



Original article

Simulating heat stress indices of HSDD, HSF, and HSDU in rainfed wheat under different sowing dates in Lorestan ProvinceAbdolmajid Soheilnejad¹, Sajjad Rahimi-Moghaddam^{2*}

1. Department of Agriculture, Faculty of Agriculture, Payame Noor University, Tehran, Iran

2. Department of Plant Production and Genetics Engineering, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Khorramabad, Iran

Received 15 June 2024; Revised 30 August 2025; Accepted 1 September 2025

Extended abstract**Introduction**

Climate change has intensified the frequency and severity of heat stress events, especially in semi-arid regions where rainfed wheat is a staple crop. In such environments, heat stress during sensitive growth stages like flowering and grain filling can drastically reduce grain yield. Lorestan province located in west part of Iran that characterized by diverse microclimates and particularly vulnerable to these effects. Adapting sowing dates has been proposed as a practical approach to minimize heat-related yield losses. This study evaluated the effect of different sowing dates on heat stress risk and wheat grain yield in five different locations in Lorestan using the APSIM-Wheat simulation model over 41-year long-term period (1980–2020).

Materials and methods

Long-term daily weather data, including minimum and maximum temperatures, solar radiation, and precipitation, were collected from five meteorological stations including Khorramabad, Borujerd, Aligudarz, Kuhdasht, and Pol-e Dokhtar. The APSIM-Wheat model was used to simulate the impact of heat stress on rainfed wheat. Four sowing dates—October 7, October 20, October 31, and November 10—were simulated for each location. To quantify heat stress during the flowering to physiological maturity stages, three thermal stress indices were used: (1) heat stress frequency (HSF), defined as the number of days with maximum temperature (T_{max}) exceeding 30°C; (2) heat stress duration (HSDU), referring to the length of consecutive days under such conditions that lasted for 2 days and more; and (3) heat stress degree days (HSDD), the cumulative sum of daily heat stress degree-days, calculated as $T_{max} - 30$ on days when $T_{max} \geq 30$ °C. This index quantifies the cumulative intensity of heat stress over the growing season. The model also simulated grain yield to examine how sowing date shifts influence productivity.

Results and discussion

Simulation results demonstrated that both of frequency and intensity of heat stress increased with delayed sowing, particularly in lowland and warmer regions. For instance, in Pol-e Dokhtar, one of the warmest study areas, early sowing on October 7 led to HSF of 16.5 number season⁻¹, with HSDD of 64.2 °Cd, and HSDU of 5.5 days. In contrast, late sowing on October 31 reduced HSDU and HSF to 2.1 days and 1.6 number season⁻¹, respectively, with HSDD of 4.6 °Cd in Pol-e Dokhtar. Correspondingly, the mean grain yield increased significantly with later sowing dates (3.98 t ha⁻¹). In cold regions like Aligudarz and Borujerd, early sowing on October 7 resulted in the lowest values of HSDU (1.7 and 1.8 days), HSF (2.1 and 2.8 number season⁻¹), and HSDD (6.8 and 2.5 °Cd) in Aligudarz and Borujerd, respectively. Moreover, in these areas, shifting the sowing date from early (October 7) to late (November 10) led to a decrease in grain yield—from 2.9 t ha⁻¹ to 1.3 t ha⁻¹ in Borujerd, and from 4.6 ha⁻¹ to 2.5 ha⁻¹ in Aligudarz. The results of the correlation analysis among the studied traits revealed a significant

* Corresponding author: Sajjad Rahimi-Moghaddam; E-Mail: rahimi.s@lu.ac.ir

negative correlation between grain yield and the heat stress indices, including heat stress HSDD, HSF, and HSDU, with correlation coefficients of -0.63 , -0.59 , and -0.55 , respectively. These negative relationships indicate the detrimental effects of heat stress during reproductive stages—particularly flowering and grain filling—which can lead to reduced grain number per spike, lower 1000-grain weight, and ultimately, decreased grain yield.

Conclusion

This study highlights heat stress—particularly during reproductive and grain-filling stages—as a key limiting factor for rainfed wheat yield across various climates in Lorestan province. The intensity of heat stress strongly depends on geographic location and sowing date, with early sowing increasing stress in warm areas like Pol-e Dokhtar but reducing it and improving yield in colder regions like Borujerd and Aligudarz. Overall, the findings underscore the need to integrate climate analysis, optimized sowing dates, and adaptive agronomic practices to develop resilient cropping calendars under rising temperatures and climate change.

Keywords: Agroclimatology, APSIM-Wheat model, Correlation, Flowering, Grain yield

شبیه‌سازی شاخص‌های تنش گرمایی HSDU و HSF، HSDD در گندم دیم تحت تاریخ‌های مختلف کاشت در استان لرستان

عبدالمجید سهیل‌نژاد¹، سجاد رحیمی مقدم^{2*}

۱. گروه کشاورزی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران
۲. گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران

مشخصات مقاله	چکیده
واژه‌های کلیدی: اقلیم‌شناسی کشاورزی، عملکرد دانه، گلدهی، مدل APSIM-Wheat، همبستگی	تغییرات اقلیمی و افزایش دمای جهانی، وقوع تنش‌های گرمایی را در دوره‌های حساس رشدی گندم دیم تشدید کرده و عملکرد این محصول راهبردی را تهدید می‌کند. این پژوهش با هدف بررسی تأثیر تاریخ‌های مختلف کاشت بر مواجهه گندم دیم با تنش گرمایی در مرحله گلدهی تا رسیدگی فیزیولوژیک و تأثیر آن بر عملکرد دانه، با استفاده از مدل APSIM-Wheat، در یک دوره ۴۱ ساله (۱۹۸۰-۲۰۲۰) و در پنج ایستگاه هواشناسی استان لرستان (الیگودرز، بروجرد، خرم‌آباد، کوهدشت و پلدختر) انجام شد. صفات مورد بررسی شامل عملکرد دانه، وزن هزار دانه، تعداد دانه در خوشه، درجه روزهای تنش حرارتی (HSDD)، فراوانی تنش حرارتی (HSF) و مدت زمان تنش حرارتی (HSDU)، طول دوره رشد، بیشینه شاخص سطح برگ، بارندگی تجمعی و میانگین بیشینه دما از گل‌انگیزی تا رسیدگی بودند. نتایج نشان داد که تغییر تاریخ کاشت تأثیر معنی‌داری بر میزان مواجهه گیاه با تنش گرمایی دارد. در ایستگاه پلدختر (با اقلیم گرم‌تر)، کاشت زود هنگام (۱۵ مهر) منجر به ثبت بالاترین مقدار شاخص HSDD با میانگین ۶۴/۲ درجه روز شد، در حالی که در ایستگاه بروجرد (اقلیم سردتر)، همان تاریخ کاشت منجر به کمترین مقدار HSDD (دو درجه روز) گردید. در مناطق گرم‌تر (مانند پلدختر)، تأخیر در کاشت تا ۹ آبان منجر به افزایش عملکرد تا ۴۳ درصد شد، در حالی که در مناطق سردتر (الیگودرز و بروجرد)، کاشت زود هنگام (۱۵ مهر) عملکرد را تا ۹۰ درصد نسبت به تاریخ کاشت دیر هنگام (۱۵ آبان) افزایش داد. همبستگی منفی و معنی‌داری (به ترتیب ۰/۶۳، ۰/۵۹ و ۰/۵۵) بین عملکرد دانه با شاخص‌های تنش حرارتی HSDD، HSF و HSDU به ترتیب با ضرایب همبستگی ۰/۶۳، ۰/۵۹ و ۰/۵۵ همبستگی منفی و معنی‌داری مشاهده شد. نتایج این تحقیق می‌تواند به تعیین تاریخ بهینه کاشت بر اساس اقلیم هر منطقه برای کاهش آثار منفی تنش گرمایی کمک کند.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۲۵ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۰۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۱۰	

مقدمه

کاهش رشد، عملکرد و کیفیت دانه شود (Porter and Gawith, 1999; Zhao et al., 2022; Dias and Lidon, 2009). استان لرستان با ۲۷۰ هزار هکتار سطح زیر کشت مجموع گندم آبی و دیم و تولید سالانه ۵۹۴ هزار تن گندم، بیش از چهار درصد از سطح زیر کشت و تولید گندم کشور را به خود اختصاص داده است (MAJ, 2023).

افزایش دما در طول فصل رشد، به‌ویژه در مراحل گلدهی و پر شدن دانه، یکی از چالش‌های اساسی در تولید گندم به شمار می‌رود. این پدیده با تسریع روند پیری برگ، کاهش

گندم به‌عنوان یکی از مهم‌ترین محصولات زراعی در ایران، دارای سطح زیر کشت ۶/۲ میلیون هکتار و میانگین تولید آن ۲/۳ تن در هکتار در ایران می‌باشد (FAO, 2023). ۶۲ درصد سطح زیر کشت گندم در ایران به‌صورت دیم و وابسته به بارندگی است (Rahimi-Moghaddam et al., 2021). ایران با داشتن اقلیمی خشک و نیمه‌خشک دوازدهمین تولید کننده گندم در جهان می‌باشد (FAO, 2023). با وجود اهمیت بالای این محصول، گندم به دماهای بالا، به‌ویژه در مراحل زایشی، بسیار حساس است؛ عاملی که می‌تواند موجب

جنوبی دشت هوانگ‌هوای‌های شده است (Tao et al., 2015). در اروپای مرکزی نیز مدل‌سازی‌ها نشان داده‌اند که افزایش دما در دوره گلدهی و پر شدن دانه، مستقیماً عملکرد گندم و جو را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در این مطالعات، تنظیم زمان گلدهی به‌عنوان راهکاری برای کاهش اثرات تنش گرمایی پیشنهاد شده است (Appiah et al., 2023).

یکی از مؤثرترین و کم‌هزینه‌ترین راهکارهای سازگاری با تنش گرمایی، تغییر تاریخ کاشت است. تنظیم زمان کاشت به‌گونه‌ای که مراحل زایشی گیاه با دوره‌های دمایی خنک‌تر هم‌زمان شود، می‌تواند نقش مهمی در کاهش اثرات منفی تنش گرما ایفا کند (Collins and Chenu, 2021). در استرالیا، استفاده از تاریخ کاشت بهینه همراه با افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن، موجب افزایش ۴/۶ درصدی عملکرد گندم در سال ۲۰۵۰ در سناریوهای پیشبینی آینده شده است. در هند، کاشت زود هنگام در کنار مدیریت بهینه نیتروژن و آبیاری، توانسته اثرات منفی دماهای بالا را تا ۷/۵ درصد کاهش دهد (Dubey et al., 2020). همچنین در شمال چین، پیش‌برد تاریخ کاشت ذرت موجب اجتناب از وقوع تنش گرمایی و افزایش عملکرد محصول شده است (Wu et al., 2023). در اروپا نیز، تنظیم زمان کاشت جو به‌گونه‌ای که گلدهی زودتر رخ دهد، از مواجهه با دماهای بحرانی جلوگیری کرده است (Appiah et al., 2023). در ایران گزارش شده است که تحت شرایط تغییر اقلیم، شدت افزایش دما از غرب به شرق و از شمال به جنوب کشور افزایش می‌یابد. این الگوی گرمایش باعث خواهد شد تا فراوانی درجه حرارت‌های بالا تر از ۳۰ درجه سانتی‌گراد در مرحله گلدهی و گرده افشانی گندم در اغلب مناطق تولید گندم کشور در مقایسه با شرایط فعلی بطور قابل ملاحظه‌ای افزایش یابد. با این حال، تغییر تاریخ کاشت و اصلاح ارقامی از گندم با دامنه مقاومت بالاتر به گرما در مرحله گلدهی تأثیر چشمگیری در بهبود عملکرد خواهند داشت (Koocheki and Nasiri Mahalati, 2008).

برای بررسی تنش گرمایی و راهکارهای سازگاری می‌توان از رهیافت مدل‌سازی استفاده کرد. از جمله مدل‌های زراعی قدرتمند در این زمینه می‌توان به مدل APSIM اشاره کرد. این مدل با بهره‌گیری از زیرمدل‌های متنوعی نظیر SoilN, SoilWat و Plant، قادر است فرایندهای جذب آب و نیتروژن، رشد بیولوژیکی و تولید عملکرد را با دقت بالا مدل‌سازی کند. فازهای فنولوژیکی گیاه نیز بر اساس

فتوسنتز، کوتاه‌شدن دوره پر شدن دانه و در نهایت افت عملکرد همراه است (Chen et al., 2018). در چین، افزایش یک درجه سانتی‌گراد دما در طول فصل رشد موجب کاهش عملکرد گندم بین ۳ تا ۱۰ درصد شده است (You et al., 2009). در هند، مدل‌سازی‌ها نشان می‌دهند که افزایش دما در پایان فصل می‌تواند عملکرد گندم را تا ۱۸ درصد در شرایط فعلی و تا ۱۶ درصد در سناریوهای آینده کاهش دهد (Dubey et al., 2020). در جنوب استرالیا، بنت و همکاران (Bennett et al., 2012) و کوچل و همکاران (Kuchel et al., 2007) در آزمایش‌های مزرعه‌ای چندساله گزارش کردند که به‌ازای هر یک درجه افزایش دما در دوره گلدهی و پر شدن دانه، عملکرد گندم تا ۱۸۷ کیلوگرم در هکتار کاهش می‌یابد. نتایج مطالعات نیز نشان می‌دهد که در ایران، گیاه گندم تحت تأثیر تنش گرمایی قرار دارد (Deihimfard et al., 2023). در بررسی روند تغییرات دمایی و اثرات آن بر طول دوره پر شدن دانه و پتانسیل عملکرد گندم در مناطق مختلف ایران از ۱۳۷۱ تا ۱۳۹۱ نشان داده شده است که در مناطق گرم و مرطوب خیزی افزایش دمای میانگین سالانه، با شدت کمی طول دوره پر شدن و عملکرد دانه را افزایش داده که احتمالاً به دلیل اثرات تعدیلی رطوبت هوا در این مناطق بوده است. اما در مناطق گرم و خشک جنوب و مرکز ایران افزایش دما به‌تدریج با ایجاد تنش در دوره رسیدگی دانه منجر به کاهش طول دوره پر شدن دانه و کاهش عملکرد گندم شده است (Abbasi Alikamar et al., 2020). در مطالعه‌ای دیگر به‌منظور ارزیابی اثرات تغییر آب‌وهوا بر عملکرد محصول گندم ایران مشخص شد که گندم دیم همه ایستگاه‌های واقع در شمال غرب ۳۷-۳۰ درصد، قسمتی از جنوب غرب و جنوب کشور با ۳۵-۲۸ درصد روند کاهش عملکرد مواجه خواهند بود و نیمه جنوب شرق و شمال شرق ۴۲-۴۷ درصد با افزایش عملکرد مواجه خواهند بود (Farajzadeh et al., 2021).

برای تحلیل دقیق‌تر تأثیرات تنش گرمایی بر عملکرد گندم، از شاخص‌های کمی مختلفی مانند مجموع روزهای دارای دمای حدی (EDD) (Lobell et al., 2012)، فراوانی تنش گرمایی (HSF) (Gunn et al., 2019) و طول مرحله تولیدمثلی (RGD) (Tao et al., 2015) استفاده می‌شود. در مطالعه‌ای در شمال چین، افزایش شاخص‌های EDD و درجه روز-رشد، همراه با کاهش تابش خورشیدی، منجر به کاهش RGD و در نتیجه کاهش عملکرد گندم در نواحی

در مقیاس‌های زمانی و مکانی مختلف و ارزیابی تأثیر تاریخ کاشت به‌عنوان یک راهکار مدیریتی در بهبود پایداری عملکرد گندم در استان لرستان است.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق، از اطلاعات اقلیمی و هواشناسی پنج ایستگاه هواشناسی از مناطق اصلی کشت گندم در استان لرستان شامل الیگودرز، بروجرد، خرم‌آباد، کوهدشت و پلدختر استفاده شد. این ایستگاه‌ها در اقلیم‌های مختلف و پراکنش مناسبی در سطح استان دارند (جدول ۱). داده‌های روزانه مربوط به تابش خورشیدی، دمای بیشینه و کمینه، و میزان بارندگی برای سال‌های ۱۹۸۰ تا ۲۰۲۰ از پایگاه داده سازمان هواشناسی کشور (IMO, 2021) استخراج گردید. همچنین، مشخصات خاک از جمله بافت، چگالی ظاهری، کربن آلی، اسیدیته و هدایت الکتریکی، با استفاده از پایگاه داده جهانی خاک (HWSD; Nachtergaele et al., 2009) و گزارشات مختلف برای هر ایستگاه به‌دست آمد.

به‌منظور برآورد پارامترهای موردنیاز مدل APSIM مانند وزن مخصوص ظاهری، ظرفیت خاک در نقطه پژمردگی، ظرفیت آب خاک در نقطه اشباع و ظرفیت خاک در نقطه ظرفیت مزرعه، از نرم‌افزار SPAW (Saxton and Willey, 2005) استفاده شد (جدول ۱). بر اساس داده‌های به دست آمده از پایگاه‌داده جهانی خاک و گزارش‌های مختلف به دست آمد که در جدول ۲ نشان داده شده است. عمق خاک برای همه مناطق مورد مطالعه ۱۰۰ سانتیمتر در نظر گرفته شد.

ویژگی‌های رقم مورد استفاده در مدل شبیه‌سازی می‌شوند. برای ارزیابی تأثیر دماهای بالا بر عملکرد گندم، زیرمدل حرارتی توسعه‌یافته توسط آبابایی و چنو (Ababaei and Chenu, 2020) در ساختار APSIM گنجانده شد. این ماژول بر اساس پژوهش‌های پیشین درباره اثرات گرما بر تشکیل بذر و وزن دانه در گندم و سورگوم طراحی شده است (Prasad et al., 2008; Nguyen et al., 2013; Singh et al., 2008) و با استفاده از ضرایب حساسیت عددی در بازه صفر تا ۱، اثر شوک‌های حرارتی (با آستانه دمایی بیشینه ۲۶ درجه سانتی‌گراد) را بر تعداد دانه در خوشه و وزن دانه طی بازه‌ای مشخص (از مرحله گلدهی تا ۵۵۰ درجه روز رشد پس از آن) شبیه‌سازی می‌کند. کارایی این زیرمدل با داده‌های آزمایشی اعتبارسنجی شده و در مطالعات متعدد مورد استفاده و تأیید قرار گرفته است (Lobell et al., 2015; Ababaei and Chenu, 2020; Chenu et al., 2021; Collins and Chenu, 2021; Deihimfard et al., 2023).

باتوجه به اهمیت بالای گندم در تأمین امنیت غذایی ایران و حساسیت این محصول به تنش‌های گرمایی به‌ویژه در مراحل زایشی، بررسی اثرات تغییرات دمایی و تنش گرمایی بر عملکرد آن ضرورت یافته است. استان لرستان به‌عنوان یکی از مناطق مهم تولید گندم کشور، با توجه به روند افزایشی دما و افزایش وقوع تنش‌های گرمایی، نیازمند ارزیابی دقیق شاخص‌های تنش و ارائه راهکارهای مدیریتی مؤثر است؛ بنابراین، هدف این مطالعه، تحلیل شاخص‌های تنش گرمایی

جدول ۱. موقعیت جغرافیایی، سطح زیرکشت و ویژگی‌های اقلیمی مناطق مورد مطالعه.

Table 1. Geographical position, cultivated area, and climatic characteristics of the studied regions.

شهرستان County	طول و عرض جغرافیایی Latitude and longitude	ارتفاع از سطح دریا Altitude	سطح زیر کشت Cultivated area	بارندگی تجمعی فصلی Seasonal cumulative rainfall	میانگین دمای فصلی Seasonal mean temperature
	°	m	ha	mm	°C
الیگودرز Aligudarz	33.41/49.70	1993	28600	372	7
بروجرد Borujerd	33.92/48.76	1560	38000	245	6.5
خرم‌آباد Khorramabad	33.44/48.28	1147	20700	438	9.4
کوهدشت Kuhdasht	33.53/47.61	1195	14000	322	9.2
پلدختر Pol-e Dokhtar	33.15/47.72	670	10200	383	13.2

جدول ۲. ویژگی‌های خاک‌های مناطق مورد مطالعه.

Table 2. Soil characteristics of the studied regions.

County	شهرستان	وزن مخصوص	ظرفیت خاک در نقطه	ظرفیت خاک در نقطه	ظرفیت آب خاک در نقطه
		ظاهری Bulk density g cm ⁻³	پژمردگی Water content at wilting point	ظرفیت مزرعه Water content at field capacity cm ³ cm ⁻³	اشباع Saturation water content
Aligudarz	الیگودرز	1.31	0.237	0.388	0.507
Borujerd	بروجرد	1.30	0.258	0.402	0.515
Khorramabad	خرم‌آباد	1.28	0.231	0.392	0.518
Kuhdasht	کوهدشت	1.34	0.259	0.396	0.500
Pol-e Dokhtar	پلدختر	1.38	0.062	0.286	0.457

زمانی انجام می‌گرفت که طی بازه ۱ مهر تا ۱ آذر، حداقل پنج‌روز متوالی با بارندگی بیش از ۵ میلی‌متر و همچنین حداقل ۳۰ میلی‌متر رطوبت قابل‌استفاده در خاک ثبت شده بود. با احتساب ۴۱ سال و ۵ منطقه، مجموعاً ۲۰۵ تاریخ جوانه‌زنی و ۲۰۵ مقدار رطوبت قابل‌استفاده در زمان جوانه‌زنی به‌عنوان خروجی مدل شبیه‌سازی شد. سپس، صدک‌های ۲۰ام، ۴۰ام، ۶۰ام و ۸۰ام این تاریخ‌ها به ترتیب به‌عنوان تاریخ‌های کاشت اول تا چهارم در نظر گرفته شدند.

جدول ۳. پارامترهای رقم‌محور گندم (رقم آذر ۲) در مدل APSIM-Wheat (رحیمی مقدم و همکاران، ۲۰۲۱).

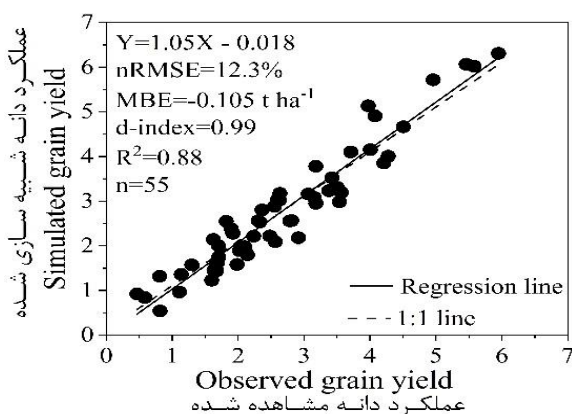
Table 3. Cultivar-specific parameters of wheat (Azar2) in the APSIM-Wheat model.

واحد	مقدار	پارامتر
Unit	Value	Parameter
°Cd	380	زمان حرارتی در پایان مرحله جوانی Thermal time at the end of juvenile stage
-	25	تعداد دانه در گرم ساقه Number of grain per gram of stem
°Cd	500	زمان حرارتی در مرحله ابتدای گلدهی Thermal time at floral initiation stage
g	0.041	حداکثر اندازه دانه Maximum grain size
°Cd	400	زمان حرارتی از مرحله شروع پر شدن دانه تا رسیدگی Thermal time from start grain filling to maturity
-	2.5	حساسیت به طول روز Photoperiod sensitivity
-	2	حساسیت به بهاره‌سازی Vernalization sensitivity

سایر اطلاعات مدیریتی مورد‌استفاده در شبیه‌سازی شامل نوع خاک‌ورزی (موسوم)، عمق کاشت (۵ سانتی‌متر)، فاصله ردیف‌ها (۲۵ سانتی‌متر)، تراکم گیاهی (۳۸۰ بوته در مترمربع)، و مقدار کود نیتروژن (۱۸۰ کیلوگرم در هکتار) بودند که با هماهنگی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان گردآوری شدند. مطالعه حاضر فقط تحت شرایط محدودیت آب (دیم) انجام شده است و محدودیتی برای سایر عوامل زیستی (بیماری، آفت و بیماری) و غیرزیستی (عناصر غذایی، شوری و...) برای مطالعه حاضر در نظر گرفته نشد. براین‌اساس میزان کود نیتروژن به میزان بهینه بر اساس توصیه کاربردی و هماهنگی با مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان، برای مناطق مورد بررسی ۱۸۰ کیلوگرم نیتروژن در نظر گرفته شد. پارامترهای رقم‌محور موردنیاز مدل برای رقم مورد‌استفاده (Azar-2) از تحقیق رحیمی مقدم و همکاران (Rahimi-Moghaddam et al., 2021) به دست آمدند (جدول ۳).

برای شبیه‌سازی رشد گندم و اثر تنش حرارتی، از مدل APSIM-Wheat نسخه ۷/۱۰ (Holzworth et al., 2014) استفاده شد. سنجش تنش حرارتی فصلی برای پنج ایستگاه منتخب در استان لرستان، طی دوره ۱۹۸۰ تا ۲۰۲۰ و تحت شرایط دیم، با استفاده از رقم Azar-2 به‌عنوان رقم غالب در منطقه، در چهار تاریخ کاشت (۱۵ مهر، ۲۸ مهر، ۹ آبان و ۱۹ آبان) انجام شد. تعیین تاریخ‌های کاشت بر اساس روش پیشنهادی چنو و همکاران (Chenu et al., 2013) و با در نظر گرفتن توصیه‌های مؤسسه تحقیقات دیم کشور برای کشت دیم صورت گرفت. این تاریخ‌ها از طریق مجموعه‌ای از شبیه‌سازی‌های مستقل به دست آمدند، به طوری که کاشت

تنش مواجه بود؛ به طوری که مقدار HSDD به ۶۴/۲ درجه روز، HSF به ۱۶/۷ روز و HSDU به ۵/۵ روز رسید. در مقابل، شهرستان بروجرد با اقلیم سردتر، در همان تاریخ کاشت مقادیر بسیار پایین تری از این شاخص‌ها را نشان داد (HSDD: 5.2 درجه روز؛ HSF: 8.2؛ HSDU: 8.1 روز) (جدول ۴).



شکل ۱. اعتبارسنجی مدل APSIM-Wheat برای رقم گندم دیم آذر ۲ در سال‌ها، مناطق، خاک‌ها و تاریخ کاشت‌های مختلف.

Fig. 1. Validation of the APSIM-Wheat model for the rainfed wheat cultivar Azar2 across different years, locations, soil types, and sowing dates.

با تأخیر در کاشت تا تاریخ ۹ آبان، در پلدختر مقادیر شاخص‌ها به طور چشمگیری کاهش یافت: HSDD از ۶۴/۲ به ۴/۶ درجه روز، HSF از ۱۶/۷ به ۱/۶ روز و HSDU از ۵/۵ به ۱/۲ روز رسید (جدول ۴). این کاهش نشان‌دهنده تأثیر بالای انتخاب مناسب تاریخ کاشت در کاهش اثرات تنش گرمایی، به‌ویژه در مناطق گرم، است. در مناطق سرد نظیر الیگودرز و بروجرد، تاریخ کاشت زود هنگام (۱۵ مهر) منجر به مقادیر پایین‌تر شاخص‌های تنش گرمایی شد. در مناطق با اقلیم معتدل مانند خرم‌آباد و کوه‌دشت، تاریخ کاشت میانه (۲۸ مهر) عملکرد بهتری در کاهش تنش حرارتی نشان داد. مطالعات بین‌المللی نیز این یافته‌ها را تأیید می‌کنند. در راستا و همخوانی با نتایج حاضر، در شمال هند، کاشت زود هنگام گندم در ماه اکتبر به کشاورزان آن منطقه این امکان را داد که از موج‌های گرمایی انتهایی فصل اجتناب کرده و عملکرد محصول را حفظ کنند (Ishtiaque et al., 2022). در اروپا، تنظیم زمان گلدهی جو به گونه‌ای که زودتر از مواجهه با دماهای بحرانی رخ دهد، راهکار مؤثری در کاهش تنش

ارزیابی تنش حرارتی در بازه زمانی گلدهی تا رسیدگی انجام شد، زیرا در این دوره، بیشترین حساسیت عملکرد نسبت به شوک‌های حرارتی مشاهده می‌شود (Deihimfard et al., 2023). برای سنجش شدت تنش گرمایی، از سه شاخص استفاده شد: (۱) HSDD: مجموع تفاوت بین دمای بیشینه روزهای بالاتر از ۳۰ درجه سانتی‌گراد و آستانه ۳۰ درجه؛ (۲) HSF: تعداد روزهایی که دمای بیشینه در آن‌ها از ۳۰ درجه سانتی‌گراد فراتر رفته است؛ (۳) HSDU: تعداد روزهای متوالی (حداقل دو روز) با دمای بیشینه بالاتر از ۳۰ درجه سانتی‌گراد. برای محاسبه این شاخص‌ها از خروجی‌های روزانه مدل شبیه‌سازی زراعی استفاده شد که در آن بیشینه دما به صورت روزانه در مراحل مختلف فنولوژیکی گیاه گندم وجود دارد. به منظور پردازش و محاسبه شاخص‌های مذکور با توجه به حجم بالای داده‌ها، از نرم‌افزار R استفاده شد. در این نرم‌افزار، داده‌های دمایی استخراج شده از مدل برای محاسبه شاخص‌های HSF، HSDD و HSDU پردازش شده و نتایج نهایی به دست آمد. این شاخص‌ها امکان تحلیل دقیق‌تر از شدت، فراوانی و تداوم شوک‌های حرارتی طی دوره بحرانی رشد را فراهم کردند (Liu et al., 2014).

نتایج و بحث

نتایج ارزیابی مدل (Rahimi-Moghaddam et al., 2021)، نشان می‌دهد که مدل APSIM-Wheat می‌تواند با دقت قابل‌قبولی عملکرد دانه گندم دیم را در طی سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۴ و تحت شرایط اقلیمی مختلف (اردبیل، قاملو، مراغه، سرارود، زنجان و ارومیه)، خاکی و تاریخ‌های کاشت مختلف به خوبی شبیه‌سازی کند، به طوری که جذر مربعات خطای نرمال شده (nRMSE) برابر با ۱۲/۳ درصد، شاخص توافق (d-index) برابر با ۰/۹۹ و ضریب تبیین (R^2) برابر با ۰/۸۸ بود. با این وجود شاخص میانگین انحراف خطا (MBE) نشان داد که مدل به میزان ۱۰۵ کیلوگرم در هکتار عملکرد را کمتر نسبت به مقدار واقعی شبیه‌سازی می‌کند. همچنین نزدیکی خط رگرسیون و خط یک‌به‌یک نیز نشان‌دهنده دقت خوب مدل در شبیه‌سازی عملکرد گندم دیم بود (شکل ۱).

نتایج تحلیل داده‌های شبیه‌سازی شده نشان داد که شدت تنش حرارتی، بر اساس شاخص‌های HSDD، HSF و HSDU، به طور چشمگیری تحت تأثیر اقلیم منطقه و تاریخ کاشت قرار دارد. در این میان، شهرستان پلدختر به عنوان گرم‌ترین منطقه، در تاریخ کاشت ۱۵ مهر با بیشترین میزان

گرمایی بوده است، که در راستای نتایج تحقیق حاضر می-
باشد.

نسخه پیش از انتشار

جدول ۴. شاخص‌های تنش حرارتی و برخی صفات در طول فصل رشد گندم دیم در مناطق و تاریخ کاشت‌های مختلف استان لرستان.

Table 4. Heat stress indices and some traits during the growing season of rainfed wheat across different regions and sowing dates of Lorestan province.

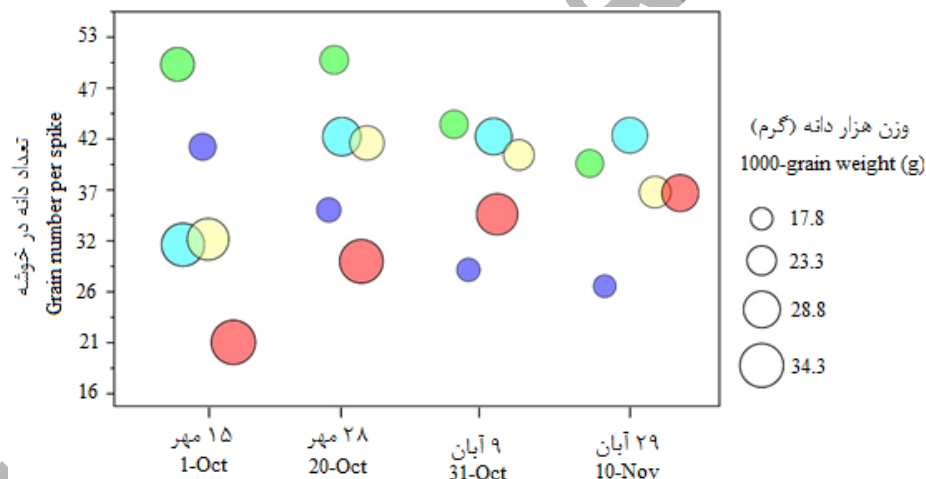
شهرستان County	تاریخ کاشت Sowing date	مدت زمان تنش حرارتی HSDU	فرآوانی تنش حرارتی HSF	درجه روزهای تنش حرارتی HSDD	طول دوره رشد Length of the growth period	بیشینه شاخص سطح برگ M-LAL	بارندگی تجمعی در طول فصل رشد C-Rain	میانگین بیشینه دما از گل‌انگیزی تا رسیدگی MT
		day	No. season ⁻¹	°Cd	day		mm	°C
الیگودرز Aligudarz	۱۵ مهر 1-Oct	1.7	2.1	6.8	184	1.49	416	21.7
	۲۸ مهر 20-Oct	2.6	4.0	8.2	159	1.14	394	23.7
	۹ آبان 31-Oct	2.8	4.9	8.5	164	0.8	376	25.3
	۱۹ آبان 10-Nov	2.8	5.4	8.8	165	0.7	351	26.2
بروجرد Borujerd	۱۵ مهر 1-Oct	1.8	2.8	2.5	157	0.48	263	22.9
	۲۸ مهر 20-Oct	2.2	3.3	3.4	161	0.35	248	24.8
	۹ آبان 31-Oct	2.4	4.1	5.4	165	0.32	238	26.0
	۱۹ آبان 10-Nov	2.5	5.2	6.5	170	0.32	235	26.7
خرم‌آباد Khorramabad	۱۵ مهر 1-Oct	3.0	5.4	8.1	288	0.08	413	19.1
	۲۸ مهر 20-Oct	2.0	2.9	5.4	157	1.25	431	21.6
	۹ آبان 31-Oct	2.7	4.1	9.1	130	1.5	413	23.4
	۱۹ آبان 10-Nov	3.0	4.5	10.4	134	1.64	416	24.7
کوه‌دشت Kuhdasht	۱۵ مهر 1-Oct	2.5	6.2	10.5	289	0.17	317	19.7
	۲۸ مهر 20-Oct	2.3	4.8	10.2	188	0.78	323	22.1
	۹ آبان 31-Oct	2.3	4.5	9.7	128	0.98	311	24.0
	۱۹ آبان 10-Nov	2.6	5.4	12.4	133	0.89	305	25.6
پلدختر Pol-e Dokhtar	۱۵ مهر 1-Oct	5.5	16.7	64.2	298	0.23	274	17.6
	۲۸ مهر 20-Oct	3.8	7.2	24.7	297	0.04	288	19.3
	۹ آبان 31-Oct	1.2	1.6	4.6	84.5	1.49	301	21.0
	۱۹ آبان 10-Nov	1.8	2.2	4.3	91.2	1.43	276	22.5

HSDU: heat stress duration; HSDD: heat stress degree days; HSF: heat stress frequency; M-LAI: maximum leaf area index; C-Rain: cumulative rainfall during the growing season; MT: mean maximum temperature from floral initiation to maturity

پاییزه، ارقام کریم و ریژاو و برای کشت انتظاری فقط ارقام بهار نظیر کریم و آفتاب پیشنهاد می‌شود (, Khodashenas, 2021).

نتایج شبیه‌سازی نشان داد که عملکرد دانه در سراسر تاریخ‌های مختلف کاشت و در میان مناطق مورد مطالعه، تغییر پذیری قابل توجهی داشته است. به طور کلی، عملکرد از حدود ۱/۹ تن در هکتار در منطقه بروجرد تا حدود چهار تن در هکتار در منطقه خرم‌آباد متغیر بود. این تفاوت نشان‌دهنده تأثیر ترکیبی اقلیم منطقه و تاریخ کاشت بر عملکرد گندم دیم است. در مناطق سردتری مانند بروجرد و الیگودرز، در برخی سال‌ها عملکرد دانه تا بیش از ۳۷۰۰ کیلوگرم در هکتار افزایش یافت؛ در حالی که در منطقه گرم‌تر پلدختر، در تاریخ کاشت ۱۵ مهر، عملکرد به کمتر از ۲۰۰۰ کیلوگرم در هکتار کاهش پیدا کرد (شکل ۲).

(Appiah et al., 2023). همچنین در استرالیا، شبیه‌سازی‌ها نشان داده‌اند که ترکیب کاشت زود هنگام با ارقام پرتانسیل می‌تواند عملکرد گندم را به طور متوسط ۰/۵۴ تن در هکتار افزایش دهد. این راهکار از طریق به تعویق انداختن مواجهه مرحله گلدهی با موج‌های گرمایی، شدت تنش حرارتی را به طور قابل توجهی کاهش می‌دهد که موید نتایج مطالعه حاضر می‌باشد (, Hunt et al., 2019). در ایران نیز نتایج مشابهی با نتایج تحقیق حاضر گزارش شده است، به طوری که تحت شرایط آب و هوایی شهر مشهد در ارزیابی ارقام لاینهای امید بخش گندم، تنظیم تاریخ کاشت نقش مهمی در مواجهه مراحل حساس گندم با تنش حرارتی آخر فصل را دارد به طوری که بر اساس نتایج با تأخیر در کاشت، گلدهی ارقام فاصله بیشتری از شرایط مطلوب دمایی یافت و بنابراین تاریخ کاشت پاییزه توصیه می‌شود. همچنین برای کشت



شکل ۲. وزن هزار دانه و تعداد دانه در خوشه گندم دیم تحت تاریخ کاشت‌ها و مناطق مختلف (سبز: الیگودرز؛ بنفش: بروجرد؛ فیروزه‌ای: خرم‌آباد؛ زرد: کوه‌دشت؛ قرمز: پلدختر).

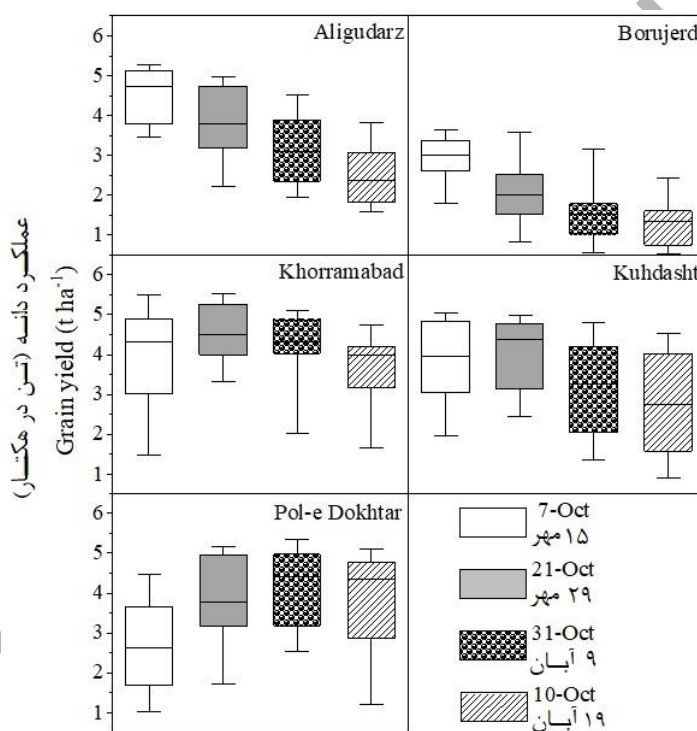
Fig. 2. 1000-grain weight and grain number per spike in rainfed wheat under different sowing dates and regions (Green: Aligudarz; Purple: Borujerd; Cyan: Khorramabad; Yellow: Kuhdasht; Brown: Pol-e Dokhtar).

است (, Lobell et al., 2015; Ababaei and Chenu, 2020; Chenu et al., 2021; Collins and Chenu, 2021; Deihimfard et al., 2023). در شکل ۳ نیز این همبستگی به وضوح دیده می‌شود، به طوری که بیشترین تعداد دانه در خوشه و وزن هزار دانه برای مناطق بروجرد (۴۱/۳ دانه در خوشه و ۲۱/۱ گرم) و الیگودرز (۵۰/۳ دانه در خوشه و ۲۶/۱ گرم) در تاریخ کاشت ۱۵ مهر به دست آمده است. مطالعات تجربی نیز این نتایج را تأیید می‌کنند. به عنوان نمونه، در یک مطالعه مروری، قرارگیری گندم در معرض ۷

همان‌طور که در جدول ۴ و شکل ۲ نشان داده شده است، روند تأثیر شاخص‌های تنش گرمایی بر عملکرد دانه در تاریخ‌های کاشت و مناطق مختلف، تا حد زیادی از الگوی مشابه پیروی می‌کند. برای نمونه، در مناطق سرد مانند بروجرد و الیگودرز، تاریخ کاشت زود هنگام ۱۵ مهر کمترین میزان تنش گرمایی را به همراه داشته و در همین تاریخ، بیشترین عملکرد دانه نیز برای این مناطق ثبت شده است. این رابطه، نشان‌دهنده تأثیر مستقیم تنش گرمایی بر عملکرد دانه از طریق تأثیر بر تعداد در خوشه و وزن هزار دانه

دمای ۳۲/۲۲ درجه سانتی‌گراد برای ۱۴ روز در مرحله گلدهی، باعث کاهش ۲۹ درصدی وزن هزار دانه و ۳۸ درصدی تعداد دانه در خوشه شده است (Djanaguiraman et al., 2020). این نتایج به‌خوبی نشان می‌دهند که مواجهه با دماهای بحرانی در دوره گلدهی، می‌تواند به‌شدت اجزای عملکرد را تحت‌تأثیر قرار دهد و کاهش عملکرد دانه را به دنبال داشته باشد.

روز تنش حرارتی (۳۵/۱۵ درجه سانتی‌گراد) در مرحله گلدهی، منجر به کاهش حدود ۱۷ درصدی در تعداد دانه خوشه اصلی شد. همچنین، در شرایط تنش ۱۴ روزه (۳۲/۲۲ درجه سانتی‌گراد)، کاهش ۳۶ درصدی در تعداد دانه در خوشه گزارش شده است که بیانگر حساسیت بالای مرحله گلدهی به گرما است (Fernie et al., 2022). در آزمایش‌های کنترل‌شده دیگر نیز مشاهده شده که قرارگرفتن گندم تحت



شکل ۳. عملکرد دانه گندم دیم تحت تاریخ کاشت‌ها و مناطق مختلف. طول باکس پلات‌ها نشان‌دهنده تغییرات در سال‌های مختلف است.

Fig. 3. Grain yield of rainfed wheat under different sowing dates and regions. The length of the box plots indicates variation across different years.

طول فاز گلدهی تا رسیدگی، دماهای پایین‌تری را تجربه کند (میانگین حداکثر دما در این بازه: ۲۲/۳ درجه سانتی‌گراد). این تاریخ کاشت همچنین میزان بارندگی بالاتری (میانگین ۳۳۹/۵ میلی‌متر) را به‌همراه داشت. ترکیب این شرایط منجر به توسعه سطح برگ بیشتر در این مناطق شد (با بیشینه شاخص سطح برگ ۱/۴۸۵)، که بیانگر بهبود شرایط رشد برای فتوسنتز در دوره‌های بحرانی رشد است (جدول ۴). دمای پایین‌تر، افزایش بارندگی و کاهش تنش حرارتی، همگی از عوامل مؤثر بر توسعه مطلوب سطح برگ در گندم هستند. پژوهش‌های مختلف نیز این ارتباط را تأیید کرده‌اند، به‌طوری

علاوه بر تأثیر مستقیم دما، بارندگی و تنش حرارتی بر اجزای عملکرد نظیر تعداد در خوشه و وزن هزار دانه، این عوامل می‌توانند از طریق اثر بر شاخص‌های فیزیولوژیکی ثانویه مانند شاخص سطح برگ نیز عملکرد دانه را تحت‌تأثیر قرار دهند. برای مثال، در تاریخ‌های کاشت دیرتر، افزایش شاخص سطح برگ در مناطق گرمسیری مانند پلدختر از ۱/۴۹ به ۱/۶۴ ثبت شد (جدول ۴)، که بیانگر پوشش سبزینه‌ای مطلوب‌تر و افزایش ظرفیت فتوسنتزی گیاه است. از سوی دیگر، در مناطق سردتری نظیر الیگودرز و بروجرد، تاریخ کاشت زودهنگام ۱۵ مهر موجب شد که گیاه گندم در

که افزایش سطح سبزینه در کنار کاهش تنش گرمایی با افزایش در تعداد دانه در خوشه، وزن دانه و در نهایت عملکرد دانه همراه بوده است (Chen et al., 2018; Gambín et al., 2008). در یک مطالعه تجربی دیگر مشخص شد که تنش حرارتی در مرحله پر شدن دانه می‌تواند تا ۴۶ درصد موجب کاهش کارایی فتوسنتزی شده و نهایتاً ۵۹ درصد افت عملکرد را در برخی از ارقام گندم به دنبال داشته باشد (Djanaguiraman et al., 2020). این نتایج نشان می‌دهند که تنش گرمایی نه تنها از طریق تخریب مستقیم گل و دانه، بلکه با کاهش پتانسیل رشد سبزینه و فعالیت فتوسنتزی گیاه نیز در کاهش عملکرد نقش مهمی دارد.

همبستگی منفی و معنی‌داری بین عملکرد دانه با شاخص‌های تنش حرارتی شامل درجه روزهای تنش حرارتی (HSDD)، فراوانی تنش حرارتی (HSF) و مدت‌زمان تنش حرارتی (HSDU) (به ترتیب برابر با ۰/۶۳، -۰/۵۹ و -۰/۵۵) وجود داشت ($p < 0.05$) (شکل ۴). این روابط منفی بیانگر اثرات مخرب تنش گرمایی بر مراحل زایشی، به‌ویژه گلدهی و پرشدن دانه است که می‌تواند با کاهش تعداد دانه در خوشه، وزن هزار دانه و در نهایت کاهش عملکرد نهایی، همراه باشد. این موضوع را می‌توان در شکل ۴ نیز مشاهده کرد جایی که شاخص‌های تنش‌های گرمایی همبستگی منفی با وزن هزار دانه و تعداد دانه در خوشه داشتند. نتایج این تحقیق با مطالعات پیشین نیز مطابقت دارد. مطالعات هافیز و همکاران (Liu et al., 2023) و لیو و همکاران (Liu et al., 2016) نشان داده‌اند که تنش گرمایی با کاهش وزن هزار دانه، تراکم دانه و کیفیت نهایی، تأثیر منفی قابل‌توجهی بر عملکرد دارد. همچنین، پاندی و همکاران (Pandey et al., 2022) گزارش کردند که دماهای بیش از ۳۲ درجه سانتی‌گراد در فاز گلدهی، کاهش معنی‌داری در وزن هزار دانه و تراکم دانه در سنبله ایجاد می‌کند. در ایران در آزمایشی تحت دو شرایط نرمال و تنش گرمایی آخر فصل در اهواز گزارش شده است که تنش گرمایی آخر فصل باعث کاهش تعداد دانه در خوشه، وزن هزار دانه و عملکرد دانه ارقام مختلف گندم به ترتیب ۱۹ درصد، ۱۴ درصد و ۴۱ درصد در مقایسه با شرایط نرمال شد (Omidi et al., 2014). در مقابل، همبستگی مثبت و معنی‌داری میان عملکرد دانه و شاخص سطح برگ (+۰/۷۴) و بارندگی تجمعی فصل رشد (+۰/۶۷) مشاهده شد ($p < 0.05$) (شکل ۴). این یافته‌ها نقش کلیدی توسعه پوشش سبزینه و تأمین رطوبت کافی در

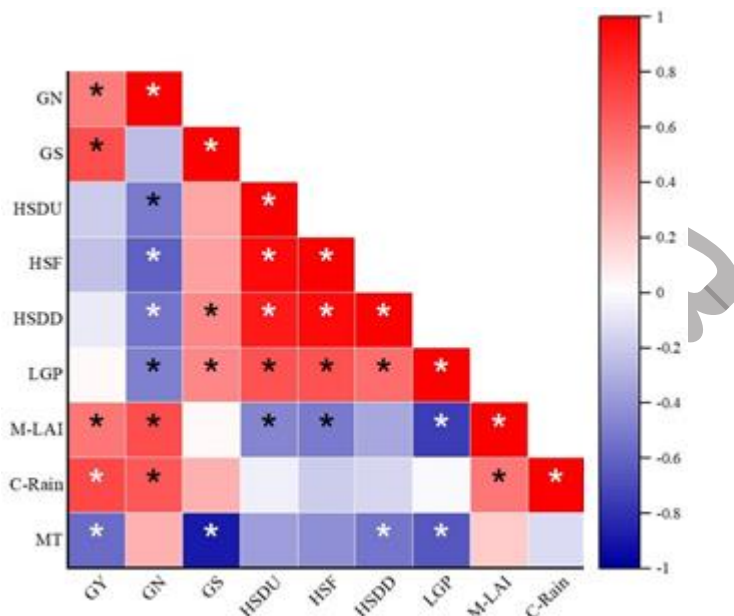
ارتقای ظرفیت فتوسنتزی و در نهایت افزایش عملکرد را تأیید می‌کند. در همین راستا، پژوهش لیو و همکاران (Liu et al., 2016) نیز تأکید کرده‌اند که افزایش شاخص سطح برگ در مرحله گلدهی، نقش مؤثری در کاهش اثرات منفی دماهای بالا بر عملکرد دارد. در نهایت، این مطالعه که با بهره‌گیری از سه روش مستقل مدل‌سازی صورت گرفته است، تأکید دارد که توسعه مطلوب پوشش سبزینه در مراحل بحرانی رشد، به‌ویژه در فاز گلدهی و پرشدن دانه، می‌تواند از طریق بهبود ظرفیت فتوسنتزی، تعدیل دمای برگ و حفظ تعادل آبی گیاه، اثرات منفی تنش حرارتی را کاهش داده و به پایداری عملکرد گندم در مناطق گرم و تحت کشت دیم کمک شایانی نماید.

نتیجه‌گیری

بر پایه نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی‌های اقلیمی و زراعی در این پژوهش، می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که تنش گرمایی، به‌ویژه در مراحل زایشی و پر شدن دانه، یکی از مهم‌ترین عوامل محدودکننده عملکرد گندم در اقلیم‌های متنوع استان لرستان محسوب می‌شود. شدت این تنش به‌شدت وابسته به منطقه جغرافیایی و به‌ویژه تاریخ کاشت است، به‌گونه‌ای که در مناطق گرمسیر مانند پلدختر، کاشت زود هنگام موجب فرار گرفتن مرحله گلدهی در معرض دماهای بحرانی شده و شاخص‌های حرارتی (HSF، HSDD) و HSDU را به شکل معنی‌داری افزایش می‌دهد. در مقابل، در مناطق سردتر مانند بروجرد و الیگودرز، کاشت زود هنگام نه تنها از شدت تنش حرارتی کاسته، بلکه به بهبود عملکرد منجر شده است. نتایج به‌روشنی نشان داد که شاخص‌های حرارتی با کاهش تعداد در خوشه و وزن هزار دانه، اثر منفی مستقیم بر عملکرد دارند. در مجموع، یافته‌های این پژوهش تأکید دارند در سیستم‌های کشت گندم دیم علاوه بر الگوی خشکی باید به الگوی تنش گرمایی برای جلوگیری از افت عملکرد دانه گندم توجه ویژه‌ای شود و رویکرد تلفیقی مبتنی بر تحلیل اقلیم، تنظیم زمان کاشت و سایر مدیریتهای زراعی می‌تواند پایه‌ای علمی و عملی برای طراحی تقویم زراعی بهینه و تاب‌آور در مواجهه با تنش گرمایی در مناطق دیم‌خیز استان لرستان و سایر نواحی مشابه در ایران به‌ویژه تحت شرایط افزایش دما و تغییرات اقلیمی باشد. همچنین، با توجه به اینکه هدف مطالعه حاضر بررسی اثرات ارقام مختلف نبود، پیشنهاد می‌شود مطالعات آینده بر ارزیابی پاسخ ارقام مختلف در مواجهه با تنش گرمایی متمرکز شوند. در خصوص تفاوت

Azar-2 بود که انتخاب آن برای همه مناطق با اقلیم‌های مختلف بر اساس غالبیت در سطح استان انجام شده است، هرچند این رقم به‌طور خاص برای مناطق سرد و معتدل توصیه می‌شود.

دامنه تاریخ‌های مختلف کاشت، باید اشاره کرد که این تاریخ‌ها بر اساس شرایطی که در بخش مواد و روش‌ها توضیح داده شده، از طریق مجموعه‌ای از شبیه‌سازی‌های مستقل به دست آمده‌اند. علاوه بر این، رقم استفاده شده در این تحقیق، رقم



شکل ۴. همبستگی ساده بین صفات مختلف گندم دیم. GY: عملکرد دانه؛ GN: تعداد دانه در خوشه؛ GS: وزن هزار دانه؛ HSDU: مدت زمان تنش حرارتی؛ HSF: فراوانی تنش حرارتی؛ HSDD: درجه روزهای تنش حرارتی؛ LGP: طول دوره رشد؛ M-LAI: بیشینه شاخص سطح برگ؛ C-Rain: بارندگی تجمعی در طول فصل رشد؛ MT: میانگین بیشینه دما از گل‌انگیزی تا رسیدگی.

Fig. 4. Simple correlation among different traits of rainfed wheat. GY: grain yield; GN: grain number per spike; GS: 1000-grain weight; HSDU: heat stress duration; HSF: heat stress frequency; HSDD: heat stress degree days; LGP: Length of the growth period; M-LAI: maximum leaf area index; C-Rain: cumulative rainfall during the growing season; MT: mean maximum temperature from floral initiation to maturity.

منابع

- Ababaei, B., Chenu, K., 2020. Heat shocks increasingly impede grain filling but have little effect on grain setting across the Australian wheatbelt. *Agricultural and Forest Meteorology*. 284, 107889. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.107889>
- Abbasi Alikamar, R., Nassiri Mahallati, M., Koocheki, A., 2020. Evaluation of temperature changes and its impacts on seed filling period and grain yield of wheat (*Triticum aestivum* L.) in different regions of Iran (1992-2012). *Journal of Agroecology*. 12(2), 319-343. [In Persian with English Summary]. <https://doi.org/10.22067/jag.v12i2.58737>
- Appiah, M., Bracho-Mujica, G., Ferreira, N.C., Schulman, A.H., Rötter, R.P., 2023. Projected impacts of sowing date and cultivar choice on the timing of heat and drought stress in spring barley grown along a European transect. *Field Crops Research*. 291, 108768. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2022.108768>
- Bennett, D., Izanloo, A., Reynolds, M., Kuchel, H., Langridge, P., Schnurbusch, T., 2012. Genetic dissection of grain yield and physical grain quality in bread wheat (*Triticum aestivum* L.) under water-limited environments.

- Theoretical and Applied Genetics. 125, 255-271. <https://doi.org/10.1007/s00122-012-1831-9>
- Chen, Y., Zhang, Z., Tao, F., Palosuo, T., Rötter, R.P., 2018. Impacts of heat stress on leaf area index and growth duration of winter wheat in the North China Plain. *Field Crops Research*. 222, 230-237. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.06.007>
- Chenu, K., Collins, B., Ullah, N., Frederiks, T., Christopher, J., 2021. Increasing heat tolerance in wheat in West Australia. *GRDC Grains Research Update*. Queensland, Australia.
- Chenu, K., Deihimfard, R., Chapman, S.C., 2013. Large-scale characterization of drought pattern: a continent-wide modelling approach applied to the Australian wheatbelt—spatial and temporal trends. *New Phytologist*. 198(3), 801-820. <https://doi.org/10.1111/nph.12192>
- Collins, B., Chenu, K., 2021. Improving productivity of Australian wheat by adapting sowing date and genotype phenology to future climate. *Climate Risk Management*. 32, 100300. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2021.100300>
- Deihimfard, R., Rahimi-Moghaddam, S., Eyni-Nargeseh, H., Collins, B., 2023. An optimal combination of sowing date and cultivar could mitigate the impact of simultaneous heat and drought on rainfed wheat in arid regions. *European Journal of Agronomy*. 147, 126848. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2023.126848>
- Dias, A.S., Lidon, F.C., 2009. Evaluation of grain filling under heat stress. *Journal of Agronomy and Crop Science*. 195(2), 137–147. <https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2008.00347.x>
- Djanaguiraman, M., Narayanan, S., Erdayani, E., Prasad, P.V., 2020. Effects of high temperature stress during anthesis and grain filling periods on photosynthesis, lipids and grain yield in wheat. *BMC Plant Biology*. 20, 1-12. <https://doi.org/10.1186/s12870-020-02479-0>
- Dubey, R., Pathak, H., Chakrabarti, B., Singh, S., Gupta, D.K., Harit, R.C., 2020. Impact of terminal heat stress on wheat yield in India and options for adaptation. *Agricultural Systems*. 181, 102826. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.102826>
- FAO, 2023. FAOSTAT. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, <https://faostat.fao.org>, 403
- Farajzadeh, M., Ghavidel Rahimi, Y., Asadzadeh, B., 2021. The evaluation of climate change effects on wheat yield in Iran. *Climate Change Research*. 2(6), 1-18. [In Persian with English Summary]. <https://doi.org/10.30488/ccr.2021.261267.1031>
- Fernie, E., Tan, D.K., Liu, S.Y., Ullah, N. and Khoddami, A., 2022. Post-anthesis heat influences grain yield, physical and nutritional quality in wheat: A review. *Agriculture*. 12(6), 886. <https://doi.org/10.3390/agriculture12060886>
- Gambín, B.L., Borrás, L., Otegui, M.E., 2008. Kernel weight dependence upon plant growth at different grain-filling stages in maize and sorghum. *Australian Journal of Agricultural Research*. 59(3), 280-290. <https://doi.org/10.1071/AR07275>
- Gunn, K.M., Holly, M.A., Veith, T.L., Buda, A.R., Prasad, R., Rotz, C.A., Soder, K.J., Stoner, A.M., 2019. Projected heat stress challenges and abatement opportunities for U.S. Milk production. *PLOS ONE*. 14(3), e0214665. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0214665>
- Hafeez, M.B., Zahra, N., Kausar, A., Li, J., Rehman, A., Farooq, M., 2023. Influence of heat stress during grain development on the wheat grain yield, quality, and composition. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 23(3), 2955-2969. <https://doi.org/10.1007/s42729-023-01386-1>
- Holzworth, D.P., Huth, N.I., Zurcher, E.J., Herrmann, N.I., McLean, G., Chenu, K., van Oosterom, E.J., Snow, V., Murphy, C., Moore, A.D., Brown, H. 2014. APSIM—evolution towards a new generation of agricultural systems simulation. *Environmental Modelling & Software*. 62, 327–350. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.07.009>
- Hunt, J.R., Lilley, J.M., Trevaskis, B., Flohr, B.M., Peake, A., Fletcher, A., Zwart, A.B., Gobbett, D., Kirkegaard, J.A., 2019. Early sowing systems can boost Australian wheat yields despite recent climate change. *Nature Climate Change*. 9(3), 244-247. <https://doi.org/10.1038/nclimate2470>
- IMO. 2021. Iran Meteorological Organization. Available at: <https://www.irimo.ir>
- Ishtiaque, A., Singh, S., Lobell, D., Fishman, R., Jain, M., 2022. Prior crop season management constrains farmer adaptation to warming

- temperatures: evidence from the Indo-Gangetic Plains. *Science of the Total Environment*. 807, 151671.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151671>
- Khodashenas, A., 2021. Evaluation of response of wheat cultivars and lines to delay in planting date in Mashhad conditions. *Journal of Crops Improvement*. 23(4), 741-727. [In Persian with English Summary].
<https://doi.org/10.22059/jci.2021.306231.2419>
- Koocheki, A., Nasiri Mahalati, M., 2008. Impacts of climate change and CO₂ concentration on wheat yield in Iran and adaptation strategies. *Iranian Journal of Field Crops Research*. 6(1), 139-154. [In Persian with English Summary].
<https://doi.org/10.22067/gsc.v6i1.1185>
- Kuchel, H., Williams, K., Langridge, P., Eagles, H.A., Jefferies, S.P., 2007. Genetic dissection of grain yield in bread wheat. II. QTL-by-environment interaction. *Theoretical and Applied Genetics*. 115, 1015-1027.
<https://doi.org/10.1007/s00122-007-0628-8>
- Liu, B., Asseng, S., Müller, C., Ewert, F., Elliott, J., Lobell, D.B., Martre, P., Ruane, A.C., Wallach, D., Jones, J.W., Rosenzweig, C., 2016. Similar estimates of temperature impacts on global wheat yield by three independent methods. *Nature Climate Change*. 6(12), 1130-1136. <https://doi.org/10.1038/nclimate3115>
- Liu, B., Liu, L., Tian, L., Cao, W., Zhu, Y., Asseng, S., 2014. Post-heading heat stress and yield impact in winter wheat of China. *Global Change Biology*. 20, 372-381.
<https://doi.org/10.1111/gcb.12442>
- Lobell, D.B., Hammer, G.L., Chenu, K., Zheng, B., McLean, G., Chapman, S.C., 2015. The shifting influence of drought and heat stress for crops in northeast Australia. *Global Change Biology*. 21, 4115-4127.
<https://doi.org/10.1111/gcb.13022>
- Lobell, D.B., Sibley, A., Ivan Ortiz-Monasterio, J., 2012. Extreme heat effects on wheat senescence in India. *Nature Climate Change*. 2(3), 186-189.
<https://doi.org/10.1038/nclimate1356>
- MAJ, 2023. Ministry of Agriculture Jihad. Agricultural Statistics. Annual harvested area, production, and yield in 2022- 2023. 126p. [In Persian].
- Nachtergaele, F., Velthuizen, H.V., Verelst, L., Wiberg, D., 2009. Harmonized World Soil Database (HWSD). Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 1045.
- Nguyen, C.T., Singh, V., van Oosterom, E.J., Chapman, S.C., Jordan, D.R., Hammer, G.L., 2013. Genetic variability in high temperature effects on seed-set in sorghum. *Functional Plant Biology*. 40(5), 439-448.
<https://doi.org/10.1071/FP12264>
- Omidi, M., Siahpoosh, M.R., Mamaghani, R., Modaresi, M., 2014. The effects of terminal heat stress on yield, yield components and some morpho-phenological traits of wheat genotypes in Ahwaz weather conditions. *Journal of Crop Production*. 6(4), 33-53. [In Persian with English Summary].
<https://doi.org/20.1001.1.2008739.1392.6.4.3.5>
- Pandey, N., Tripathi, A.K., Mishra, R.M., 2022. The effects of heat stress on wheat and its vulnerability. A review. *International Research Journal of Plant Science*. 13(5), 1-5.
<https://doi.org/10.14303/irjps.2022.033>
- Porter, J.R., Gawith, M., 1999. Temperatures and the growth and development of wheat: a review. *European Journal of Agronomy*. 10(1), 23-36. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(98\)00047-1](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(98)00047-1)
- Prasad, P.V.V., Pisipati, S.R., Mutava, R.N., Tuinstra, M.R., 2008. Sensitivity of grain sorghum to high temperature stress during reproductive development. *Crop Science*. 48, 1911-1917.
<https://doi.org/10.2135/cropsci2008.01.0036>
- Rahimi-Moghaddam, S., Deihimfard, R., Azizi, K., Roostaei, M., 2021. Characterizing spatial and temporal trends in drought patterns of rainfed wheat (*Triticum aestivum* L.) across various climatic conditions: a modelling approach. *European Journal of Agronomy*. 129, 126333.
<https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126333>
- Saxton, K.E., Willey, P.H. 2005. The SPAW model for agricultural field and pond hydrologic simulation. In: Singh, V.P., Frevert, D.K. (Eds.), *Watershed Models*. CRC Press, Boca Raton, pp. 400-435.
- Singh, V., Nguyen, C.T., van Oosterom, E.J., Chapman, S.C., Jordan, D.R., Hammer, G.L. 2015. Sorghum genotypes differ in high temperature responses for seed set. *Field Crops Research*. 171, 32-40.
<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2014.11.003>

- Tao, F., Zhang, Z., Zhang, S., Rötter, R.P., 2015. Heat stress impacts on wheat growth and yield were reduced in the Huang-Huai-Hai Plain of China in the past three decades. *European Journal of Agronomy*. 71, 44-52. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2015.08.003>
- Wu, Y., Zhou, G., Song, Y., Ren, S., Geng, J., Zhao, H., Song, X., 2023. A Simulation study on optimization of sowing time of maize (*Zea mays* L.) for maximization of growth and yield in the present context of climate change under the north China plain. *Agronomy*. 13(2), 385. <https://doi.org/10.3390/agronomy13020385>
- You, L., Rosegrant, M.W., Wood, S., Sun, D., 2009. Impact of growing season temperature on wheat productivity in China. *Agricultural and Forest Meteorology*. 149(6-7), 1009-1014. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2008.12.004>
- Zhao, K., Tao, Y., Liu, M., Yang, D., Zhu, M., Ding, J., Zhu, X., Guo, W., Zhou, G., Li, C., 2022. Does temporary heat stress or low temperature stress similarly affect yield, starch, and protein of winter wheat grain during grain filling?. *Journal of Cereal Science*. 103, 103408. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2021.103408>

پیشین از انتشار