


Original Article



Determining the Optimal Flowering Time in Rainfed Wheat Under Simultaneous Heat and Drought Stresses in Some Regions of Iran as Predicted by APSIM-Wheat Model

Received: 2024.06.13
Accepted: 2024.07.21

Arezu Shahbazi,¹ Sara Abedini,¹ Reza Deihimfard,^{1*} 
Sajjad Rahimi-Moghaddam,² Omid Noori¹

¹ Department of
Agroecology,
Environmental Sciences
Research Institute, Shahid
Beheshti University,
Tehran, Iran

² Department of Agronomy
and Plant Breeding, Faculty
of Agriculture, Lorestan
University, Khorramabad,
Iran

EXTENDED ABSTRACT

Introduction: Drought and heat stress as the most important limiting factors in the production of crops and finally food security, have resulted from changing climate due to human interventions in increasing greenhouse gas emissions. It is also simulated that each 1 °C increase in temperature caused a 6% decline in global wheat production. The increase in temperature can further decline grain yield when occurred during the reproductive stage. The simultaneous effects of drought and heat during the growth stages, especially the flowering and grain filling stages, which are the most sensitive, can be more harmful than the individual effects and lead to a significant reduction in yield. The current study aimed at determining the optimal cultivar × sowing date in different climates to coincide the flowering date with optimum climatic conditions (temperature and rainfall) using a simulation modeling approach.

Material and Methods: The current study was conducted in eight locations with different climates according to the GYGA (Global Yield Gap Atlas) methods. Dezful and Shushtar had warm and dry climates with high fluctuations in average seasonal temperature, Hamedan and Nahavand had mild and dry climates with medium fluctuations in average seasonal temperature, Khorramabad and Aligodarz had mild and dry climates with high fluctuations in average seasonal temperature and Zanjan and Khodabandeh had cold and dry climates with medium fluctuations in average seasonal temperature. Choosing the study locations was based on both areas under wheat cultivation and the diversity in their climates. In this research, several management methods including 4 sowing dates, 4 initial soil water, and 3 cultivars in 8 locations with different climates for 37 years (1980-2016) were investigated. A modified version of the APSIM-Wheat model was used in which a heat stress module could capture the impacts of heat stress on grain number and weight. The simulations were conducted under drought stress alone (rainfed) as well as the simultaneous drought and heat stress.

Results and Discussion: The average grain yield under drought conditions was simulated at 2.99 tons per hectare, while the yield under simultaneous drought and heat stress was 2.44 tons per hectare, indicating a reduction of approximately 0.5 tons per hectare due to the combined effect of heat and drought stress. The mid-maturity cultivar had the highest yield reduction of 52% while the very early-maturity cultivar showed the lowest yield reduction of 0.16%. The wheat flowering time in cold regions occurred after the completion of flowering in warmer locations. In temperate climates, the occurrence of flowering dates was more extensive than in other locations. Overall, any delay in emergence under rainfed resulted in further yield reduction in all cultivars and locations.

Conclusion: Under warm climates, an early-maturity cultivar along with early sowing could provide better environmental conditions for photosynthesis and plants could escape from terminal drought and heat stresses. In contrast, in cold climates, any delay in flowering date increases yield. In mild regions, using a mid-maturity cultivar resulted in late flowering dates and higher yields in spite of coinciding wheat with heat and drought for a short period of time.

Keywords: Cultivar, Terminal drought, Simulation, Sowing date

How to cite this article:
Shahbazi, A., Abedini, S.,
Deihimfard, R., Rahimi-
Moghaddam, S. and Noori,
O., 2024. Determining the
Optimal Flowering Time in
Rainfed Wheat Under
Simultaneous Heat and
Drought Stresses in Some
Regions of Iran as Predicted
by APSIM-Wheat Model.
Environ. Sci. 22(4): 643-
658.

* Corresponding Author Email Address: deihim@sbu.ac.ir
DOI: 10.48308/envs.2024.1409



Copyright: © 2024 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

تعیین دوره گلدهی بهینه در گندم دیم تحت شرایط تنش گرما و خشکی در برخی مناطق کشور با استفاده از مدل APSIM-Wheat



تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۲۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۳۱

آرزو شهبازی^۱، سارا عابدینی^۱، رضا دیهیم فرد^{۱*}، سجاد رحیمی مقدم^۲، امید نوری^۱

چکیده مبسوط

سابقه و هدف: خشکی و تنش گرمایی از مهم‌ترین عوامل محدودکننده تولید محصولات زراعی هستند. اثرات هم‌زمان خشکی و گرما در طول مراحل رشد بخصوص مرحله گلدهی و پر شدن دانه که از حساس‌ترین مراحل هستند می‌تواند مضرتر از اثرات یکایک آن‌ها بوده و منجر به کاهش قابل توجه عملکرد شوند. در این تحقیق، ترکیب تاریخ کاشت × رقم بر مبنای هم‌زمانی تاریخ گلدهی گندم دیم با شرایط بهینه دمایی و نیز هم‌زمانی نیاز گیاه با بارندگی فصلی و در نهایت رسیدن به حداکثر عملکرد با استفاده از رهیافت مدل‌سازی، مورد بررسی قرار گرفته است.

^۱ گروه کشاورزی اکولوژیک، پژوهشکده علوم محیطی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
^۲ گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران

مواد و روش‌ها: این تحقیق در هشت منطقه در کشور با اقلیم‌های متفاوت انجام شد. ملاک انتخاب این مناطق سطح زیر کشت بالا و نیز تنوع اقلیمی این مناطق بود. طبقه‌بندی اقلیمی این مناطق بر اساس روش GYGA صورت گرفت. بر اساس این روش مناطق مورد مطالعه به سه دسته دزفول و شوشتر (اقلیم گرم و خشک با تغییرات بالا در میانگین دمای فصلی)، همدان و نهاوند (اقلیم ملایم و خشک با تغییرات متوسط در میانگین دمای فصلی) خرم‌آباد و الیگودرز (اقلیم ملایم و خشک با تغییرات بالا در میانگین دمای فصلی) و زنجان و خدابنده (اقلیم سرد و خشک با تغییرات متوسط در میانگین دمای فصلی) دسته‌بندی شدند. در این پژوهش چندین روش مدیریتی شامل چهار تاریخ کاشت، چهار مقدار اولیه آب خاک و سه رقم در هشت منطقه با اقلیم‌های متفاوت به مدت ۳۷ سال (۱۹۸۰ - ۲۰۱۶) با استفاده از یک نسخه تغییر یافته مدل APSIM یکبار در شرایط تنش خشکی به تنهایی (دیم) و یکبار در شرایط هم‌زمان تنش خشکی و گرما مورد بررسی قرار گرفتند تا بهترین تاریخ گلدهی تحت تاثیر این تیمارهای مدیریتی در مناطق کشت گندم دیم تعیین شود.

نتایج و بحث: میانگین عملکرد دانه در شرایط خشکی برابر با ۲/۹۹ تن در هکتار و در شرایط هم‌زمان خشکی و گرما برابر ۲/۴۴ تن در هکتار شبیه سازی شد. کاهش حدود ۵۰۰ کیلوگرم در هکتار عملکرد به دلیل تأثیر متقابل تنش گرما و خشکی و هم‌زمانی گلدهی با دماهای آستانه خسارت گرما (شروع دمای بیشینه از ۲۶ تا ۳۵ درجه سانتی‌گراد) بر تعداد و وزن دانه و کاهش دوره رشد بود. به‌طور کلی با تأخیر در سبز شدن گندم در شرایط دیم، درصد کاهش عملکرد در تمامی مناطق و ارقام بیشتر شد. استفاده از رقم متوسط‌ترس با ۵۲٪ بیشترین کاهش عملکرد و رقم خیلی‌زودرس با ۱۶٪ کمترین کاهش عملکرد را به همراه داشت. گلدهی گندم در مناطق سرد بعد از اتمام گلدهی در مناطق گرم‌تر رخ داد و در اقلیم‌های معتدل وقوع تاریخ‌های گلدهی وسعت بیشتری نسبت به سایر مناطق داشت.

نتیجه‌گیری: به‌طور کلی در مناطق گرم، کاشت زودهنگام و ارقام زودرس می‌تواند با فراهم کردن زمان بیشتر برای فتوسنتز و فرار از گرما و خشکی باعث بهبود عملکرد شود. نتایج این تحقیق همچنین نشان داد در اقلیم‌های سرد با دیرتر شدن تاریخ گلدهی، عملکرد به‌صورت صعودی افزایش یافت لذا ارقام خیلی زودرس با تاریخ کاشت هفت اکتبر در این مناطق به کشاورزان توصیه می‌شود. در اقلیم‌های معتدل علی‌رغم اینکه گندم برای مدت کوتاهی با گرما و خشکی انتهای فصل مواجه شد، ارقام متوسط‌ترس در تاریخ‌های گلدهی دیرهنگام عملکرد بالاتری از خود نشان دادند.

واژه‌های کلیدی: رقم، خشکی انتهای فصل، شبیه‌سازی، تاریخ کاشت

استناد به این مقاله: شهبازی، آ.، س. عابدینی، ر. دیهیم فرد، س. رحیمی مقدم و ا. نوری. ۱۴۰۳. تعیین دوره گلدهی بهینه در گندم دیم تحت شرایط تنش گرما و خشکی در برخی مناطق کشور با استفاده از مدل APSIM-Wheat فصلنامه علوم محیطی. ۲۲(۴): ۶۵۸-۶۴۳

* Corresponding Author Email Address: deihim@sbu.ac.ir

DOI: 10.48308/envs.2024.1409



مقدمه

انتخاب گونه‌های سازگار است (Lamaoui *et al.*, 2018). یکی از روش‌های مناسب و کم‌هزینه برای اندازه‌گیری اثرات تنش گرما و خشکی بر عملکرد گیاهان، استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی رشد است که با استفاده از داده‌های بلندمدت هواشناسی می‌توان پاسخ گیاه را شبیه‌سازی کرد (Sharifi-Hadad *et al.*, 2021). با این مدل‌ها همچنین می‌توان زمان شروع و پایان گلدهی گندم را در شرایط مختلف مدیریتی مانند تاریخ کاشت، شرایط اقلیمی، و سایر عوامل محیطی پیش‌بینی کرد (Eyni-Nargeseh *et al.*, 2015). بطور مثال، در مطالعه‌ای Wang *et al.* (2015)، وقوع آخرین یخبندان و اولین گرمای سال را برای تعیین تاریخ بهینه گلدهی در کمربند گندم استرالیا مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. این محققین از میانگین داده‌های دمای روزانه، حداکثر و حداقل دمای روزانه از ۱۹ مدل اقلیمی (GCM) به همراه یک مدل فتوپریود - بهاره‌سازی به‌منظور شبیه‌سازی تاریخ‌های گلدهی آینده و تغییرات وقوع یخبندان و روزهای گرم در تاریخ‌های گلدهی در دو سناریوی تغییر اقلیم استفاده کردند. نتایج شبیه‌سازی این محققین نشان داد تا سال ۲۰۸۰، تاریخ گلدهی گندم بهاره در سراسر کمربند گندم به ترتیب ۱۰ و ۱۷ روز برای دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 زودتر اتفاق خواهد افتاد. همچنین، در مناطق گرم تاریخ گلدهی گندم زمستانه به طور متوسط ۲/۴ و ۱۴/۳ روز به تأخیر افتاد در حالی که در مناطق خنک‌تر، تاریخ گلدهی ۶/۲ و ۶/۷ روز به ترتیب برای دو رقم مورد مطالعه زودتر رخ داد. همچنین در قسمت‌های غربی کمربند گندم تأخیر در تاریخ گلدهی گندم زمستانه حدود ۹/۵ روز بیشتر از قسمت‌های شرقی بود. این محققین نتیجه‌گیری کردند که علی‌رغم کاهش خطر سرمازدگی، واکنش‌های فنولوژیکی به افزایش دما در وارپته‌های فعلی گندم ممکن است برای شرایط آب‌وهوایی آینده مناسب نباشد و ممکن است لازم باشد از رقم‌های گندم با طول دوره رشد طولانی‌تر و مقاوم‌تر در برابر تنش گرمایی استفاده شود. در مطالعه‌ای دیگر Deihimfard *et al.* (2023) چندین روش مدیریتی را برای بررسی تأثیر هم‌زمان

گندم یکی از مهم‌ترین غلات اصلی جهان است. فائو پیش‌بینی کرده است که مصرف جهانی گندم در سال ۲۰۲۴، ۱/۹ درصد نسبت به سال ۲۰۲۳ افزایش می‌یابد و به ۷۹۴ میلیون تن می‌رسد. همچنین تولید جهانی گندم در سال ۲۰۲۴ نسبت به سال قبل به ۷۹۱ میلیون تن کاهش یافته است (FAO, 2024). در نتیجه برای تولید بیشتر گندم به عملکرد بالاتر در واحد سطح نیاز است که کاهش منابع آب این مفهوم را به چالش می‌کشد؛ زیرا در دسترس بودن آب به‌شدت بر عملکرد محصول تأثیر می‌گذارد. این موضوع به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک دنیا که در مراحل تولیدمثل و پر شدن دانه میانگین تبخیر - تعرق از میانگین بارندگی فراتر رفته و منجر به خشکی شود، اهمیت دارد و تحت عنوان "خشکی انتهای فصل" شناخته می‌شود (Reynolds *et al.*, 2005). اگرچه خشکی ممکن است در تمام مراحل فنولوژیکی بر گندم تأثیرگذار باشد، مراحل گلدهی و پر شدن دانه حساس‌ترین هستند و منجر به کاهش قابل توجه عملکرد می‌شود (Pradhan *et al.*, 2012).

تقریباً در اکثر مناطق خشک دنیا، علاوه بر تنش خشکی، گندم در مراحل مختلف فنولوژیکی خود درجات مختلفی از تنش گرمایی را نیز تجربه می‌کند، اما تنش گرمایی در مرحله زایشی به دلیل تأثیر مستقیم آن بر تعداد و وزن دانه، خسارت بالاتری نسبت به مرحله رویشی به دنبال دارد (Wollenweber *et al.*, 2003). از این رو مهم است که اثرات خشکی و گرما با هم در نظر گرفته شوند؛ زیرا اثر ترکیبی آن‌ها بیشتر از زمانی است که به‌صورت جداگانه لحاظ می‌شوند (Dreesen *et al.*, 2012). در شرایط مزرعه، زمانی که کمبود آب و دمای بالا به طور هم‌زمان اتفاق می‌افتد، رشد و عملکرد گیاهان به‌ویژه در محیط‌های گرمسیری و نیمه‌گرمسیری به‌سرعت کاهش می‌یابد (Wahid *et al.*, 2007). در نتیجه، اجرای شیوه‌های مناسب مدیریت زراعی می‌تواند بطور بالقوه اثرات منفی خشکی و تنش‌های گرمایی را کاهش دهد که شامل مدیریت خاک و شیوه‌های کشت، تاریخ کاشت، آبیاری، بقایای گیاهی و مالچ پاشی، و

نیز هم‌زمانی نیاز گیاه با بارندگی فصلی و در نهایت رسیدن به حداکثر عملکرد با استفاده از رهیافت مدل‌سازی، مورد بررسی قرار گرفته است.

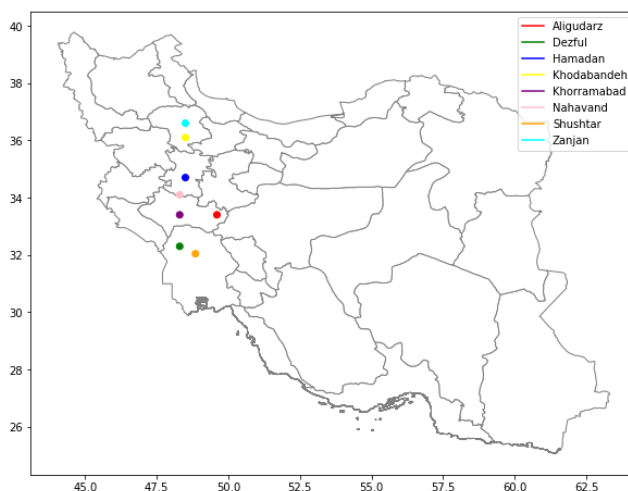
مواد و روش‌ها

طبقه‌بندی اقلیمی مناطق مورد مطالعه

این تحقیق در هشت منطقه در کشور با اقلیم‌های متفاوت انجام شد (شکل ۱). ملاک انتخاب این مناطق سطح زیر کشت بالا و نیز تنوع اقلیمی این مناطق بود. طبقه‌بندی اقلیمی این مناطق بر اساس روش 2 GYGA صورت گرفت (Soltani *et al.*, 2020). در این روش پهنه‌های اقلیمی بر اساس سه متغیر واحد دمایی^۳ (با دمای پایه صفر درجه سانتی‌گراد)، نوسانات دمای فصلی^۴ و شاخص خشکی سالیانه^۵ (بارش کل سالانه تقسیم بر تبخیر و تعرق پتانسیل سالانه) (Deihimfard *et al.*, 2023) از هم تفکیک می‌شوند. بر اساس این روش مناطق مورد مطالعه به سه دسته دزفول و شوشتر (اقلیم گرم و خشک با تغییرات بالا در میانگین دمای فصلی)، همدان و نهاوند (اقلیم ملایم و خشک با تغییرات متوسط در میانگین دمای فصلی) خرم‌آباد و الیگودرز (اقلیم ملایم و خشک با تغییرات بالا در میانگین دمای فصلی) و زنجان و خدابنده (اقلیم سرد و خشک با تغییرات متوسط در میانگین دمای فصلی) دسته‌بندی شدند (جدول ۱).

خشکی و تنش گرمایی بر عملکرد دانه گندم دیم در اقلیم‌های مختلف در سراسر ایران به مدت ۳۶ سال با کمک مدل‌های شبیه‌سازی بررسی کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که در شرایط دیم و بدون وجود تنش گرمایی، عملکرد رقم رایج در مناطق سردسیر تا ۱۰+ کیلوگرم در هکتار در سال افزایش و در مناطق معتدل و گرم ۱۴/۵ کیلوگرم در هکتار در سال کاهش یافته است. با افزودن تأثیر تنش گرمایی، میانگین عملکرد دانه از ۳/۳ تن در هکتار به ۲/۹ تن در هکتار کاهش یافت. نتایج این تحقیق همچنین نشان داد که تأثیر طولانی‌مدت خشکی و تنش گرمایی را می‌توان با ترکیب بهینه تاریخ کاشت، رقم و آب اولیه خاک بسته به پهنه‌های اقلیمی کاهش داد. ترکیبی از رقم زودرس با تاریخ کاشت زودتر بعنوان بهترین روش مدیریت برای مناطق سرد و معتدل شناخته شد، درحالی‌که یک رقم میان‌رس و تاریخ کاشت متوسط بهترین روش مدیریت برای آب‌وهوای گرم بود. بنابراین، مدل‌ها می‌توانند بعنوان یک ابزار تصمیم‌گیری توسط اصلاح‌گران و کشاورزان برای انتخاب گونه‌های بهبودیافته در ترکیب با مجموعه‌ای از صفات مهم فنولوژیکی و مدیریتی که اثرات سرما، گرما و تنش آبی را به حداقل می‌رساند، مورد استفاده قرار گیرند (Tefera *et al.*, 2024).

در این تحقیق، ترکیب بهینه تاریخ کاشت × رقم بر مبنای هم‌زمانی تاریخ گلدهی گندم دیم با شرایط بهینه‌دمایی و



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های مورد مطالعه

Fig. 1- Geographical location of the studied locations

جدول ۱- مشخصات جغرافیایی، اقلیمی و خاکی مناطق مورد مطالعه
Table 1. Geographical, climatic, and soil characteristics of the study locations

PAWC (میلی‌متر)	میانگین آب خاک اولیه* Initial soil water (mm/mm)	میانگین دمای فصلی Seasonal temperature (°C)	بارش تجمعی فصلی Seasonal precipitation (mm)	ارتفاع از سطح دریا Elevation (m)	طول و عرض جغرافیایی Longitude and latitude	منطقه Location
140.9	0.222	7	372	1993	33/4N 49/6E	الیگودرز Aligudarz
140.9	0.207	15.3	281	150	32/3N 48/3E	دزفول Dezful
140.9	0.208	6.3	281	1850	34/7N 48/5E	همدان Hamadan
140	0.227	6.3	372	2040	36/1N 48/5E	خدابنده Khodabandeh
140.9	0.233	9.4	438	1147	33/4N 48/3E	خرم‌آباد Khorramabad
140.9	0.211	8.2	326	1644	34/1N 48/3E	نهایند Nahavand
140	0.203	16.1	230	65	32/04N 48/85E	شوشتر Shushtar
140.9	0.197	6.2	256	1638	36/6N 48/5E	زنجان Zanjan

* آب خاک در زمان سبزشدن بر اساس مجموعه اول شبیه‌سازی‌های بلندمدت به دست آمد. PAWC: ظرفیت نگهداری آب خاک.

* Initial soil water at germination was obtained based on the first set of long-term simulations. PAWC: Plant Available Water Holding Capacity.

مدل شبیه‌سازی رشد گندم و ورودی‌های موردنیاز آن

برای شبیه‌سازی عملکرد گندم دیم و تعیین تاریخ کاشت و رقم بهینه هر منطقه بر اساس تنش‌های گرمایی و خشکی، از نسخه تغییر یافته مدل APSIM^۶ استفاده شد که در آن اثرات افزایش دما بر تعداد و وزن دانه مدل‌سازی شده است (Ababaei and Chenu, 2020). ماژول گندم در این مدل رشد و نمو گیاه را به صورت روزانه شبیه‌سازی می‌کند و به عوامل مختلف از جمله متغیرهای آب‌وهوایی (دما، بارش، تابش)، خاکی (آب و نیتروژن خاک)، ضرایب ژنتیکی رقم و اطلاعات مدیریتی گیاه زراعی وابسته است. این اطلاعات بعنوان ورودی مدل برای شبیه‌سازی رشد و عملکرد گندم استفاده شد. داده‌های بلندمدت اقلیمی (۱۹۸۰ - ۲۰۱۶) مناطق مورد بررسی از ایستگاه‌های هواشناسی جمع‌آوری گردید. این

داده‌ها شامل حداقل و حداکثر دمای روزانه (°C)، بارش (mm) و تابش خورشیدی ($\text{MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$) هستند. در صورت عدم وجود تابش در برخی مناطق، این داده‌ها با استفاده از روش‌های متداول در بازسازی داده‌های هواشناسی (برنامه WeatherMan^۷) تولید گردید. ورودی‌های خاکی در مدل شامل عمق خاک (cm)، وزن مخصوص ظاهری خاک (g cm^{-3})، ظرفیت آب خاک در نقطه پژمردگی ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)، ظرفیت آب خاک در نقطه زراعی ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)، ظرفیت آب خاک در نقطه اشباع ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)، آب اولیه و کربن آلی خاک (%). هستند که از بانک داده‌های HC27^۸ استخراج و بعنوان ورودی مدل APSIM استفاده شدند (McCown et al., 1995). داده‌های مدیریتی و ضرایب ژنتیکی ارقام در قسمت بعدی توضیح داده شده است.

جدول ۲- اطلاعات خاکی مناطق مورد مطالعه بر اساس روش HC27

Table 2. Soil information of the study locations based on the HC27

پروفیل خاک بر اساس HC27 Soil profile based on HC27	عمق نفوذ ریشه Root depth	حاصلخیزی* Soil fertility	بافت خاک Soil texture	منطقه Location
HC14-Loam MF120	120	متوسط	لومی	الیگودرز Aligudarz
HC17-Loam LF120	120	پایین	لومی	دزفول Dezful
HC5-Clay MF120	120	متوسط	رسی	همدان Hamadan
HC5-Clay MF120	120	متوسط	رسی	خدابنده Khodabandeh
HC12-Loam HF060	60	بالا	لومی	خرم‌آباد Khorramabad
HC12-Loam HF060	60	بالا	لومی	نهایند Nahavand
HC17-Loam HF120	120	پایین	لومی	شوشتر Shushtar
HC5-Clay MF120	120	متوسط	رسی	زنجان Zanjan

* حاصلخیزی در روش HC27 بر اساس میزان کربن خاک تعیین می شود.

* Soil fertility is determined based on soil organic carbon.

سناریوهای شبیه‌سازی

و متوسط‌ترس بودند. مدل APSIM-Wheat پیش‌تر برای این ارقام واسنجی و اعتبارسنجی شده است و نتایج ارزیابی نشان دهنده دقت بالای این مدل در شبیه‌سازی رشد و عملکرد گندم در بسیار از اقلیم‌های کشور تحت شرایط مدیریتی و خاکی گوناگون بود (Rahimi-Moghaddam *et al.*, 2021). تمامی شبیه‌سازی‌ها توسط مدل یکبار در شرایط دیم (فقط تنش خشکی) و یکبار در شرایط هم‌زمان تنش خشکی و گرما (با فعال نمودن ماژول تنش گرمایی در مدل) انجام شد. شاخص خشکی (DS) در دوره رشد گندم به صورت زیر شبیه‌سازی شد:

$$Drought\ Stress(DS) = \frac{soil\ water\ supply(mm)}{crop\ water\ demand(mm)} \quad (1)$$

شاخص خشکی در معادله ۱، از نسبت عرضه آب خاک به تقاضای آب توسط گیاه بدست می آید و مقدار آن بین صفر (تنش خشکی حداکثر) تا یک (بدون تنش خشکی) متغیر است. سایر ورودی‌های مدیریتی APSIM شامل خاک‌ورزی (رایج^۱)، عمق کاشت (۵ cm)، فاصله ردیف (۲۰ ccm)،

سناریوهای شبیه‌سازی در این تحقیق شامل چهار تاریخ کاشت، چهار مقدار آب اولیه خاک و سه رقم با درجات مختلف رسیدگی بودند. برای تعیین تاریخ کاشت‌ها و آب اولیه خاک در شرایط دیم یک آزمایش شبیه‌سازی اولیه انجام گرفت. به این صورت که مدل ابتدا با توجه به برای بازه کاشت گندم دیم (از مهر تا آذر) برای هر منطقه در طول ۳۷ سال (۱۹۸۰ - ۲۰۱۶) اجرا و زمان جوانه‌زنی گندم دیم شبیه‌سازی شد. با احتساب ۳۷ سال و هشت منطقه، در مجموع ۲۹۶ زمان جوانه‌زنی و همچنین ۲۹۶ مقدار آب خاک اولیه در زمان‌های جوانه‌زنی به صورت خروجی مدل، به دست آمد. براین اساس، ۲۰ امین، ۴۰ امین، ۶۰ امین و ۸۰ امین صدک زمان‌های جوانه‌زنی بعنوان تاریخ کاشت اول، دوم، سوم و چهارم به ترتیب ۷ اکتبر (۱۵ مهر)، ۲۰ اکتبر (۲۸ مهر)، ۳۱ اکتبر (۹ آبان) و ۱۰ نوامبر (۱۹ آبان) و مقادیر آب خاک^۹ در این زمان‌ها به عنوان آب خاک اولیه اول، دوم، سوم و چهارم برای هر منطقه در نظر گرفته شد. ارقام مورد مطالعه، سه رقم خیلی‌زودرس، زودرس (آذر-۲)

تا ۵، شبیه‌سازی تاریخ‌های گلدهی گندم در مناطق، تاریخ کاشت‌ها و ارقام مورد مطالعه نمایش داده شده است. به‌طور کلی در ارقام متوسط رس، وقوع تاریخ گلدهی در آستانه شروع خسارت تنش گرما (۲۶ درجه سانتی‌گراد دمای بیشینه) مصادف با اول ماه می (۱۲ اردیبهشت) می‌باشد و تا ۳۰ ژوئن (۱۰ تیر) ادامه می‌یابد. این در حالی است که با کاشت رقم خیلی زودرس در شرایط دیم، می‌توان از محدوده وقوع دماهای با ریسک بالا برای گندم فرار کرد (شکل ۴). نتایج مشابه برای شاخص خشکی (DS) نیز مشاهده شد (شکل ۵) به‌طوری‌که شروع ۵۰٪ تنش خشکی (خط افقی نقطه‌چین در شکل ۵) در ارقام متوسط رس، از ۲۸ آوریل (۹ اردیبهشت)، در رقم زودرس از ۲۱ می (یک خرداد) و در رقم خیلی زودرس این دوره بسیار کوتاه بود. به‌عبارت‌دیگر هر چقدر رقم زودرس‌تر باشد، درصد وقوع تنش‌های خشکی بالای ۵۰٪ و نیز دماهای بیشینه در محدوده ریسک بالا (۲۶ تا ۳۵ درجه سانتی‌گراد) کاهش می‌یابد. تأثیر این موضوع بر تعداد و وزن دانه مشهود است. برای مثال در رقم متوسط رس در مقایسه با رقم خیلی‌زودرس تعداد دانه بیشتر (با میانگین ۱۴۹۱۲ و ۸۵۳۱) بوده؛ اما اندازه دانه‌ها در رقم خیلی‌زودرس در برابر رقم متوسط رس بزرگ‌تر (با میانگین ۰/۰۳ و ۰/۰۱) بود. در سایر مطالعات نشان داده شده است که افزایش کمبود فشار بخار بدلیل کاهش بارندگی در طول دوره گلدهی (وقوع خشکی) احتمالاً می‌تواند گرده‌افشانی و انتقال مجدد کربوهیدرات‌های از پیش‌ذخیره شده از بافت‌های رویشی به دانه‌ها را مختل کند. علاوه بر این، روند افزایشی در میانگین دما در طول گلدهی و از شروع گل تا بلوغ منجر به کاهش قابل‌توجهی در تعداد دانه و تقاضای آب محصول شده است (Deihimfard et al., 2023).

به‌طور کلی میانگین عملکرد دانه در شرایط خشکی به‌تنهایی (دیم) برابر با ۲/۹۹ تن در هکتار و در شرایط هم‌زمان خشکی و گرما ۲/۴۴ تن در هکتار شبیه‌سازی شد که نشان‌دهنده کاهش حدود ۵۰۰ کیلوگرم در هکتار در کاهش

تراکم (۳۸۰ بوته در مترمربع)، و مقدار نیتروژن (kg ha^{-1}) توسط کارشناسان محلی از مراکز تحقیقاتی و آموزشی منابع طبیعی و وزارت کشاورزی در هر مکان به دست آمد و در تمام شبیه‌سازی‌ها ثابت در نظر گرفته شد (Deihimfard et al., 2023). در مجموع، با داشتن چهار تاریخ کاشت، چهار مقدار آب اولیه خاک، سه رقم، دو شرایط تنش (خشکی به‌تنهایی، خشکی + تنش گرما)، هشت منطقه و ۳۷ سال حدود ۱۵۰۰۰ آزمایش شبیه‌سازی برای تعیین بهترین تاریخ گلدهی گندم در مناطق دیم مورد مطالعه، توسط مدل انجام شد.

در این تحقیق تجزیه و تحلیل داده‌ها و ترسیم شکل‌ها با استفاده از نرم‌افزار پایتون (Python Software Foundation) انجام گرفت.

نتایج و بحث

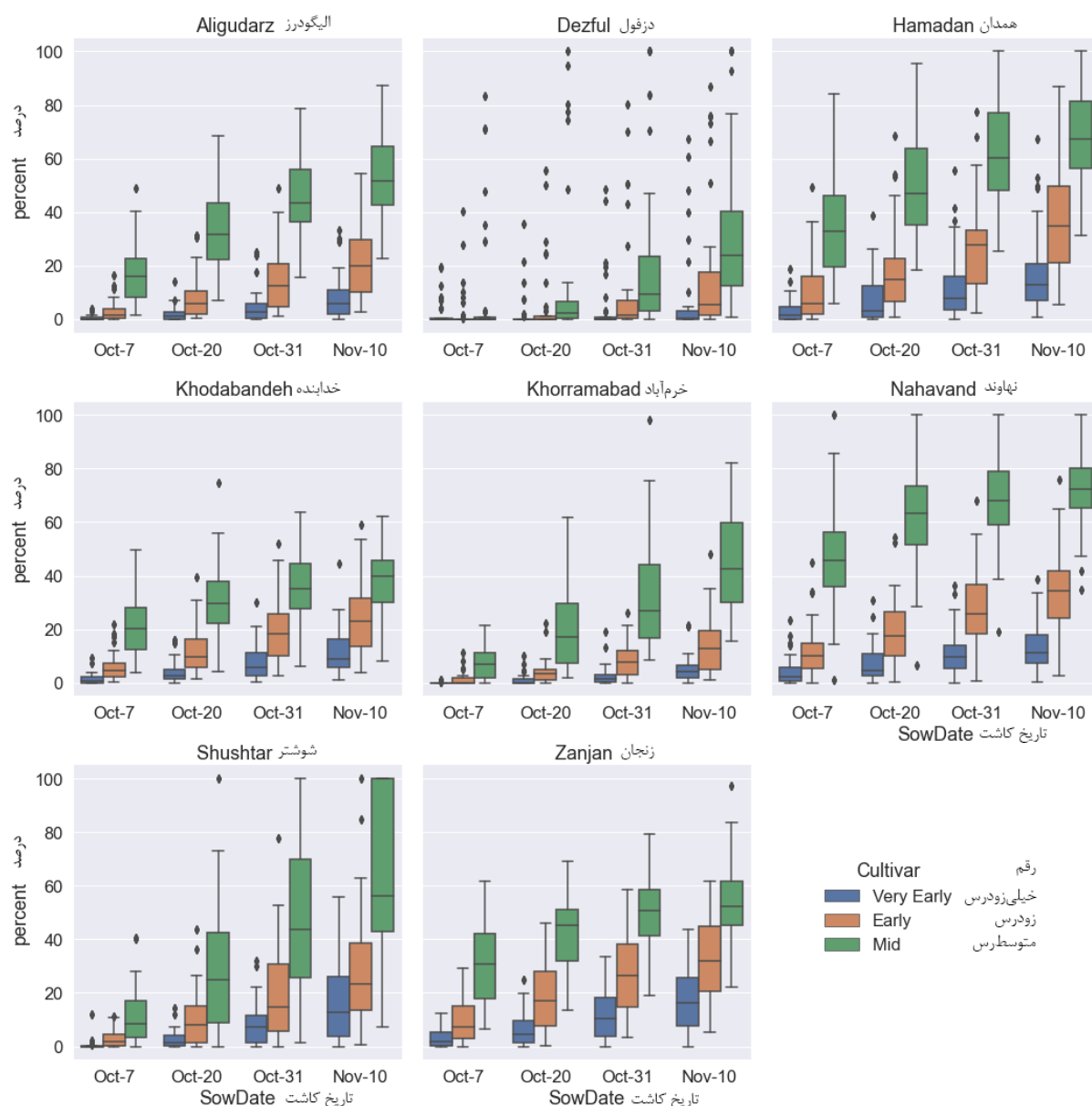
درصد کاهش عملکرد دانه گندم دیم در

تاریخ‌های گلدهی شبیه‌سازی شده

شکل ۲ درصد کاهش عملکرد دانه گندم در شرایط تنش هم‌زمان گرما و خشکی نسبت به شرایط خشکی در ارقام × تاریخ کاشت‌ها در مناطق مورد مطالعه را نشان می‌دهد. نوسان قابل‌ملاحظه‌ای (صفر تا ۵/۴۲ تن در هکتار) در کاهش عملکرد گندم در مناطق مورد مطالعه مشاهده شد به صورتی که بیشترین کاهش عملکرد در تمامی مناطق با رقم × تاریخ کاشت، ۱۰ نوامبر (۲۰ آبان) × متوسط رس (با میانگین کاهش عملکرد ۵۲/۲۲ درصد)، و کمترین آن با رقم × تاریخ کاشت، ۷ اکتبر (۱۶ مهر) × خیلی‌زودرس (با میانگین کاهش عملکرد ۰/۱۶ درصد) شبیه‌سازی شد (شکل ۲). به‌طور کلی با تأخیر در سبزشدن گندم در شرایط دیم، درصد کاهش عملکرد در تمامی مناطق و ارقام بیشتر شد. دلیل این موضوع هم‌زمانی تاریخ گلدهی با دماهای بالا و نیز خشکی انتهای فصل رشد است. بسیاری از مطالعات دیگر مانند Wang et al. (2015) نیز نشان‌دهنده تأثیر منفی هم‌زمانی تاریخ گلدهی با دماهای بالا بر عملکرد هستند. شکل‌های ۲

تاریخ‌های گلدهی در دامنه ریسک گرما، بسته به رقم متفاوت بود. به طور مثال ارقام متوسط رس در تمامی مناطق، حداقل برای یک دوره کوتاه در محدوده ریسک تنش گرمایی قرار دارند در حالی که در ارقام خیلی زودرس هم‌زمانی دماهای با ریسک بالا و وقوع تاریخ گلدهی در هیچ یک از مناطق مشاهده نشد (شکل ۶). این موضوع برای وقوع تنش‌های خشکی بالای ۵۰٪ نیز صادق بود (شکل ۷).

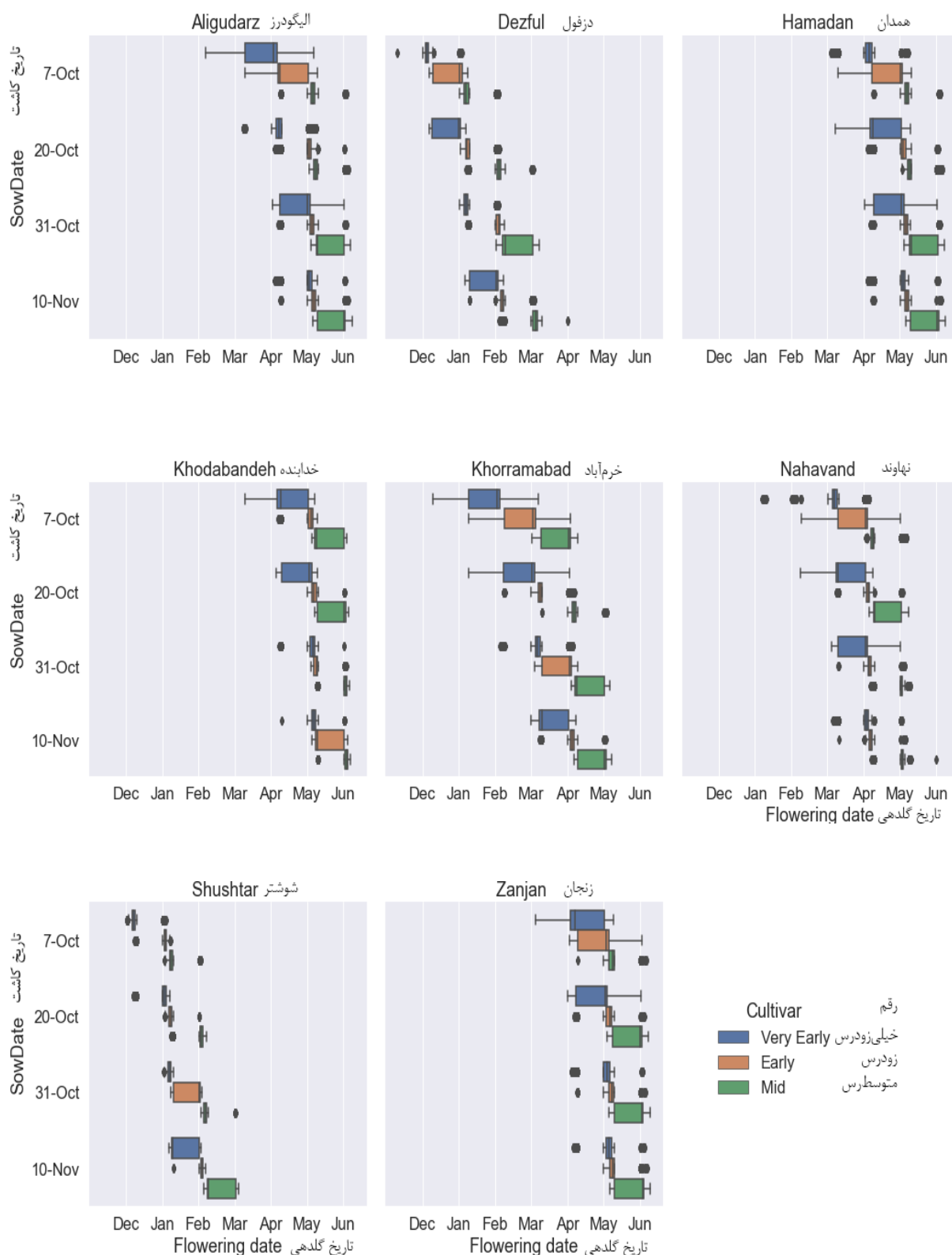
عملکرد بدلیل تنش گرما در این مناطق است. نتایج شبیه‌سازی تاریخ‌های گلدهی نشان داد که گلدهی گندم در مناطق سرد مانند زنجان و همدان و خدابنده از ماه می (اردیبهشت) شروع می‌شود و تا اواسط ماه ژوئن (خرداد) ادامه می‌یابد (شکل ۳ و شکل ۶). این در حالی است که در مناطق گرم‌تر مثل شوشتر و دزفول گلدهی در ماه‌های مارس - آوریل (فروردین) خاتمه می‌یابد. وقوع



شکل ۲- درصد کاهش عملکرد دانه در شرایط وقوع همزمان تنش گرما و خشکی نسبت به شرایط خشکی در ارقام x تاریخ کاشت‌ها در

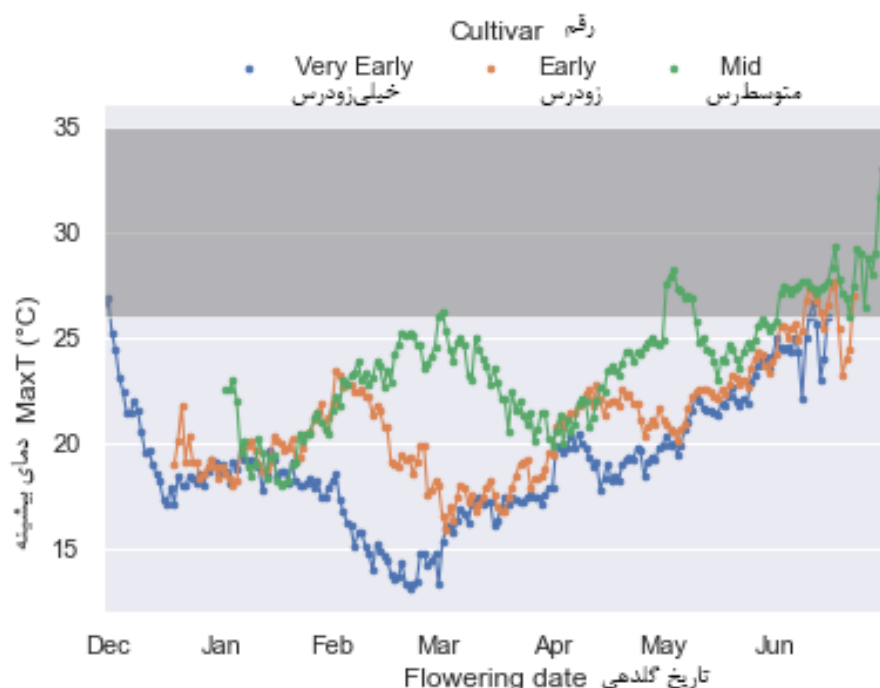
مناطق مورد مطالعه

Fig. 2- Grain yield reduction (%) under the simultaneous occurrence of heat and drought stress compared to drought conditions for all cultivars x sowing dates in the study locations

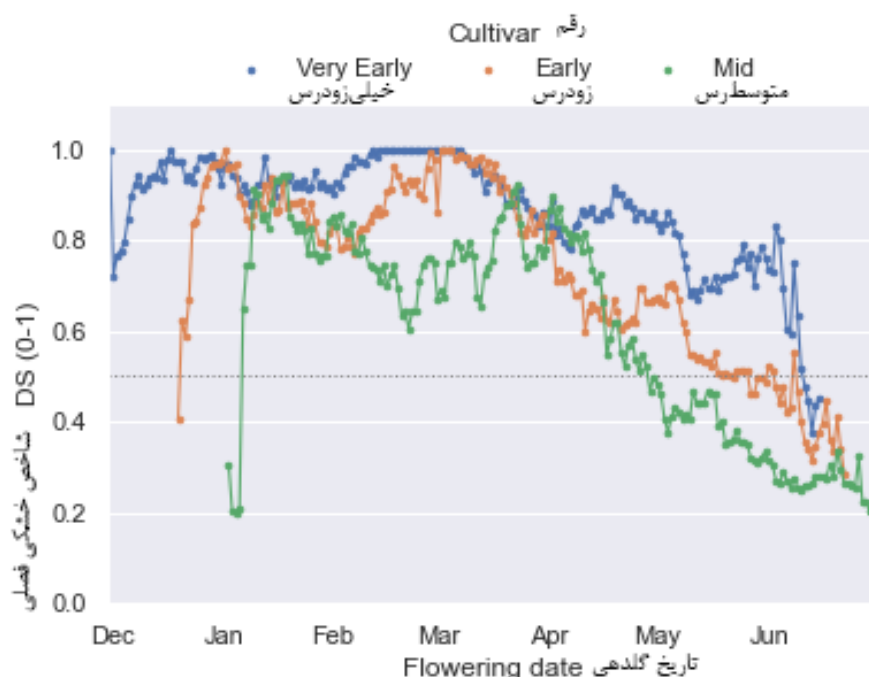


شکل ۳- شبیه سازی تاریخ گلدهی گندم به تفکیک ارقام × تاریخ های کاشت ها در تمامی مناطق و سال های مورد مطالعه (۱۹۸۰ تا ۲۰۱۶)

Fig. 3- Simulation of wheat flowering date by cultivars × sowing dates in all studied locations and seasons (1980 to 2016)

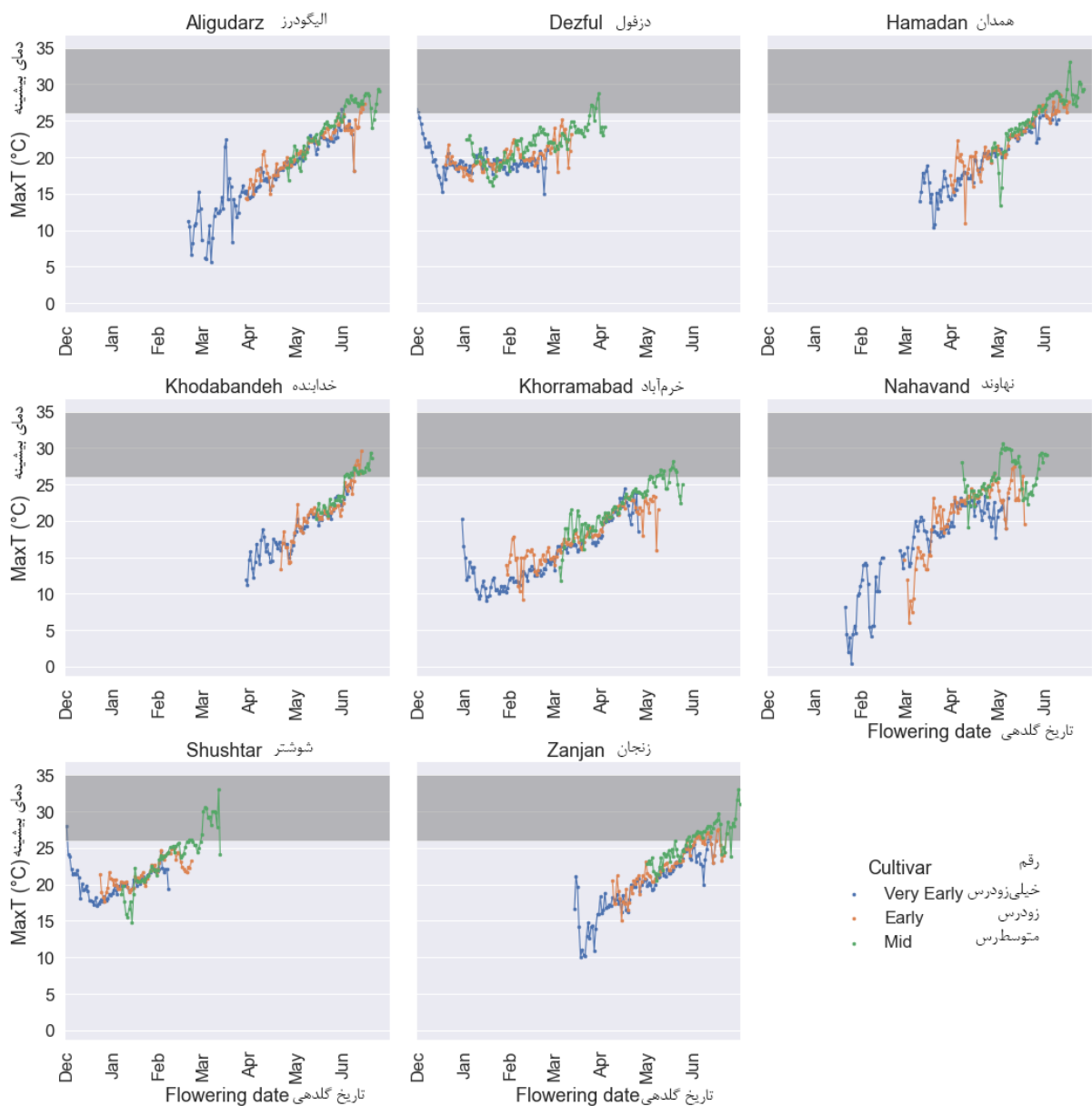


شکل ۴- شبیه سازی بلند مدت (۱۹۸۰ الی ۲۰۱۶) دمای بیشینه فصلی در تاریخ های گلدهی گندم به تفکیک ارقام مورد مطالعه (میانگین تمامی مناطق، سال ها و تاریخ های کاشت). محدوده خاکستری رنگ، نشاندهنده دماهای با ریسک بالا برای گندم است
 Fig. 4- Long-term (1980-2016) seasonal maximum temperature as a function of simulated flowering dates of wheat for each cultivar (averaged across locations, years, and sowing dates). The grey box indicates high-risk maximum temperatures for wheat



شکل ۵- شبیه سازی بلند مدت (۱۹۸۰ الی ۲۰۱۶) شاخص خشکی فصلی (بین صفر تا ۱) در تاریخ های گلدهی شبیه سازی شده گندم به تفکیک ارقام مورد مطالعه (میانگین تمامی مناطق، سال ها و تاریخ های کاشت). خط افقی نقطه چین نشان دهنده شاخص خشکی برابر ۰/۵ معادل ۵۰٪ تنش خشکی است

Fig. 5- Long-term (1980-2016) simulation of seasonal drought index (between 0 and 1) as a function of simulated wheat flowering dates for each cultivar (averaged across all locations, years, and sowing dates). The dotted horizontal line indicates the drought index equal to 0.5, equivalent to 50% drought stress



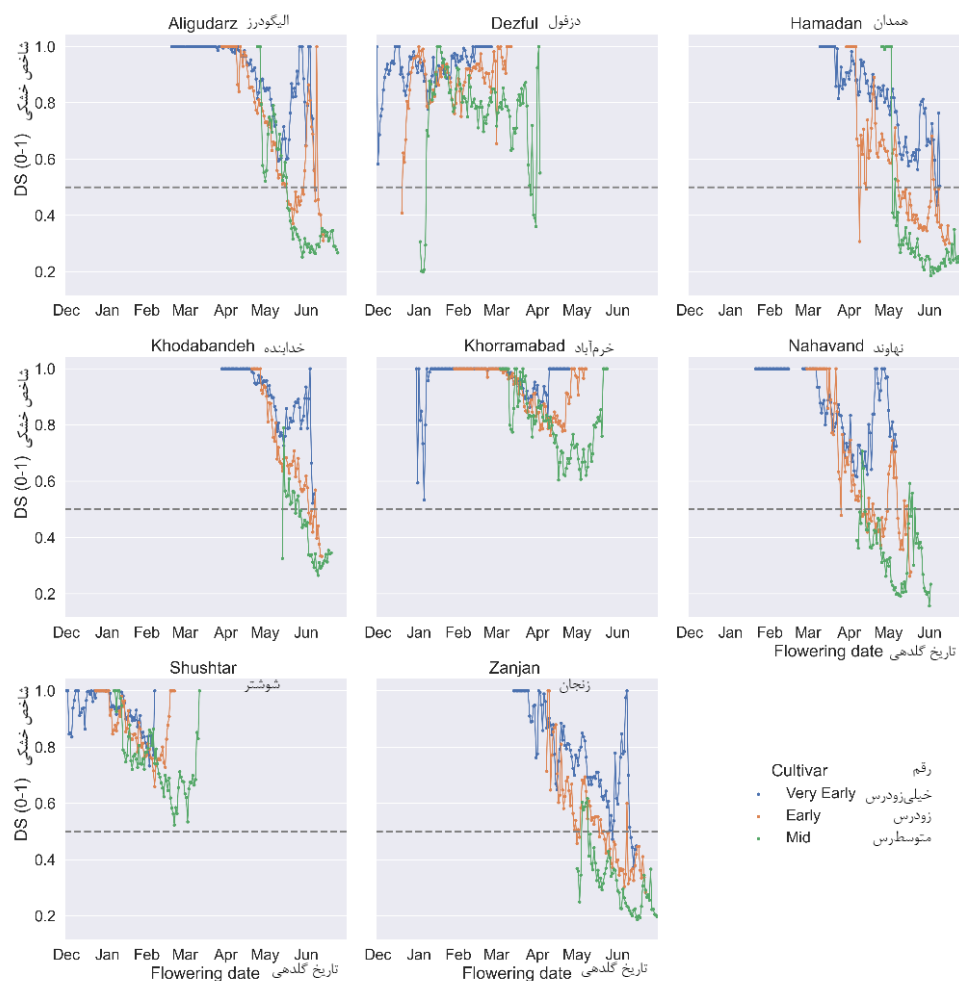
شکل ۶- شبیه سازی بلند مدت (۱۹۸۰ الی ۲۰۱۶) دمای بیشینه فصلی در تاریخ های گلدهی گندم به تفکیک ارقام و مناطق مورد مطالعه. محدوده خاکستری رنگ، نشان دهنده دماهای با ریسک بالا (از ۲۶ تا ۳۵ درجه سانتی گراد) برای گندم است

Fig. 6- Long-term (1980 to 2016) seasonal maximum temperature as a function of simulated flowering dates of wheat by cultivars and studied locations. The grey box indicates high-risk maximum temperatures (from 26 to 35 °C) for wheat

فرصت گیاه برای انجام فتوسنتز و تولید ماده خشک است که معمولاً در مناطق گرم رخ می دهد. در مقایسه چنانچه وقوع تاریخ گلدهی در ماه های می و ژوئن (خرداد) باشد میانه عملکرد از ۰/۳۷ تا ۰/۴۳ تن در هکتار متغیر است. شایان ذکر است که عملکرد گندم دیم بسته به رقم متفاوت بود (شکل ۸) که در بخش بعدی به آن اشاره شده است.

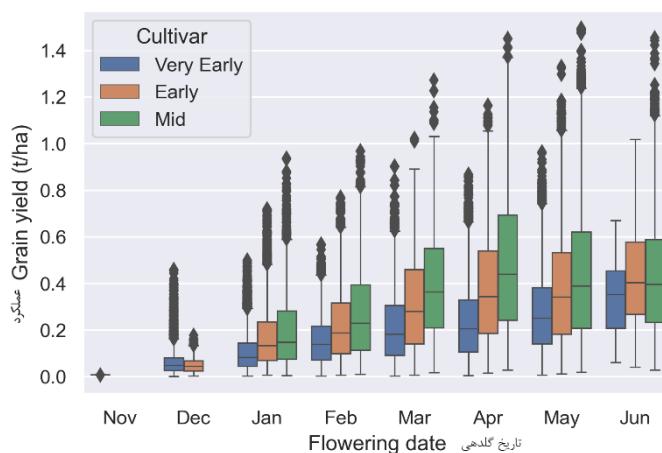
تعیین رقم × تاریخ گلدهی بهینه براساس عملکرد دانه

نتایج این تحقیق نشان داد با فعال بودن ماژول تنش گرمایی در مدل، زمانی که تاریخ گلدهی از ماه ژانویه تا آوریل (دی تا اردیبهشت) رخ دهد، میانه عملکرد از ۰/۱۲ تا ۰/۳۷ تن در هکتار (شکل ۸) نوسان خواهد داشت. پایین بودن عملکرد در این شرایط به دلیل کوتاه بودن



شکل ۷- شبیه سازی بلند مدت (۱۹۸۰ تا ۲۰۱۶) شاخص خشکی فصلی (DS) در تاریخ های گلدهی شبیه سازی شده گندم به تفکیک ارقام و مناطق مورد مطالعه. خط افقی نقطه چین نشان دهنده شاخص خشکی برابر ۰/۵ معادل ۵۰٪ تنش خشکی است

Fig. 7- Long-term (1980-2016) simulation of seasonal drought index (DS) as a function of simulated wheat flowering dates for each cultivar and location (averaged across all years and sowing dates). The dotted horizontal line indicates the drought index equal to 0.5, equivalent to 50% drought stress

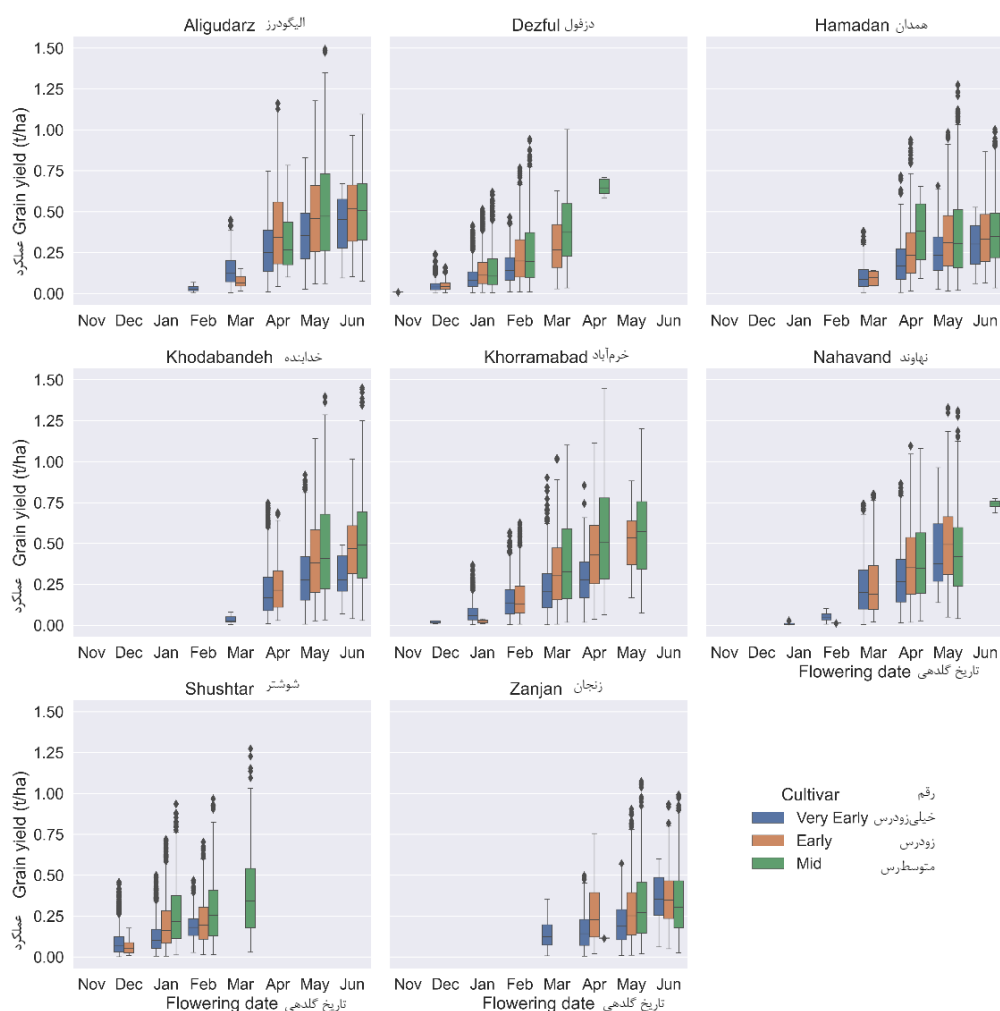


شکل ۸- پراکندگی عملکرد ارقام در تاریخ های گلدهی شبیه سازی شده (در تمامی مناطق و سال ها) تحت شرایط همزمان تنش خشکی و گرما

Fig. 8- The variability in grain yield of cultivars for each simulated flowering date under the simultaneous occurrence of drought and heat stress

در روز شد. درحالی که در اقلیم‌های سرد و خشک مثل زنجان، خدابنده و همدان تاریخ گلدهی از ماه آوریل (فروردین) به بعد همراه با روند عملکرد صعودی بود (میانه عملکرد ۰/۱۵ تا ۰/۳۱ تن در هکتار در زنجان، از ۰/۱۷ تا ۰/۴۸ در خدابنده و از ۰/۱۸ تا ۰/۳۴ در همدان، شکل ۹). در اقلیم‌های معتدل مثل خرم‌آباد، نهاوند و الیگودرز دامنه وقوع تاریخ‌های گلدهی وسعت بیشتری نسبت به سایر مناطق داشت. در این راستا نتایج مطالعه انجام شده توسط *Andarzian et al. (2015)* در دزفول نشان داد که بیشترین و کمترین عملکرد دانه گندم به ترتیب برای تاریخ کاشت ۱۵ آبان و ۲۵ مهر بدست آمد.

شکل ۹ این موضوع را به تفکیک مناطق مورد مطالعه نشان می‌دهد. در اقلیم‌های گرم و خشک تولید گندم به دلیل تنش گرمایی محدود است. برای بهینه‌سازی عملکرد، کاشت در زمان مناسب برای تناسب با دوره بلوغ رقم و فصل رشد حیاتی است (*Andarzian et al., 2015*). مثلاً در دزفول و شوشتر، وقوع تاریخ گلدهی از ماه آوریل (فروردین) به بعد مشاهده نشد و به پیرو آن عملکرد دانه‌ای هم تولید نشد. در این مناطق، تأخیر در تاریخ کاشت از ۲۵ اکتبر تا ۱۵ نوامبر منجر به افزایش عملکرد حدود ۰/۱۹۲ تن در هکتار در روز شد. در مقابل، تأخیر در تاریخ کاشت از ۱۵ نوامبر تا پنج ژانویه منجر به کاهش عملکرد حدود ۰/۰۴۶ تن در هکتار



شکل ۹- پراکندگی عملکرد دانه ارقام مورد مطالعه در تاریخ‌های گلدهی شبیه سازی شده در شرایط تنش همزمان گرما و خشکی به تفکیک مناطق مورد مطالعه

Fig. 9- The variability in grain yield of cultivars × locations for the simulated flowering dates under the simultaneous occurrence of drought and heat stress

این مناطق می‌تواند با فراهم کردن زمان بیشتر برای فتوسنتز و فرار از گرما و خشکی باعث بهبود عملکرد شود. در اقلیم‌های سرد با دیرتر شدن تاریخ گلدهی عملکرد به صورت صعودی افزایش نشان داد لذا ارقام خیلی زودرس با تاریخ کاشت ۷ اکتبر در این مناطق به کشاورزان توصیه می‌شود. در اقلیم‌های معتدل علی‌رغم اینکه گندم برای مدت کوتاهی با گرما و خشکی انتهای فصل مواجه شد، ارقام متوسط رس در تاریخ‌های گلدهی دیرهنگام عملکرد بالاتری از خود نشان دادند.

سپاسگزاری

بدین وسیله از پژوهشکده علوم محیطی دانشگاه شهید بهشتی برای حمایت معنوی این پژوهش قدردانی می‌شود.

پی‌نوشت‌ها

- ¹ Terminal drought
- ² Global Yield Gap Atlas
- ³ Growing Degree Days (GDD)
- ⁴ Temperature Seasonality
- ⁵ Annual Aridity Index (AI)
- ⁶ Agricultural Production System sIMulator (APSIM)
- ⁷ Weather Data Manager
- ⁸ Generic Soil profiles by HarvestChoice (HC27)
- ⁹ Initial soil water
- ¹⁰ Conventional tillage

References

- Ababaei, B. and 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. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.107889>
- Andarzian, B., Hoogenboom, G., Bannayan, M., Shirali, M. and Andarzian, B., 2015. Determining optimum sowing date of wheat using CSM-CERES-Wheat model. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*. 14, 189–199. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2014.04.004>
- Deihimfard, R., Rahimi-Moghaddam, S., Eyni-Nargeseh, H. and 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. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2023.126848>

نتایج این تحقیق همچنین نشان داد که در ارقام با درجه رسیدگی دیرتر در مقایسه با ارقام زودرس وقوع تاریخ گلدهی به تأخیر افتاد (شکل ۸). در اقلیم‌های گرم و خشک مثل دزفول و شوشتر رقم متوسط رس به ترتیب با تاریخ گلدهی ۲ آوریل (۱۴ فروردین) و ۱۰ مارس (۲۰ اسفند) بالاتری عملکرد را تولید کردند (به ترتیب ۰/۷۱ و ۱/۲۷ تن در هکتار). در زنجان با اقلیم سرد و خشک بیشترین عملکرد در رقم خیلی زودرس و تاریخ گلدهی در ۴ ژوئن (۱۵ خرداد) اتفاق افتاد (۰/۹۹ تن در هکتار). در اقلیم‌های معتدل مثل خرم‌آباد، نهاوند و الیگودرز ارقام متوسط رس در تاریخ‌های گلدهی دیرهنگام عملکرد بالاتری داشتند (به ترتیب ۱/۱۴، ۱/۳۱ و ۱/۴۹ تن در هکتار در ماه‌های آوریل (فروردین)، و می (اردیبهشت)، شکل ۹).

نتیجه‌گیری

بطور میانگین، با اضافه‌شدن ماژول تنش گرمایی به مدل، عملکرد دانه به طور میانگین ۵۰۰ کیلوگرم در هکتار در مقایسه با شرایط خشکی به تنهایی، کاهش یافت. در مناطق گرم، هنگامی که تاریخ گلدهی خیلی زود رخ داد بدلیل نداشتن فرصت کافی گیاه برای تولید ماده خشک عملکرد کاهش یافت. در نتیجه کاشت زودهنگام و ارقام زودرس در

منابع

- Dreesen, F.E., De Boeck, H.J., Janssens, I.A. and Nijs, I., 2012. Summer heat and drought extremes trigger unexpected changes in productivity of a temperate annual/biannual plant community. *Environmental and Experimental Botany*. 79, 21–30. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2012.01.005>
- Eyni Nargeseh, H., Deihimfard, R., Soufizadeh, S., Haghghat, M. and Nouri, O., 2016. Predicting the effects of climate change on irrigated wheat yield in Fars province using APSIM model. *Electronic Journal of Crop Production*. 8 (4), 203-224. (In Persian with English Abstract).....
- Lamaoui, M., Jemo, M., Datla, R., and Bekkaoui, F., 2018. Heat and drought stresses in crops and approaches for their mitigation. *Frontiers in Chemistry*. 6. <https://doi.org/10.3389/fchem.2018.00026>

- Mccown, R.L., Hammer, G.L., Hargreaves, J.N.G., Holzworth, D., and Huth, N.I., 1995. APSIM: an agricultural production system simulation model for operational research, *Mathematics and Computers in Simulation*. 39 (3-4), 225-231. [https://doi.org/10.1016/0378-4754\(95\)00063-2](https://doi.org/10.1016/0378-4754(95)00063-2)
- Pradhan, G.P., Prasad, P.V.V., Fritz, A.K., Kirkham, M.B., and Gill, B.S., 2012. Effects of drought and high temperature stress on synthetic hexaploid wheat. *Functional Plant Biology*. 39, 190-198. <https://doi.org/10.1071/FP11245>
- Rahimi-Moghaddam, S., Deihimfard, R., Azizi, K., and 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. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126333>
- Sharifi-Haddad, N., Deihimfard, R., Noori, O., and Rahimi Moghaddam, S., 2021. Simulating grain yield and water use efficiency in dominant maize cultivars under water limited and climate change conditions. (In Persian with English Abstract). *Agroecology* 13 (1): 103-115.
- Soltani, A., Alimagham, S.M., Nehbandani, A., Torabi, B., Zeinali, E., Zand, E., Ghassemi, S., Vadez, V., Sinclair, T.R., and van Ittersum, M.K., 2020. Modeling plant production at country level as affected by availability and productivity of land and water. *Agricultural Systems*. 183. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.102859>
- Tefera, A.T., O'Leary, G.J., Rao, S., Shunmugam, A.S.K., Silva-Perez, V., Brand, J., and Rosewarne, G.M., 2024. Identification of agro-phenological traits of lentil that optimise temperature and water limited flowering time and seed yield. *European Journal of Agronomy* 155. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2024.127138>
- Wahid, A., Gelani, S., Ashraf, M., and Foolad, M.R., 2007. Heat tolerance in plants: An overview. *Environmental and Experimental Botany*. 61 (3), 199-223. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2007.05.011>
- Wang, B., Liu, D.L., Asseng, S., Macadam, I., and Yu, Q., 2015. Impact of climate change on wheat flowering time in eastern Australia. *Agricultural and Forest Meteorology*. 209-210, 11-21. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.04.028>
- Wollenweber, B., Porter, J.R., and Schellberg, J., 2003. Lack of interaction between extreme high-temperature events at vegetative and reproductive growth stages in wheat. 189 (3), 142-50. <https://doi.org/10.1046/j.1439-037X.2003.00025.x>



*This page is intentionally
left blank.*