش، از توابع مرکز جهاد کشاورزی سیمینه (مدیریت جهاد کشاورزی شهرستان بوکان) واقع در عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۸۴ دقیقه شمالی، طول جغرافیایی ۴۶ درجه و ۱۴ دقیقه شرقی و ارتفاع ۱۳۱۲ متر از سطح دریا اجرا گردید. میانگین بارندگی سالانه منطقه بوکان برابر با ۲۵۰ میلی‌متر بوده و بر اساس طبقه‌بندی اقلیمی آمبرژه، دارای اقلیم معتدل و سرد است. میزان کل بارش در طی سال زراعی انجام آزمایش ۳۵۹/۵ میلی متر، میانگین دمای بلند مدت ۱۲/۳ که در فصل زراعی آزمایش ۱۴/۷ درجه سانتی‌گراد بود (آمار هواشناسی سال زراعی ۱۴۰۳-۱۴۰۲شهرستان بوکان).

جدول ۱. آمار هواشناسی مزرعه تحقیقاتی در سال زراعی ۱۴۰۳-۱۴۰۲

سال و ماه	تبخیر ماهانه	مقدار بارندگی ماهانه	میانگین رطوبت ماهانه		دمای مطلق ماهانه		میانگین دمای ماهانه	
			حداکثر	حداقل	حداکثر	حداقل	حداکثر	حداقل
مهر ۴۰۲	۱۲۵	۲۴	۷۰	۲۰	۲۸/۵	۶	۱۸/۸	۸/۳
آبان ۴۰۲	۴۰	۴۸	۸۰	۵۵	۱۹/۵	-۰/۵	۱۶/۸	۱/۸
آذر ۴۰۲	۰	۴۰	۸۸	۶۰	۱۲/۵	-۶	۵	-۳/۵
دی ۴۰۲	۰	۳۴	۸۶	۵۲	۱۰/۵	-۱۴	۳/۸	-۷
بهمن ۴۰۲	۰	۳۸	۸۵	۵۵	۱۱	-۱۶	۳/۵	-۹/۵
اسفند ۴۰۲	۰	۴۴	۸۲	۵۰	۱۴	-۹/۵	۵/۲	-۴/۵
فروردین ۴۰۳	۵۲	۷۲	۷۸	۴۰	۲۱	-۱/۵	۱۵/۸	۲
اردیبهشت ۴۰۳	۱۶۰	۵۰	۷۴	۳۴	۲۷	۴/۵	۲۴/۶	۶
خرداد ۴۰۳	۲۳۰	۷	۶۴	۲۶	۳۳/۲	۸/۵	۲۹/۸	۱۰
تیر ۴۰۳	۲۸۲	۰	۵۸	۲۰	۳۹	۱۰/۵	۲۶/۴	۱۲/۶
مرداد ۴۰۳	۳۵۵	۰	۴۸	۱۸	۴۱	۱۳	۲۷/۶	۱/۲
شهریور ۴۰۳	۲۱۰	۰	۶۲	۲۲	۳۷	۱۱	۲۶	۹

نحوه اجرای آزمایش

پیش از آغاز عملیات زراعی، نمونه‌برداری خاک از اعماق ۰-۳۰ و ۳۰-۶۰ سانتی‌متر انجام و آزمون‌های فیزیکی و شیمیایی بر روی آن صورت گرفت تا به‌عنوان مبنای تعیین معادله کودی مناسب مورد استفاده قرار گیرد. عملیات آماده‌سازی زمین شامل شخم با گاوآهن برگردان‌دار و دیسک بوده و کوددهی پایه قبل از کاشت با مصرف ۶۵ کیلوگرم در هکتار کود اوره، ۲۲۰ کیلوگرم در هکتار کود سوپرفسفات تریپل و ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار کود گوگرد انجام پذیرفت. به‌منظور کنترل بیماری‌های قارچی بذرزاد، بذرها پیش از کاشت با قارچ‌کش تبوکونازول (دو در

هزار) ضدعفونی شدند. عملیات وجین در طول فصل رشد به‌صورت مکانیکی انجام گرفت و پایش آفات و بیماری‌ها به روش مدیریت تلفیقی صورت پذیرفت. به‌دلیل عدم مشاهده آلودگی شدید، از هیچ‌گونه قارچ‌کش یا حشره‌کش شیمیایی در طول فصل رشد استفاده نشد. نتایج آزمایش خاک مزرعه نشان داد که خاک مورد استفاده در این پژوهش از نوع لومی و در عمق ۰ تا ۳۰ سانتی‌متری بود. این خاک دارای درصد اشباع ۳۸ درصد و هدایت الکتریکی ۲/۱۴ دسی‌زیمنس بر متر بود. اسیدیته خاک برابر با ۸ بود و به‌عنوان خاکی قلیایی طبقه‌بندی می‌شود. میزان کربنات کلسیم در این خاک ۸ درصد و محتوای کربن آلی بسیار پایین (۰/۰۸ درصد) گزارش شد. همچنین، نیتروژن قابل جذب ۰/۰۱۷ درصد، فسفر قابل جذب ۸/۰۵ قسمت در میلیون و پتاسیم قابل جذب ۲۵۵ قسمت در میلیون اندازه‌گیری شد. از نظر بافت فیزیکی، خاک شامل ۳۴ درصد شن، ۴۱ درصد سیلت و ۲۴ درصد رس بود.

طرح آزمایش

آزمایش به‌صورت کرت‌های خرد شده در قالب طرح بلوک کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. عامل اصلی، محدودیت رطوبتی در دو سطح شامل شرایط مطلوب رطوبتی (S1) یعنی سه بار آبیاری در طی فصل رشد و شرایط محدودیت رطوبتی با قطع آبیاری در مرحله پر شدن دانه (S2) (مرحله زادکس GS 71-79) بود. عامل فرعی شامل هفت ژنوتیپ گندم آبی متشکل از شش لاین ۵۱۱۸، ۵۲۰۹، ۵۰۱۳، ۵۲۱۶، ۵۰۰۵ و ۵۲۲۰ و رقم میهن به‌عنوان شاهد بود. چینش تیمارها به‌صورت تصادفی در بلوک‌ها انجام شد. عملیات کاشت و اعمال تهیه شیمیایی خاک (بر اساس نتایج تجزیه خاک) دراواسط مهرماه ۱۴۰۲ و هر رقم در ۹ خط ۶ متری با فاصله خطوط ۲۰ سانتی متر و تراکم ۴۵۰ بذر در متر مربع انجام گرفت.

ارقام مورد بررسی

رقم میهن و لاین‌های منتخب دارای تنوع مورفولوژیک و ژنتیکی قابل توجه بودند. رقم میهن، معرفی‌شده توسط مؤسسه تحقیقات ثبت و گواهی بذر و نهال در سال ۱۳۸۹، از تیپ رشد زمستانه برخوردار است. میانگین روز تا سنبله‌دهی آن ۱۳۱ روز و تا رسیدگی فیزیولوژیک ۱۷۵ روز بوده و دوره پرشدن دانه ۴۴ روز به طول می‌انجامد. میانگین ارتفاع بوته این رقم ۸۴ سانتی‌متر بوده و از مقاومت مطلوبی در برابر خوابیدگی برخوردار است. رنگ دانه زرد کهربایی، میانگین وزن هزار دانه در شرایط نرمال ۴۳ گرم و تحت تنش ۳۴ گرم، درصد پروتئین ۱۱ درصد و عملکرد دانه در شرایط نرمال و تنش به ترتیب ۷۷۸۷ و ۵۹۶۷ کیلوگرم در هکتار از دیگر ویژگی‌های این رقم است (مؤسسه تحقیقات ثبت و گواهی بذر و نهال کرج). این رقم نسبت به بیماری زنگ زرد مقاوم، نسبت به زنگ قهوه‌ای نیمه‌مقاوم و نسبت به زنگ سیاه نیمه‌مقاوم تا نیمه‌حساس بوده و برای کشت در مناطق سردسیر مناسب می‌باشد. لاین‌های ۵۱۱۸، ۵۲۰۹، ۵۰۱۳، ۵۲۱۶، ۵۰۰۵ و ۵۲۲۰ از مرکز بین‌المللی سیمیت تهیه و برای شرایط اقلیمی معتدل و معتدل سرد اصلاح شده‌اند. کلیه بذور مورد استفاده از بخش تحقیقات غلات مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر استان آذربایجان غربی تأمین گردید.

نحوه اعمال تیمارها

تنش رطوبتی از آغاز مرحله پر شدن دانه تا رسیدگی فیزیولوژیک با قطع آبیاری اعمال گردید. میزان بذر مصرفی بر اساس تراکم هدف ۴۵۰ بذر در متر مربع و با توجه به وزن هزار دانه هر رقم تعیین و پس از توزین با

قارچ‌کش راکسیل (به نسبت دو در هزار) ضدعفونی شد. عملیات کاشت در اواسط مهرماه انجام شد و مزرعه در طول فصل رشد به‌صورت مکانیکی بدون استفاده از علف‌کش‌های شیمیایی وجین شد.

صفات مورد مطالعه

صفات ارزیابی‌شده شامل روز تا ۵۰ درصد گلدهی، روز تا رسیدگی فیزیولوژیک، ارتفاع بوته، طول خوشه با و بدون ریشک، تعداد سنبله در واحد سطح، تعداد دانه در سنبله، وزن هزار دانه، عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیک بود. ارتفاع بوته‌ها با برش گیاهان از سطح خاک و اندازه‌گیری طول آنها تعیین شد. طول خوشه‌ها پس از جداسازی، با و بدون ریشک اندازه‌گیری گردید. شمارش تعداد سنبله‌ها در واحد سطح از یک متر مربع در مرحله رسیدگی فیزیولوژیک انجام شد و تعداد دانه در سنبله با میانگین‌گیری از شمارش دانه‌های ۱۰ خوشه تصادفی محاسبه گردید. وزن هزار دانه با نمونه‌گیری تصادفی از عملکرد دانه هر کرت و شمارش هزار دانه به همراه توزین آنها به‌دست آمد. برداشت نهایی از دو متر مربع وسط هر کرت صورت گرفت و پس از جداسازی دانه و کاه، نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد خشک گردیدند تا عملکرد دانه بر اساس رطوبت صفر درصد محاسبه شود. عملکرد بیولوژیک نیز از مجموع وزن خشک سنبله و کاه محاسبه شد.

تجزیه‌های آماری

پس از جمع‌آوری داده‌ها، سپس تجزیه و تحلیل آماری با استفاده از نرم‌افزار SAS var 9.4 صورت گرفت. مدل آماری این آزمایش کرت‌های خرد شده در قالب طرح بلوک کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. مقایسه میانگین صفات با آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد انجام شد.

نتایج و بحث

روز تا ۵۰ درصد گلدهی

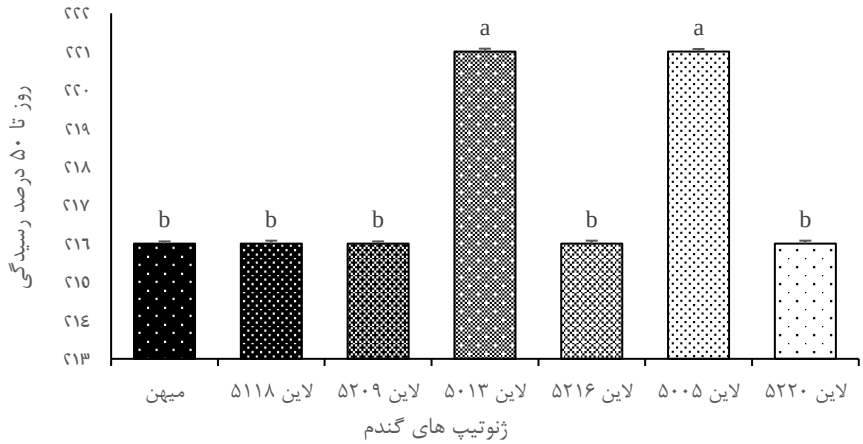
بر اساس نتایج تجزیه واریانس (جدول ۲)، اختلاف میان ژنوتیپ‌های مورد بررسی از نظر روز تا ۵۰ درصد گلدهی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. دامنه تغییرات این صفت در بین ژنوتیپ‌ها محدود و از ۲۱۶ تا ۲۲۱ روز بود. بیشترین طول دوره تا ۵۰ درصد گلدهی مربوط به لاین‌های ۵۰۱۳ و ۵۰۰۵ و کمترین آن متعلق به سایر لاین‌ها و رقم میهن بود. تفاوت میانگین این صفت بین ژنوتیپ‌ها حدود ۳/۲ درصد برآورد شد. طول دوره تا گلدهی به‌عنوان یک شاخص مهم فنولوژیک تحت کنترل ژنتیک و شرایط محیطی است. ژنوتیپ‌های دیرگلده معمولاً پتانسیل بالاتری برای انباشت ماده خشک دارند، اما در مناطق با خطر خشکی انتهای فصل، ممکن است به دلیل کاهش طول دوره پر شدن دانه، عملکرد نهایی کاهش یابد [۲۰]. در مقابل، ژنوتیپ‌های زودگلده با اجتناب از دوره‌های اوج تنش می‌توانند پایداری عملکرد بیشتری نشان دهند [۳]. نتایج این پژوهش تأیید می‌کند که تفاوت‌های ژنتیکی در این صفت می‌تواند ابزار مهمی در به‌نژادی برای سازگاری به خشکی باشد.

جدول ۲. تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثر تنش خشکی بر خصوصیات ارقام گندم

منابع تغییرات	درجه آزادی	روز تا ۵۰ درصد گلدهی	روز تا رسیدگی فیزیولوژیک	ارتفاع بوته (سانتی‌متر)
تکرار	۲	۰	۰	۲۱/۵
آبیاری	۱	۰	۴۲	۴۶/۰۹^{ns}

اصلی کرت خطای	۲	۰	۰	۲/۳۱
ژنوتیپ	۶	۷۱/۳۵**	۵/۷۱**	۳۲۸/۴۸**
آبیاری×ژنوتیپ	۶	۰	۰	۳/۰۴*
خطای کرت فرعی	۲۴	۰	۰	۱/۰۹
ضریب تغییرات (٪)	-	۰	۹/۷۱	۱/۱۱

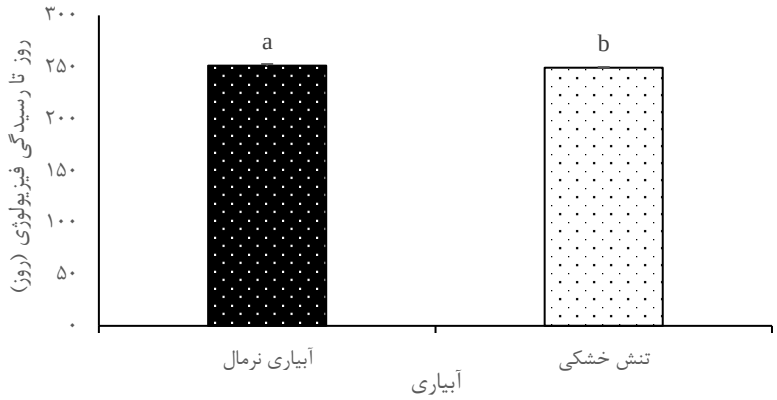
ns و * به ** ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد



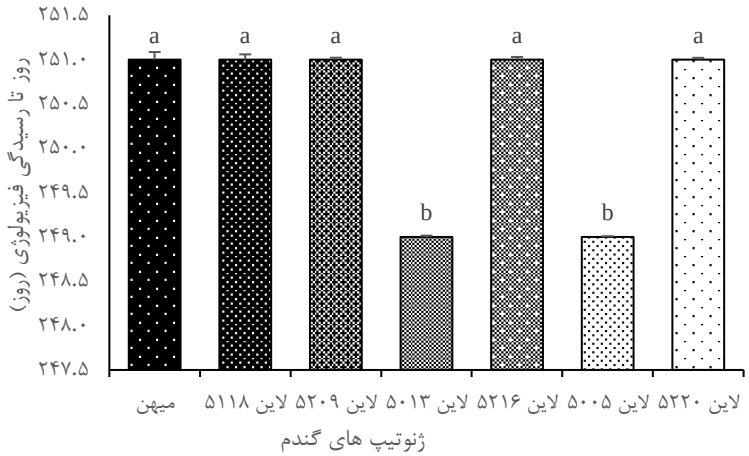
شکل ۱. مقایسه میانگین اثر لاین‌های گندم بر صفت روز تا ۵۰ درصد گلدهی (حروف یکسان نشان‌دهنده عدم‌وجود اختلاف معنی‌دار بین میانگین‌ها بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد با سه تکرار است)

روز تا رسیدگی فیزیولوژیک

تجزیه واریانس نشان داد که بین تیمارهای آبیاری از نظر روز تا رسیدگی فیزیولوژیک تفاوت معنی‌داری وجود داشت (جدول ۲). میانگین این صفت در شرایط نرمال آبیاری برابر با ۲۵۱/۴۲روز و در شرایط تنش خشکی برابر با ۲۴۹/۴۲ روز بود (شکل ۲). همچنین صرف‌نظر از تیمار آبیاری، تفاوت معنی‌داری بین لاین‌ها مشاهده شد. بیشترین مدت زمان تا رسیدگی فیزیولوژیک به رقم میهن و لاین‌های ۵۱۱۸، ۵۲۰۹، ۵۲۱۶ و ۵۲۲۰ اختصاص داشت، در حالی که لاین‌های ۵۰۱۳ و ۵۰۰۵ کمترین مدت زمان را نشان دادند (شکل ۳). کاهش طول دوره رشد در شرایط تنش خشکی، که در این مطالعه نیز مشاهده شد، اغلب به دلیل تسریع فرآیندهای پیری برگ و کاهش منبع فتوسنتزی است [۶]. کوتاه شدن دوره پر شدن دانه در این شرایط منجر به کاهش انتقال مواد فتوسنتزی به دانه می‌شود و در نتیجه عملکرد دانه افت می‌کند. شواهد اخیر نشان می‌دهد که انتخاب ژنوتیپ‌هایی با توازن بین طول دوره رشد و مقاومت به خشکی، کلید حفظ عملکرد در شرایط متغیر اقلیمی است [۶].



شکل ۲. مقایسه میانگین اثر تنش خشکی بر صفت روز تا رسیدگی فیزیولوژیک (حروف یکسان نشان‌دهنده عدم‌وجود اختلاف معنی‌دار بین میانگین‌ها بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد با سه تکرار است)

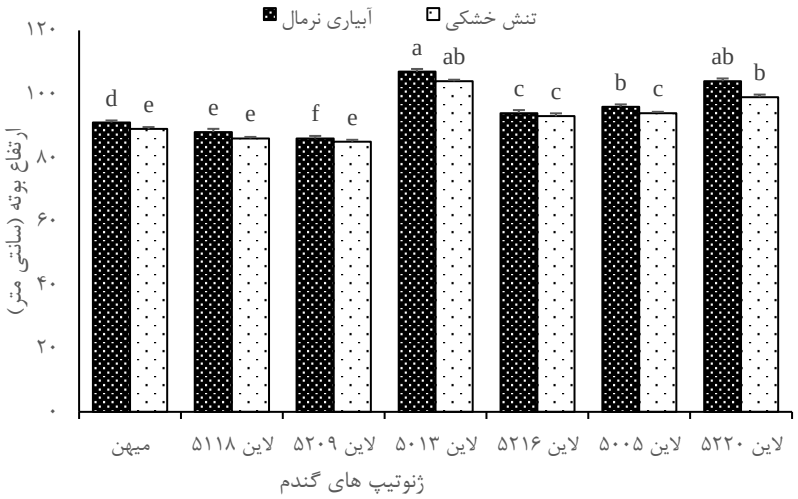


شکل ۳. مقایسه میانگین اثر لاین‌های گندم بر صفت روز تا رسیدگی فیزیولوژیک (حروف یکسان نشان‌دهنده عدم‌وجود اختلاف معنی‌دار بین میانگین‌ها بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد با سه تکرار است)

ارتفاع بوته

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۲) نشان داد که ارتفاع بوته تحت تأثیر ژنوتیپ و تیمار آبیاری در سطح احتمال یک درصد و همچنین اثر متقابل این دو عامل در سطح پنج درصد معنی‌دار بود. در هر دو شرایط آبیاری، بیشترین ارتفاع بوته به لاین ۵۰۱۳ تعلق داشت و در شرایط نرمال، لاین‌های ۵۲۲۰ و ۵۱۱۸ نیز به ترتیب با ۱۰۴، ۹۹ و ۹۷ سانتی‌متر جزو ژنوتیپ‌های پابلند بودند. کمترین ارتفاع بوته مربوط به لاین ۵۲۰۹ با میانگین ۸۵ سانتی‌متر بود (شکل ۴). ارتفاع بوته شاخصی است که علاوه بر کنترل ژنتیکی، تحت شرایط محیطی نیز دچار تغییر می‌شود.

یافته‌های تحقیقی نشان داد که تنش خشکی به‌طور معنی‌داری صفات فیزیولوژیکی و مورفولوژیکی مؤثر بر عملکرد گندم، از جمله ارتفاع بوته را کاهش می‌دهدژنوتیپ‌های G3 (L-1117)، G8 (L-120) و G12 (L-1142) به دلیل حفظ سطوح بالای راندمان فتوسنتزی، محتوای نسبی آب برگ و عملکرد دانه تحت تنش خشکی، به‌عنوان ژنوتیپ‌های متحمل و پایدار شناسایی شدند [۲]. همچنین تنش خشکی موجب کاهش صفات مورفولوژیکی از جمله ارتفاع بوته گیاه بالنگوی شهری شد [۱۸]، که با نتایج این آزمایش نیز مطابقت داشت. کاهش ارتفاع در شرایط تنش خشکی، همانند آنچه در این تحقیق مشاهده شد، می‌تواند راهبردی برای کاهش تبخیر و تعرق و هدایت منابع به سمت رشد زایشی باشد. تحقیقات اخیر نشان داده‌اند که ژنوتیپ‌های با ارتفاع متوسط در شرایط کم‌آبی، پایداری عملکرد بیشتری نسبت به ارقام پابلند دارند [۱۹]. این امر به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک اهمیت دارد که محدودیت رطوبت در مرحله پر شدن دانه رایج است [۱۶].



شکل ۴. مقایسه میانگین اثر متقابل تنش خشکی و لاین‌های گندم بر صفت ارتفاع بوته (حروف یکسان نشان‌دهنده عدم‌وجود اختلاف معنی‌دار بین میانگین‌ها بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد با سه تکرار است)

تعداد سنبله در مترمربع

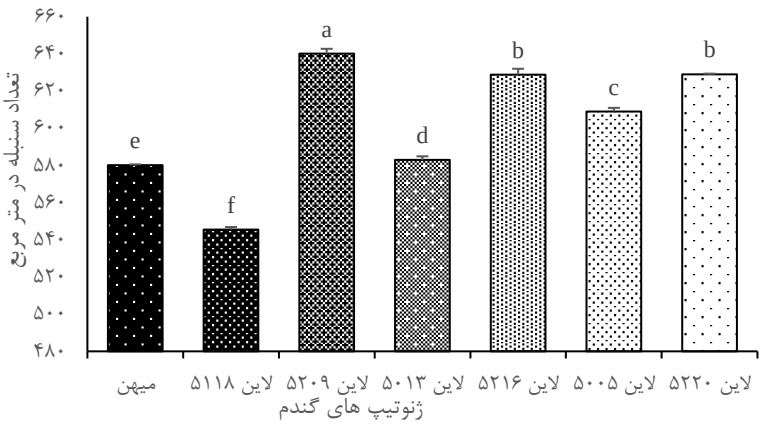
تعداد سنبله در مترمربع یکی از اجزای اصلی تعیین‌کننده عملکرد دانه است. بررسی ژنوتیپ‌ها نشان داد که اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد بین ارقام مختلف در تعداد سنبله در مترمربع وجود دارد. همچنین اثر متقابل رقم و آبیاری بر این صفت معنی‌دار نبود و تنش خشکی پس از گلدهی تاثیری بر تعداد سنبله در مترمربع نداشت، چرا که تعداد سنبله پیش از مرحله گلدهی تعیین می‌شود (جدول ۳). دامنه تغییرات این صفت بین ۵۴۵ تا ۶۴۰ سنبله در مترمربع بود، به‌طوری که بیشترین تعداد سنبله در لاین‌های ۵۲۰۹ (۶۴۰ سنبله)، ۵۲۲۰ (۶۲۹ سنبله) و ۵۲۱۶ (۶۲۸ سنبله) مشاهده شد و کمترین تعداد سنبله در لاین ۵۱۱۸ (۵۴۵ سنبله) بود. تعداد سنبله در واحد سطح در ارقام با عملکرد بالا تا حدودی افزایش داشت، هرچند در برخی لاین‌ها مانند ۵۱۱۸ با وجود عملکرد دانه بالا، تعداد سنبله نسبتا پایین بود. بر اساس نتایج، تیمارهای آبیاری تفاوت معنی‌داری در

تعداد سنبله در واحد سطح ایجاد نکردند. با وجود دامنه نسبتاً وسیع تغییرات میان ژنوتیپ‌ها، تعداد سنبله در شرایط تنش خشکی تقریباً ثابت باقی ماند (شکل ۵). تعداد سنبله در مترمربع و تعداد دانه در سنبله از اجزای اصلی عملکرد دانه هستند و نقش کلیدی در تعیین عملکرد نهایی دارند. بررسی‌ها نشان داد که تعداد سنبله بیشتر تحت کنترل ژنتیکی است و عمدتاً پیش از مرحله گلدهی تعیین می‌شود، بنابراین تغییرات محیطی بعد از گلدهی، از جمله تنش خشکی، اثر قابل توجهی بر این صفت ندارد [۱۴].

جدول ۳. تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثر تنش خشکی بر عملکرد و اجزای عملکرد دانه ارقام گندم

منابع تغییرات	درجه آزادی	تعداد سنبله در مترمربع	تعداد دانه در سنبله	وزن هزار دانه (گرم)	عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار)	عملکرد بیولوژیک(کیلوگرم در هکتار)	شاخص برداشت (٪)
تکرار	۲	۰/۳۱	۲/۱۶	۰/۰۴	۳۲۶۱/۲۳	۷۵۲۶۲۵/۶۴	۵/۴۵
آبیاری	۱	۶۹/۴۲ ns	۶۶/۸۸**	۶/۰۲*	۲۹۴۸۴۱/۹۲**	۲۰۱۲۰۵/۹۲ ns	۳/۶۴ ns
خطای کرت اصلی	۲	۹/۵۰	۰/۱۶	۰/۱۰	۲۳۲۴/۸۵	۱۰۶۲۲۱۹/۵۰	۱۱/۱۶
ژنوتیپ	۶	۶۹۸۴/۲۷**	۴۶۰/۳۵**	۴۶/۳۰**	۳۵۹۴۹۷۴/۲۰**	۱۰۱۶۵۲۲۲/۴۲**	۷/۲۶ ns
آبیاری×ژنوتیپ	۶	۲/۲۰ ns	۳/۲۱*	۰/۰۸*	۱۴۷۲۶/۶۹**	۱۶۲۸۹۲/۰۹ ns	۲/۲ ns
خطای کرت فرعی	۲۴	۱/۵۷	۰/۹۱	۰/۰۳	۳۲۵۰/۵۴	۴۵۹۹۱۸/۴۸	۴/۱
ضریب تغییرات (٪)	-	۰/۲۱	۱/۸۹	۰/۳۹	۰/۷۲	۴/۱۹	۴/۱۳

ns و * به ** ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد

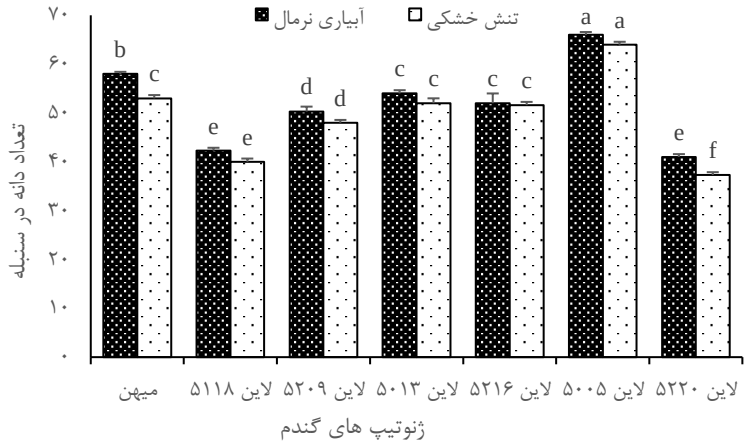


شکل ۵. مقایسه میانگین اثر لاین‌های گندم بر صفت تعداد سنبله در متر مربع (حروف یکسان نشان‌دهنده عدم‌وجود اختلاف معنی‌دار بین میانگین‌ها بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد با سه تکرار است)

تعداد دانه در سنبله

تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر آبیاری و ژنوتیپ بر تعداد دانه در سنبله در سطح ۱ درصد و اثر متقابل آبیاری و ژنوتیپ در سطح ۵ درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). تنش خشکی باعث کاهش تعداد دانه در سنبله در

رقم میهن و لاین ۵۲۲۰ شد. بیشترین تعداد دانه در سنبله در لاین ۵۰۰۵ و کمترین آن در لاین ۵۲۲۰ مشاهده شد. رابطه بین تعداد سنبله در واحد سطح و تعداد دانه در سنبله اغلب منفی است؛ برای مثال لاین ۵۰۰۵ با وجود تعداد سنبله کمتر، تعداد دانه در سنبله بالاتری داشت، در حالی که لاین ۵۲۰۹ تعداد سنبله بالاتر و تعداد دانه کمتر داشت. لاین ۵۲۱۶ هر دو صفت تعداد سنبله و تعداد دانه در سنبله را به‌طور نسبی بالا نشان داد. نتایج نشان داد که تعداد دانه در سنبله نیز پیش از مرحله گلدهی تعیین می‌شود و تنش خشکی پس از گلدهی اثر معناداری بر این صفت ندارد، هرچند کاهش در برخی لاین‌ها ممکن است به دلیل محدودیت منابع اختصاص یافته به دانه‌ها باشد (شکل ۶). همچنین، کاهش تعداد دانه در سنبله در شرایط تنش خشکی تأیید شده است؛ برای مثال، مطالعه‌ای نشان داد که تنش در مرحله حساس گلدهی می‌تواند منجر به کاهش معنی‌دار تعداد دانه در سنبله شود [۲۷]. همچنین، خشکی در آغاز فصل رشد نیز عملکرد دانه و تعداد دانه در سنبله را کاهش می‌دهد [۱۰]، که با نتایج این مطالعه نیز هم‌خوانی دارد.

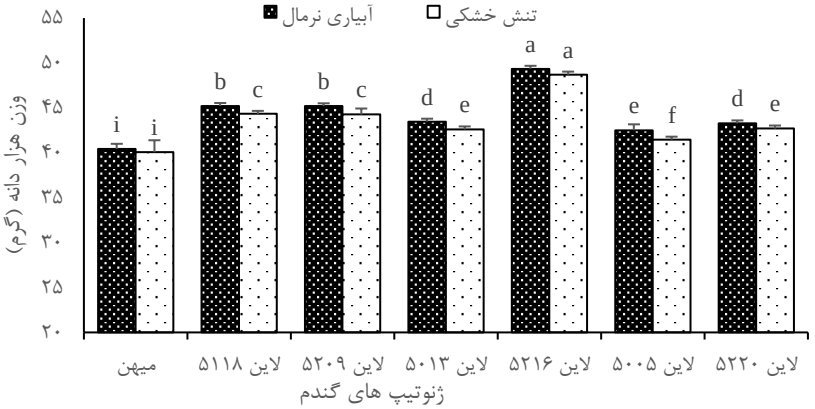


شکل ۶. مقایسه میانگین اثر متقابل تنش خشکی و لاین‌های گندم بر صفت تعداد دانه در سنبله (حروف یکسان نشان‌دهنده عدم‌وجود اختلاف معنی‌دار بین میانگین‌ها بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد با سه تکرار است)

وزن هزار دانه

وزن هزار دانه یکی از مهم‌ترین اجزای عملکرد دانه در گندم است و به‌شدت تحت تأثیر شرایط محیطی، به‌ویژه تنش خشکی پس از گلدهی قرار می‌گیرد. در این پژوهش، تنش خشکی منجر به کاهش معنی‌دار وزن هزار دانه شد که با نتایج مطالعات پیشین مطابقت دارد (جدول ۳). نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که لاین ۵۲۱۶ با حفظ نسبی وزن هزار دانه تحت تنش خشکی با میانگین ۴۸/۷ گرم نسبت به میانگین آبیاری نرمال ۴۹/۳۵ گرم، از کارایی بالاتری در استفاده از منابع فتوسنتزی برخوردار است و می‌تواند در برنامه‌های اصلاحی گندم برای مناطق خشک و نیمه‌خشک مورد استفاده قرار گیرد. به دنبال آن ژنوتیپ‌های لاین ۵۱۱۸ و ۵۲۰۹ نیز در دو شرایط آبیاری و تنش وزن هزار دانه بالایی داشتند. در بین ژنتویپ‌های مورد مطالعه لاین ۵۲۲۰ کمترین وزن هزار دانه را داشت (شکل ۷). کاهش وزن دانه تحت تنش معمولاً ناشی از کوتاه شدن دوره پر شدن دانه، کاهش فتوسنتز

خالص در اثر بسته‌شدن روزنه‌ها، و کاهش انتقال آسیمیلات‌ها از اندام‌های منبع مانند برگ و ساقه به دانه است. در شرایط خشکی، گیاه برای حفظ بقا، منابع محدود کربوهیدراتی را به اندام‌های رویشی تخصیص داده و در نتیجه، رشد و پر شدن دانه محدود می‌شود [۲۳]. با این حال، لاین ۵۲۱۶ کمترین کاهش را در وزن هزار دانه نشان داد که بیانگر کارایی بالاتر در بازانتقال مواد ذخیره‌شده در ساقه و پرچم به دانه است. این مکانیسم به‌عنوان یکی از ویژگی‌های کلیدی سازگاری با خشکی شناخته می‌شود و معمولاً در ژنوتیپ‌های مقاوم مشاهده می‌گردد. از سوی دیگر، اثر معنی‌دار برهم‌کنش ژنوتیپ × محیط (G×E) بیانگر تفاوت ژنتیکی در واکنش ژنوتیپ‌ها به تنش بود. در بسیاری از موارد، بین اجزای عملکرد موازنه ای وجود دارد؛ به‌گونه‌ای که کاهش وزن هزار دانه ممکن است با افزایش تعداد دانه در سنبله یا تعداد سنبله در واحد سطح همراه باشد. چنین موازنه‌ای در پاسخ به محدودیت منبع فتوسنتزی می‌تواند استراتژی سازگاری گیاه برای حفظ عملکرد کلی در شرایط تنش باشد [۳].

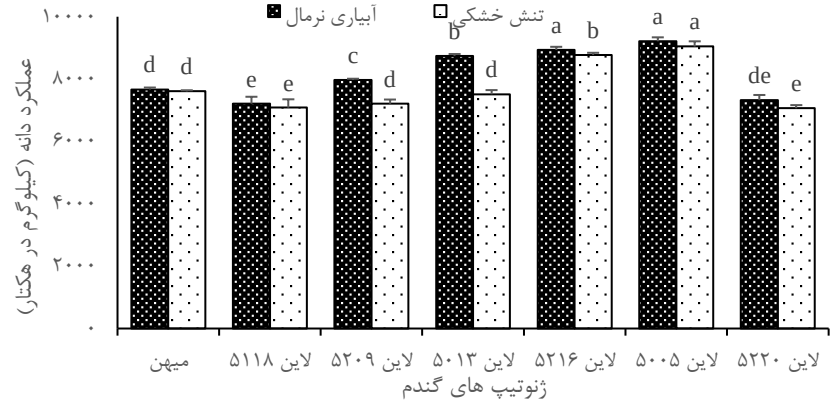


شکل ۷. مقایسه میانگین اثر متقابل تنش خشکی و لاین‌های گندم بر صفت وزن هزار دانه (حروف یکسان نشان‌دهنده عدم‌وجود اختلاف معنی‌دار بین میانگین‌ها بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد با سه تکرار است)

عملکرد دانه

تجزیه واریانس نشان داد که اثر تیمار آبیاری، ژنوتیپ و اثر متقابل ژنوتیپ × آبیاری بر عملکرد دانه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). لاین‌های ۵۰۰۵ و ۵۲۱۶ به‌ترتیب با میانگین‌های ۹۲۱۳/۳ و ۸۹۳۵/۳ کیلوگرم در هکتار در شرایط نرمال و ۹۰۴۴/۳ و ۸۷۷۷/۶ کیلوگرم در هکتار در شرایط تنش، بالاترین عملکرد را داشتند. در مقابل، لاین ۵۱۱۸ در شرایط نرمال (۷۲۱۰/۳ کیلوگرم در هکتار) و لاین‌های ۵۱۱۸ و ۵۲۲۰ در شرایط تنش (به‌ترتیب ۷۰۶۵/۶ و ۷۰۸۵ کیلوگرم در هکتار) کمترین عملکرد را نشان دادند (شکل ۸). میانگین کاهش عملکرد دانه در اثر تنش خشکی حدود ۱/۵۷ درصد بود. واکنش متفاوت ژنوتیپ‌ها به تنش نشان داد که لاین‌های پابلند (مانند ۵۰۱۳ و ۵۲۲۰) و یک لاین پاکوتاه (۵۲۰۹) کمترین درصد کاهش عملکرد را داشتند که احتمالاً به توانایی بهتر در استفاده از مواد ذخیره‌شده در ساقه مربوط می‌شود. همچنین، رابطه مستقیمی بین کاهش وزن هزار دانه و کاهش عملکرد دانه مشاهده شد؛ به‌طوری که رقم میهن و لاین ۵۲۲۰ بیشترین کاهش را در هر دو صفت داشتند، در حالی که لاین ۵۰۰۵ کمترین کاهش را نشان داد. عملکرد دانه در گندم نتیجه تعادل

پیچیده بین جذب مواد فتوسنتزی، توزیع آن‌ها به مخازن و توانایی گیاه در استفاده از ذخایر ساخته‌شده در دوره رشد رویشی است (شکل ۸). کاهش عملکرد در شرایط تنش خشکی پس از گلدهی، عموماً ناشی از کاهش فتوسنتز جاری و وابستگی بیشتر به مواد مخزن است. در این مطالعه، کاهش متوسط عملکرد نشان‌دهنده تأثیر نسبتاً خفیف تنش در این آزمایش است، احتمالاً به دلیل مدیریت مناسب تیمار آبیاری یا مقاومت ژنتیکی ژنوتیپ‌ها باشد.



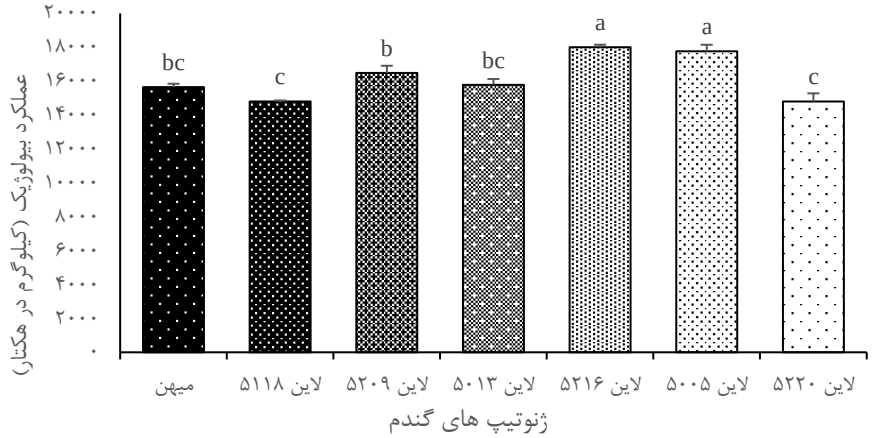
شکل ۸. مقایسه میانگین اثر متقابل تنش خشکی و لاین‌های گندم بر صفت عملکرد دانه (حروف یکسان نشان‌دهنده عدم‌وجود اختلاف معنی‌دار بین میانگین‌ها بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد با سه تکرار است)

یافته‌های مبنی بر عملکرد بالاتر لاین‌های ۵۰۰۵ و ۵۲۱۶ در شرایط تنش، با مطالعات اخیر در مورد ژنوتیپ‌های مقاوم به خشکی که دارای توانایی بالای انتقال مواد مخزن هستند، همخوانی دارد [۳]. این توانایی به‌ویژه در ژنوتیپ‌های پاکوتاه یا نیمه‌پاکوتاه بهبود یافته است، اما در این مطالعه، برخی لاین‌های پابلند (مانند ۵۲۲۰) نیز عملکرد مناسبی داشتند که می‌تواند به ژنتیک خاص یا توانایی فیزیولوژیکی آن‌ها در حفظ فتوسنتز تحت تنش مرتبط باشد. این موضوع با گزارش‌هایی که نشان می‌دهند ارتفاع ساقه لزوماً تعیین‌کننده عملکرد تحت تنش نیست، بلکه تعامل بین ارتفاع، توانایی مخزن و راندمان مصرف آب است. همچنین، ارتباط مستقیم بین کاهش وزن دانه و کاهش عملکرد دانه، بیانگر اهمیت حفظ وزن دانه به عنوان یک استراتژی کلیدی در تحمل خشکی است. در شرایطی که فتوسنتز جاری کاهش می‌یابد، ژنوتیپ‌هایی که قادر به تخلیه کارآمد ذخایر ساقه هستند، عملکرد پایدارتری دارند [۲۲]. بنابراین، انتخاب ژنوتیپ‌هایی با توانایی بالای انتقال مجدد مواد مخزن، به‌ویژه در مناطق با خشکسالی دوره‌ای، می‌تواند یک استراتژی اصلاحی مؤثر باشد.

عملکرد بیولوژیک

تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر ژنوتیپ بر عملکرد بیولوژیک در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). بیشترین عملکرد بیولوژیک به‌ترتیب متعلق به لاین‌های ۵۲۱۶ و ۵۰۰۵ بود، در حالی که کمترین مقدار آن مربوط به لاین‌های ۵۱۱۸ و ۵۲۲۰ ثبت شد. رقم میهن و لاین‌های ۵۱۱۸ و ۵۰۱۳ از نظر عملکرد بیولوژیک تفاوت آماری معنی‌داری نداشتند. افزایش عملکرد بیولوژیک در لاین ۵۲۱۶ احتمالاً ناشی از کاهش انتقال مواد مجدد در شرایط تنش و حفظ بیشتر بیوماس در اندام‌های رویشی است (شکل ۹). این یافته با نتایج

پژوهش‌های اخیر هم‌خوانی دارد؛ به‌گونه‌ای که محققین گزارش کردند ژنوتیپ‌های مختلف در مواجهه با تنش خشکی، واکنش‌های فیزیولوژیکی و عملکردی متفاوتی نشان می‌دهند که بیانگر نقش مؤثر تفاوت‌های ژنتیکی در حفظ یا کاهش عملکرد بیولوژیک است [۱۲]. همچنین، در بررسی فرآیندهای زیستی مؤثر بر عملکرد محصول گزارش دادند که بازتخصیص مواد فتوسنتزی و کارایی حفظ بیوماس در اندام‌های رویشی از عوامل کلیدی در پایداری عملکرد تحت شرایط تنش هستند [۴]. بر همین اساس، افزایش عملکرد بیولوژیک در برخی ژنوتیپ‌ها احتمالاً ناشی از کاهش انتقال مجدد مواد و حفظ بیشتر بیوماس در بافت‌های رویشی است، که این موضوع پیش‌تر نیز به‌عنوان سازوکاری برای تحمل تنش و حفظ پتانسیل تولید در گیاهان گزارش شده است.



شکل ۹. مقایسه میانگین اثر لاین‌های گندم بر صفت عملکرد بیولوژیک (حروف یکسان نشان‌دهنده عدم‌وجود اختلاف معنی‌دار بین میانگین‌ها بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد با سه تکرار است)

کاهش آبیاری پس از گلدهی منجر به کاهش بیوماس کل گیاه شد که این امر ناشی از پیری زودرس اندام‌های فتوسنتزکننده و کاهش فتوسنتز جاری است. مطالعات گذشته نیز کاهش عملکرد بیولوژیک تحت تنش خشکی را گزارش کرده‌اند [۱۵]. عملکرد بیولوژیک (زیست‌توده کل گیاه) یک شاخص کلیدی در ارزیابی رشد و توسعه گیاه گندم است و تحت تأثیر مستقیم تنش خشکی، به‌ویژه در مراحل پس از گلدهی، قرار می‌گیرد. نتایج این مطالعه که نشان می‌دهد تنش خشکی منجر به کاهش زیست‌توده می‌شود [۲۵]. این کاهش عمدتاً ناشی از کاهش سطح برگ، پیری زودرس، کاهش فتوسنتز جاری و تأخیر در رشد اندام‌های هوایی است. لاین ۵۲۱۶ که بالاترین عملکرد بیولوژیک را داشت، ممکن است به دلیل تأخیر در پیری و حفظ فتوسنتز جاری در شرایط تنش، بیوماس بیشتری تولید کرده باشد. این ویژگی در ژنوتیپ‌های مقاوم به خشکی شناخته شده و به عنوان یک راهکار تحمل تنش در نظر گرفته می‌شود [۲۶]. همچنین، کاهش انتقال مواد مجدد از ساقه به دانه در این لاین، ممکن است منجر به تجمع بیشتر بیوماس در اندام‌های رویشی شود که در شرایط نرمال مطلوب است، اما در شرایط تنش ممکن است به معنای عدم بهینه‌سازی توزیع مواد فتوسنتزی باشد. با این حال، در شرایط تنش، بالا بودن عملکرد بیولوژیک لزوماً به معنای عملکرد دانه بالاتر نیست. بنابراین، انتخاب ژنوتیپ‌هایی که هم زیست‌توده بالایی دارند و هم توانایی بالایی در تبدیل آن به دانه، می‌تواند به افزایش عملکرد نهایی منجر شود [۲۶].

شاخص برداشت

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر متقابل تیمار آبیاری و ژنوتیپ بر شاخص برداشت معنی‌دار نبود (جدول ۳). این موضوع بیانگر آن است که ژنوتیپ‌ها از نظر کارایی تخصیص مواد فتوسنتزی به دانه، واکنش مشابهی به تنش خشکی نشان دادند. احتمالاً علت این امر یکنواختی نسبی پاسخ فیزیولوژیکی ژنوتیپ‌ها به تنش بوده است؛ به‌طوری‌که اگرچه عملکرد دانه و زیست‌توده در هر دو شرایط کاهش یافت، نسبت آن‌ها (HI) در بیشتر ژنوتیپ‌ها در محدوده‌ای نزدیک به هم باقی ماند. از دیدگاه فیزیولوژیکی، در شرایط تنش خشکی معمولاً هم رشد رویشی و هم رشد زایشی کاهش می‌یابد، و چون هر دو مؤلفه در شاخص برداشت نقش دارند، کاهش هم‌زمان آن‌ها ممکن است منجر به عدم بروز تفاوت معنی‌دار آماری در HI شود. از سوی دیگر، ضریب تغییرات نسبتاً بالا و دامنه تغییر محدود در مقادیر HI نیز می‌تواند از نظر آماری موجب کاهش حساسیت آزمون و در نتیجه عدم معنی‌داری شود. در مجموع، به نظر می‌رسد که تنش خشکی موجب کاهش نسبی در شاخص برداشت شده، اما شدت واکنش در ژنوتیپ‌های مختلف آن‌قدر متفاوت نبوده است که از نظر آماری معنی‌دار گردد.

شاخص فرناندز

برای ارزیابی مقاومت ژنوتیپ‌ها به تنش خشکی، از شاخص‌های STI (شاخص تحمل تنش) و GMP (میانگین هندسی عملکرد) استفاده شد. این شاخص‌ها ژنوتیپ‌ها را به چهار گروه تقسیم می‌کنند: A (عملکرد بالا در هر دو شرایط)، B (عملکرد بالا فقط در شرایط نرمال)، C (عملکرد بالا فقط در تنش)، و D (عملکرد پایین در هر دو شرایط). بر اساس نتایج (جدول ۴)، لاین ۵۰۰۵ با بالاترین مقادیر STI ۹۱۴۰ کیلوگرم در هکتار و GMP ۹۱۷۶/۷ کیلوگرم در هکتار در گروه A قرار گرفت و به عنوان مقاوم‌ترین ژنوتیپ به تنش خشکی در مرحله پر شدن دانه شناسایی شد.

جدول ۴. شاخص‌های تحمل به تنش (STI) و معیار میانگین هندسی بهره‌وری (GMP) رقم ولاین‌ها

ژنوتیپ‌ها	میهن	لاین۵۱۱۸	لاین۵۲۰۹	لاین۵۰۱۳	لاین۵۲۱۶	لاین۵۰۰۵	لاین۵۲۲۰
Ypنرمال	۷۶۸۵	۷۱۸۲	۷۹۸۲	۷۸۲۳	۸۹۶۳	۹۲۵۰	۷۳۲۰
Ysتنش	۷۷۴۵	۷۰۴۲	۷۹۳۲	۷۴۲۳	۸۸۲۷	۹۱۰۴	۷۱۲۴
ȲPنرمال	۷۶۶۶	۷۲۱۰	۷۹۷۴	۷۸۴۶	۸۹۳۵	۹۲۱۳	۷۳۲۳
Ȳsتنش	۷۶۰۸	۷۰۸۵	۷۹۰۳	۷۵۱۳	۸۷۷۶	۹۰۴۴	۷۰۶۵
GMP	۷۷۱۴	۷۱۱۱/۲	۷۹۵۶/۹	۷۶۲۰/۳	۸۳۸۳/۸	۹۱۷۶/۷	۷۲۲۱/۳
STI	۷۷۶۴	۷۰۱۴	۷۹۳۹	۸۸۵۴	۸۸۵۴	۹۱۴۰	۷۱۲۱

شاخص‌های STI و GMP از جمله معیارهای پرکاربرد در اصلاح گیاهان برای شناسایی ژنوتیپ‌های پایدار و مقاوم به تنش هستند. STI بر اساس عملکرد در شرایط نرمال و تنش محاسبه می‌شود و ژنوتیپ‌هایی با مقدار بالای STI، هم در محیط‌های مطلوب و هم نامطلوب عملکرد بالایی دارند [۹]. در این مطالعه، لاین ۵۰۰۵ با بالاترین مقادیر این شاخص‌ها، به عنوان یک ژنوتیپ پایدار و متحمل شناسایی شد. این یافته با مطالعات اخیر نیز همخوانی دارد که نشان می‌دهند ژنوتیپ‌هایی با عملکرد بالا در هر دو محیط، معمولاً دارای توانایی بالایی در تنظیم اسمزی، حفظ فتوسنتز و استفاده کارآمد از آب هستند [۲۴]. استفاده از شاخص‌های چندمحیطی مانند STI و GMP، از انتخاب اشتباه ژنوتیپ‌هایی که فقط در شرایط مطلوب عمل می‌کنند، جلوگیری می‌کند. بنابراین،

لاین ۵۰۰۵ به عنوان یک انتخاب ایده‌آل برای کشت در مناطق با نوسانات آب‌وهوایی و تنش‌های خشکی دوره‌ای معرفی می‌شود و می‌تواند در برنامه‌های اصلاحی بعدی به عنوان والد مقاوم مورد استفاده قرار گیرد.

نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق نشان داد که واکنش ژنوتیپ‌های گندم به تنش خشکی پس از گلدهی، به‌طور قابل‌توجهی تحت تأثیر ویژگی‌های ژنتیکی آن‌ها قرار دارد. کاهش عملکرد در اثر قطع آبیاری عمدتاً ناشی از افت وزن هزار دانه بود و ژنوتیپ‌هایی که توانایی بیشتری در حفظ این صفت داشتند، پایداری عملکرد بالاتری نشان دادند. لاین‌های ۵۰۰۵ و ۵۲۱۶ با عملکرد بالا در هر دو شرایط آبیاری و تنش، به‌عنوان گزینه‌های مناسب برای کشت در مناطق با خطر خشکی انتهای فصل شناسایی شدند. به‌کارگیری شاخص‌های چندمحیطی مانند STI و GMP ابزاری مؤثر برای شناسایی ژنوتیپ‌های پایدار و متحمل به خشکی است و می‌تواند در برنامه‌های اصلاحی گندم با هدف سازگاری به شرایط اقلیمی متغیر مورد استفاده قرار گیرد. با توجه به تشدید پدیده‌های اقلیمی و افزایش فراوانی خشکسالی‌های انتهای فصل در بسیاری از مناطق کشت گندم ایران، یافته‌های این پژوهش می‌تواند به‌عنوان پایه‌ای برای توسعه ارقام مقاوم و پایدار در آینده مورد استفاده قرار گیرد. لاین‌های شناسایی‌شده نه‌تنها از نظر عملکرد، بلکه از جنبه حفظ کیفیت دانه تحت تنش نیز شایستگی لازم را دارند و می‌توانند در برنامه‌های کشت هوشمند و مدیریت منابع آب در سیستم‌های کشاورزی کم‌آب مورد توجه قرار گیرند. همچنین، پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی، مکانیسم‌های فیزیولوژیکی و مولکولی پشت پایداری این لاین‌ها به‌ویژه در مسیرهای تخصیص کربن و حفظ فعالیت آنزیم‌های مرتبط با پر شدن دانه مورد بررسی دقیق‌تری قرار گیرد تا بتوان از آن‌ها به‌عنوان والدین اصلاحی در برنامه‌های نوین گندم‌کاری استفاده کرد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله بر خود لازم می‌دانند از همکاری و حمایت‌های مسئولین دانشکده کشاورزی و کارشناسان آزمایشگاه‌های دانشگاه آزاد اسلامی واحد مهاباد که در مراحل مختلف اجرای این پژوهش نهایت همکاری را مبذول داشتند، صمیمانه قدردانی نمایند.

References

[1]. Ahmed, A. A. M., Dawood, M. F. A., Elfarash, A., Mohamed, E. A., Hussein, M. Y., Börner, A., & Sallam, A. (2022). Genetic and morpho-physiological analyses of the tolerance and recovery mechanisms in seedling stage spring wheat under drought stress. *Frontiers in Genetics*, 13, 1010272. https://doi.org/10.3389/fgene.2022.1010272

[2]. Alshaharni, M. O., Safhi, F. A., Al Aboud, N. M., Kucher, D. E., Fayad, E., Alqurashi, M., Al-Qthanin, R. N., Almami, I. S. M., Ghamry, H. I., El-Moneim, D. A., Kamara, M. M., & Ali, A. M. (2025). Genetic variability and trait associations for physiological and agronomic characteristics in bread wheat genotypes under drought stress and well-watered conditions. *PeerJ*, 13, e19341. https://doi.org/10.7717/peerj.19341

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

[4]. Burgess, A. J., Retkute, R., Pound, M. P., Foulkes, J., & Murchie, E. H. (2022). Improving crop yield potential: Underlying biological processes and future prospects. Food and Energy Security, 11(2), e400. https://doi.org/10.1002/fes3.400

[5]. Camaille, M., Fabre, N., Clément, C., & Ait Barka, E. (2021). Advances in wheat physiology in response to drought and the role of plant growth promoting rhizobacteria to trigger drought tolerance. *Microorganisms*, 9(4), 687. https://doi.org/10.3390/microorganisms9040687

[6]. Chowdhury, M., Kaium, M. A., Hasan, M. M., Bahadur, M. M., Islam, M. R., Hakim, M. A., Iqbal, M. A., Javed, T., Raza, A., Shabbir, R., Sorour, S., et al. (2021). Evaluation of Drought Tolerance of Some Wheat (Triticum aestivum L.) Genotypes through Phenology, Growth, and Physiological Indices. *Agronomy*, 11(9), 1792. https://doi.org/10.3390/agronomy11091792

[7]. Dadrasi, A., Chaichi, M., Nehbandani, A., Sheikhi, A., Salmani, F., & Nemati, A. (2023). Addressing food insecurity: An exploration of wheat production expansion. *PLoS One*, 18(12), e0290684. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0290684 (In Persian)

[8]. FAO. (2023). FAOSTAT Statistical Database. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Retrieved from http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC

[9]. Fernandez, G. C. J. (1992). Effective Selection Criteria for Assessing Plant Stress Tolerance. In C. G. Kuo (Ed.), Proceedings of the International Symposium on Adaptation of Vegetables and Other Food Crops in Temperature and Water Stress (pp. 257–270). Tainan, Taiwan: AVRDC.

[10]. Figueroa-Bustos, V., Palta, J. A., Chen, Y., & Siddique, K. H. M. (2019). Early Season Drought Largely Reduces Grain Yield in Wheat Cultivars with Smaller Root Systems. *Plants (Basel)*, 8(9), 305. https://doi.org/10.3390/plants8090305

[11]. Ghaderi, A., Moghaddam, M., & Rezvan, S. (2025). Mejora de las características de germinación de las semillas de Stevia rebaudiana Bertoni bajo estrés por sequía mediante acondicionamiento de semillas. *Karafan Journal*, e220678. https://doi.org/10.48301/kssa.2024.482318.3019

[12]. Habib Abadi, H., Sadeghi, F., Moradi, M., & Rahimi, M. (2025). Impact of drought stress memory and variations in type and timing of stress on genotypes. BMC Plant Biology, 25, 261. https://doi.org/10.1186/s12870-025-07261-8

[13]. Khadka, K., Earl, H. J., Raizada, M. N., & Navabi, A. (2020). A physio-morphological trait-based approach for breeding drought tolerant wheat. *Frontiers in Plant Science*, 11, 715. https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00715

[14]. Mehraban, A., Tobe, A., Gholipouri, A., Amiri, E., Ghafari, A., & Rostaii, M. (2019). The effects of drought stress on yield, yield components, and yield stability at different growth stages in bread wheat cultivar (*Triticum aestivum* L.). *Polish Journal of Environmental Studies*, 28(2), 739-746. https://doi.org/10.15244/pjoes/85350 (In Persian)

[15]. Mesgaran, M. B., Madani, K., Hashemi, H., & Azadi, P. (2017). Iran's land suitability for agriculture. *Scientific Reports*, 7(1), 7670. https://doi.org/10.1038/s41598-017-08066-y (In Persian)

[16]. Mousa, A. M. A., Ali, A. M. A.-G., Omar, A. E. A., Alharbi, K., Abd El-Moneim, D., Mansour, E., & Elmorsy, R. S. A. (2024). Physiological, Agronomic, and Grain Quality Responses of Diverse Rice Genotypes to Various Irrigation Regimes under Aerobic Cultivation Conditions. *Life*, 14, 370. https://doi.org/10.3390/life14030370

[17]. Mu, Q., Xu, J., Yu, M., Guo, Z., Dong, M., Cao, Y., Zhang, S., Sun, S., Cai, H., & Zhang, Y. (2022). Physiological response of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) during

vegetative growth to gradual, persistent and intermittent drought. *Agricultural Water Management*, 274, 107911. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107911

[18]. Saljoghi, A., Fattahi, M., & Mortazavi, S. R. (2024). Investigación del efecto del estrés por sequía en las características morfofisiológicas de la planta Lallemantia (*Lallemantia iberica* L.) en diferentes niveles de ácido húmico. *Karafan Journal*, 20(4), 407–422. https://doi.org/10.48301/kssa.2024.416267.2707

[19]. Sallam, A., Alqudah, A. M., Dawood, M. F. A., Baenziger, P. S., & Börner, A. (2019). Drought stress tolerance in wheat and barley: Advances in physiology, breeding and genetics research. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(13), 3137. https://doi.org/10.3390/ijms20133137

[20]. Shavrukov, Y., Kurishbayev, A., Jatayev, S., Shvidchenko, V., Zotova, L., Koekemoer, F., de Groot, S., Soole, K., & Langridge, P. (2017). Early Flowering as a Drought Escape Mechanism in Plants: How Can It Aid Wheat Production? *Frontiers in Plant Science*, 8, 1950. https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01950

[21]. Shayanmehr, S., Rastegari Henneberry, S., Sabouhi Sabouni, M., & Shahnoushi Foroushani, N. (2020). Drought, climate change, and dryland wheat yield response: An econometric approach. International Journal of Environmental *Research and Public Health*, 17(14), 5264. https://doi.org/10.3390/ijerph17145264 (In Persian)

[22]. Srivastava, A., Srivastava, P., Sharma, A., Sarlach, R. S., & Bains, N. S. (2017). Effect of stem reserve mobilization on grain filling under drought stress conditions in recombinant inbred population of wheat. *Journal of Applied and Natural Science*, 9(1), 1–5. https://doi.org/10.31018/jans.v9i1.1137

[23]. Wolde, G. M., Schreiber, M., Trautewig, C., Himmelbach, A., Sakuma, S., Mascher, M., & Schnurbusch, T. (2021). Genome-wide identification of loci modifying spike-branching in tetraploid wheat. *Theoretical and Applied Genetics*, 134(7), 1925–1943. https://doi.org/10.1007/s00122-020-03743-5

[24]. Zada, A., Ali, A., Binjawhar, D. N., Abdel-Hameed, U. K., Shah, A. H., Gill, S. M., Hussain, I., Abbas, Z., Ullah, Z., Sher, H., & Ali, I. (2022). Molecular and Physiological Evaluation of Bread Wheat (*Triticum aestivum* L.) Genotypes for Stay Green under Drought Stress. *Genes (Basel)*, 13(12), 2261. https://doi.org/10.3390/genes13122261

[25]. Zahoor, I., Hasan, H., Gul, A., Khursheed, A., Ali, M., Amir, R., Afzal, F., Kubra, G., Basharat, A., Aziz, F., & Zarrar, F. (2020). Molecular mechanism of drought tolerance in wheat. In M. Ozturk & A. Gul (Eds.), Climate change and food security with emphasis on wheat (pp. 129–154). *Academic Press*. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819527-7.00008-X

[26]. Zaman-Allah, M., Jenkinson, D. M., & Vadez, V. (2011). A conservative pattern of water use, rather than deep or profuse rooting, is critical for the terminal drought tolerance of chickpea. *Journal of Experimental Botany*, 62(12), 4239–4252. https://doi.org/10.1093/jxb/err139

[27]. Zhang, Z., Huang, J., Gao, Y., Liu, Y., Li, J., Zhou, X., Yao, C., Wang, Z., Sun, Z., & Zhang, Y. (2020). Suppressed ABA signal transduction in the spike promotes sucrose use in the stem and reduces grain number in wheat under water stress. *Journal of Experimental Botany*, 71(22), 7241–7256. https://doi.org/10.1093/jxb/eraa380