



Forecasting the Yield of Rainfed Wheat Cultivars under Climate Change in Khorramabad Province Using the APSIM Model

Kamran Haghiabi ¹✉ | Mosa MeskarBashi ² | Majid Nabipour ³ | Seyed Amir Mosavi ⁴

1. Corresponding Author, Department of Production Engineering and Plant Genetics, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: k-haghi@irimu.ir
2. Department of Production Engineering and Plant Genetics, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: mmeskarbashee@scu.ac.ir
3. Department of Production Engineering and Plant Genetics, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: m.nabipour@scu.ac.ir
4. Department of Production Engineering and Plant Genetics, Faculty of Agriculture, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Khuzestan, Iran. E-mail: amirmoosavi@asnrukh.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received: January 05, 2025

Revised: October 17, 2025

Accepted: October 17, 2025

Keywords:

Climate prediction, evaluation, parameterization, phenological traits, seed yield.

Extended Abstract

Introduction. The Agricultural Production Systems sIMulator (APSIM) is a mechanistic model developed by a consortium of Australian researchers. It is capable of simulating the soil-plant system of a farm with appropriate detail, modeling the growth and development of more than 20 crop species on a daily time step. APSIM contributes to improve crop management practices, including cultivar selection, optimization of key plant traits such as sowing date and plant density, nitrogen fertilization management, and project the impacts of climate change on crop growth and yield. Therefore, by integrating such models with long-term meteorological data, it is possible to simulate crop behavior under both potential and stress conditions and assess the results accordingly.

Materials and Methods. This experiment aimed to forecast the yield of various rain fed wheat cultivars under climate change in Khorramabad Province using the APSIM-Wheat sub model. To identify the genetic coefficients of cultivars and parameterize the model, management, soil, plant and climate data from field experiments were utilized as model inputs. The experiment was conducted under optimal management conditions and using a randomized complete block design with three treatments and three replications at the research farm of the General Directorate of Meteorology of Lorestan Province (located in Khorramabad City) during the 2021-2022 growing season. Data from ten selected farms were also used to evaluate the model under different climate and management conditions.

Results and Discussion. The normalized root mean square error (nRMSE) was less than 10 percent for seed yield, biological yield, and phenological stages (flowering and maturity) of the cultivars. Thus, the APSIM model demonstrated excellent quality and acceptable accuracy. Other evaluation indicators (CRM, D-index, and R²) also confirmed the robustness of the sub-models. In all studied climate periods and scenarios, the grain yield and biological yield of wheat are projected to decrease by 7.3 to 57.0 percent and 2.6 to 27.9 percent, respectively, compared to the base period. In the 2061-2080 climate periods and the pessimistic scenario (RCP8.5), the yield of the plants significantly decreased due to rising minimum and maximum temperatures compared to the base period and a reduction in the length of the plant growth period.

Conclusion. Under climate change conditions, farmers and agricultural planners can mitigate the negative effects of climate change the regional production and food supply by making appropriate management decisions, including selecting suitable cultivars. Given the genetic coefficients of some rain fed wheat cultivars established in this research, the APSIM-Wheat sub-model model can serve as a low-cost and efficient tool for management planning in crisis situations and for making informed management decisions.

Cite this article: Haghiabi, K., MeskarBashi, M., Nabipour, M., & Mosavi, A. (2026). Forecasting the yield of rainfed wheat cultivars under climate change in Khorramabad province using the APSIM model. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 57(1), 1-11. DOI: [10.22059/ijfcs.2025.388175.655121](https://doi.org/10.22059/ijfcs.2025.388175.655121).





پیش‌بینی عملکرد برخی از ارقام گندم دیم در شرایط تغییر اقلیم در شهرستان خرم‌آباد با استفاده از مدل زراعی اپسیم

کامران حقی‌آبی^۱ | موسی مسکرباشی^۲ | مجید نبی‌پور^۳ | سید امیر موسوی^۴

۱. نویسنده مسئول، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: k-haghi@irimo.ir
۲. گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: mmeskarbashee@scu.ac.ir
۳. گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: m.nabipour@scu.ac.ir
۴. گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، خوزستان، ایران. رایانامه: amirmoosavi@asnruckh.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

آزمایش حاضر با هدف پیش‌بینی تولید برخی از ارقام گندم دیم در شهرستان خرم‌آباد در شرایط تغییر اقلیم با استفاده از زیر مدل اپسیم (APSIM-Wheat) انجام شد. با استفاده از اطلاعات مدیریتی، خاکی، گیاهی و اقلیمی ثبت شده از آزمایش مزرعه‌ای انجام شده به‌عنوان ورودی مدل، ضرایب ژنتیکی ارقام شناسایی و مدل بر مبنای آن پارامتریابی شد. بدین منظور آزمایشی در شرایط بهینه مدیریتی در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تیمار (ارقام قابوس، کوهدشت و آفتاب) و سه تکرار در مزرعه تحقیقاتی اداره کل هواشناسی استان لرستان واقع در شهرستان خرم‌آباد و در سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۰ اجرا شد. جهت ارزیابی مدل در شرایط اقلیمی و مدیریتی مختلف نیز از داده‌های آزمایش‌های مزرعه‌ای که ۱۰ مزرعه منتخب در شهرستان خرم‌آباد بود، استفاده شد. نتایج پارامتریابی و ارزیابی مدل نشان داد که جذر میانگین مربعات نرمال شده (nRMSE)، برای صفات عملکرد دانه، عملکرد زیستی و مراحل فنولوژیک ارقام (تاریخ گلدهی و رسیدگی فیزیولوژیک) کمتر از ۱۰ درصد بود، لذا مدل اپسیم توانست با دقت قابل‌قبولی صفات مذکور را برآورد نماید. سایر شاخص‌های ارزیابی مدل (CRM، D-index و R^2) نیز کارایی زیر مدل مذکور را تأیید کردند. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که به‌طور متوسط در شهرستان خرم‌آباد بسته به نوع سناریو و دوره اقلیمی، عملکرد دانه گندم دیم ۷/۳ تا ۵۷/۰ درصد و عملکرد زیستی ۲/۶ تا ۲۷/۹ درصد کاهش خواهد یافت. در دوره اقلیمی دور (۲۰۸۰-۲۰۶۱) و سناریوی بدبینانه (RCP8.5) با وجود افزایش بارش‌ها، با توجه به افزایش بیشتر دماهای کمینه و بیشینه نسبت به دوره پایه و کاهش طول دوره رشد گیاه، عملکرد گیاهان به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش خواهد یافت. براین اساس، تغییر اقلیم تهدیدی جدی برای تولید گندم دیم در منطقه محسوب می‌شود. با این حال، شناسایی ضرایب ژنتیکی ارقام بومی و استفاده از APSIM-Wheat به‌عنوان ابزاری سریع و کم‌هزینه، می‌تواند راهگشای تصمیم‌های مدیریتی در انتخاب ارقام مناسب و سازگاری با شرایط آینده باشد.

کلیدواژه‌ها:

ارزیابی، پارامتریابی، پیش‌بینی اقلیمی، صفات فنولوژیک، عملکرد دانه.

استناد: حقی‌آبی، ک.، مسکرباشی، م.، نبی‌پور، م.، و موسوی، ا. (۱۴۰۵). پیش‌بینی عملکرد برخی از ارقام گندم دیم در شرایط تغییر اقلیم در شهرستان خرم‌آباد با استفاده از مدل زراعی اپسیم. *علوم گیاهان زراعی ایران*، ۵۷(۱)، ۱-۱۱.
DOI: 10.22059/ijfcs.2025.388175.655121



۱. مقدمه

وقوع پدیده تغییر اقلیم در بیشتر مناطق جهان، به دلیل افزایش دما، تغییر در الگوهای بارندگی و وقوع حوادث شدید آب و هوایی، میزان تولیدات بخش کشاورزی را تحت تأثیر قرار داده است (IPCC, 2016). در سال‌های اخیر زراعت دیم کشور ایران نیز با توجه به کاهش بارندگی و افزایش دما با چالش جدی روبه‌رو شده است (Karandish *et al.*, 2017)، از این‌رو بررسی میزان تغییرات تولید مناطق دیم و اثر تغییرات آب و هوایی بر آن در تهیه برنامه پیشگیری و اقدامات سازگاری برای کشاورزان و سیاست‌گذاران امری ضروری است (Wang *et al.*, 2018).

یک راهبرد مهم برای پیش‌بینی اثرات تغییر اقلیم استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی است که می‌تواند با صرفه‌جویی در زمان و هزینه، برآورد تقریبی از تولید و اثر تغییر اقلیم را ارائه دهد (Hochman *et al.*, 2016; Matin *et al.*, 2014). مدل اپسیم (APSIM)، به عنوان یک شبیه‌ساز مکانیستیک، با استفاده از پارامترهای گیاهی و محیطی از جمله آب و هوا، خاک و مدیریت‌های زراعی می‌تواند رشد و نمو گیاهان مختلف از جمله گندم را شبیه‌سازی کند. همچنین این مدل می‌تواند با کمک به بهبود مدیریت در زمینه‌های مختلف از جمله انتخاب رقم مناسب، تعیین خصوصیات مطلوب گیاهی، مدیریت کود نیتروژن، پیش‌بینی اثر تغییر اقلیم بر رشد و عملکرد محصول، موجبات افزایش عملکرد واقعی گیاهان زراعی در اقلیم فعلی و تغییر یافته را فراهم نماید (Holzworth *et al.*, 2014)؛ بنابراین با استفاده از مدل‌ها و با کمک آمار هواشناسی بلندمدت می‌توان ضمن شبیه‌سازی و ارزیابی رفتار گیاه در شرایط تنش (Rezaei *et al.*, 2015)، عوامل خلأ بین عملکرد واقعی و عملکرد پتانسیل را شناسایی و کاهش داد. به‌رغم پیشرفت‌های قابل ملاحظه در مکانیزاسیون تولید و اصلاح ارقام پرمحصول، شرایط اقلیمی از جمله مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده عملکرد محصولات زراعی می‌باشد (Innes *et al.*, 2015). مطالعه اثرات تغییر اقلیم بر تولید محصولات زراعی معمولاً به‌وسیله مدل‌های گردش عمومی (GCMs) ^۱ و براساس سناریوهای مختلف انجام می‌گیرد و تلفیق این نتایج با مدل‌های شبیه‌سازی رشد امکان پیش‌بینی عملکرد گیاهان زراعی را در شرایط اقلیمی آینده فراهم می‌سازد (Devkota *et al.*, 2015). بر این اساس، می‌توان محدودیت‌های محیطی، ژنتیکی و مدیریتی در تولید گیاهان زراعی در هر نقطه‌ای را با کمک مدل‌های شبیه‌سازی گیاهان زراعی تجزیه و تحلیل کرد و با استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی می‌توان اثرات اقلیم بر کشاورزی را از طریق استراتژی‌های مختلف کاشت کاهش داد (Frank *et al.*, 2015).

افزایش دما و تنش گرمایی در طول دوره رشد گیاهان زراعی طی پدیده تغییر اقلیم باعث کاهش عملکرد گیاهان زراعی می‌شود (Innes *et al.*, 2015). مدل‌های APSIM-Wheat و CERES-Wheat در شرایط دیم برای پنج رقم گندم پاییزه در پاکستان کالیبره و ارزیابی شده‌اند (Ahmed *et al.*, 2016). هر دوی این مدل‌ها توانستند تاریخ‌های فنولوژیک، شاخص سطح برگ، عملکرد دانه و ماده خشک کل را با دقت قابل قبولی ($RMSE < 10$)، پیش‌بینی کنند و مقادیر اندازه‌گیری شده این شاخص‌ها در آزمایش مزرعه‌ای با مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل تطابق داشت ($D-index = 0.8$). نتایج این محققان نشان داد که اگرچه با افزایش غلظت گاز دی‌اکسید کربن عملکرد گندم افزایش یافت، ولی با افزایش هم‌زمان دی‌اکسید کربن و دما از صفر تا پنج درجه سانتی‌گراد عملکرد آن بسته به شرایط محیطی می‌تواند تا ۶۰ درصد کاهش یابد.

با توجه به اهمیت گیاه گندم ^۲ به‌عنوان محصول استراتژیک و نقش مهم آن در تأمین امنیت غذایی مردم ایران، تحقیق حاضر با هدف برآورد میزان تولید گندم دیم در شرایط تغییر اقلیم در شهرستان خرم‌آباد با استفاده از زیرمدل APSIM-Wheat انجام و میزان تغییرات تولید ارقام مورد مطالعه تحت سناریوها و دوره‌های اقلیمی مختلف با استفاده از زیرمدل مذکور پیش‌بینی شد.

۲. روش‌شناسی پژوهش

جهت پیش‌بینی تولید برخی از ارقام گندم دیم در شرایط تغییر اقلیم در شهرستان خرم‌آباد از نسخه ۷/۱ زیر مدل APSIM-Wheat استفاده شد. ورودی‌های این مدل شامل داده‌های اقلیمی، خاکی، گیاهی و اطلاعات مدیریتی می‌باشد. به‌منظور پارامتربازی و تعیین

1. General Circulation Model

2. *Triticum aestivum* (L.)

ضرایب ژنتیکی مدل در شرایط بهینه مدیریتی از داده‌های آزمایش مزرعه‌ای سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۰ و جهت ارزیابی مدل در شرایط مختلف اقلیمی و مدیریتی از داده‌های آزمایش‌های مزرعه‌ای (۱۰ مزرعه منتخب) استفاده شد.

۱-۲. پارامتریابی مدل

جهت شبیه‌سازی عملکرد دانه و عملکرد زیستی گندم، ابتدا زیر مدل APSIM-Wheat برای ارقام مورد مطالعه کالیبره شد. برای انجام عمل کالیبراسیون نیاز به داده‌های هواشناسی، مدیریت رایج در منطقه و پارامتر یا ضرایب ژنتیکی ارقام بود که بر پایه داده‌های جمع‌آوری شده از آزمایش مزرعه‌ای این امر صورت پذیرفت. پارامترهای ژنتیکی مربوط به ژنتیک گیاه بوده و محیط روی آن‌ها تأثیری نداشته و تغییر آن‌ها در دامنه خاص خود می‌باشد. این ضرایب به‌طور کلی بیان می‌کنند که چگونه یک رقم خاص به فاکتورهای محیطی پاسخ می‌دهند. مقادیر این پارامترها قبل از استفاده از مدل، از طریق آزمایش مزرعه‌ای اندازه‌گیری شد. رشد و نمو گیاه زراعی در مدل APSIM-Wheat به‌وسیله‌ی ضرایب مختلفی از جمله: *Startgf_to mat*, *Photop_sens*, *Vern_sens*, *Potential_grain_filling_rate*, *Grains_per_gram_stem* و *Phylochron* کنترل می‌شوند (Ahmed *et al.*, 2016). در پژوهش حاضر مدل براساس اطلاعات جمع‌آوری شده از آزمایش مزرعه‌ای سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۰ و در شرایط بدون تنش، پارامتریابی شد. بدین منظور با استفاده از روش آزمون و خطا که یک روش مرسوم برای تعیین ضرایب ژنتیکی محسوب می‌شود، عملکرد دانه، عملکرد زیستی و مراحل فنولوژیک گلدهی و رسیدگی فیزیولوژیک ارقام گندم برآورد شد (Chen *et al.*, 2010).

جهت ثبت اطلاعات عملکردی گندم در شرایط بدون تنش، آزمایشی در قالب بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در مزرعه تحقیقاتی اداره کل هواشناسی استان لرستان واقع در شهرستان خرم‌آباد اجرا شد. شهرستان خرم‌آباد در طول جغرافیایی ۴۸ درجه و ۲۱ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۳ درجه و ۲۹ دقیقه شمالی واقع شده است. ارتفاع آن ۱۲۵۰ متر از سطح دریا می‌باشد. تیمارهای آزمایش، سه رقم گندم (کوه‌دشت، آفتاب و قابوس) شهرستان خرم‌آباد بودند. ارقام بر اساس غالبیت و سطح زیر کشت قابل توجه آن‌ها در منطقه مورد مطالعه انتخاب شدند که میانگین میزان تولید ارقام مربوطه در منطقه نشان‌دهنده تولید منطقه است. براساس گزارش مؤسسه تحقیقات کشاورزی دیم کشور، ارقام قابوس و آفتاب جزء ارقام جدید و زودرس گندم برای مناطق گرمسیری و نیمه‌گرمسیری محسوب می‌شوند. لازم به ذکر است که هدف از آزمایش مزرعه‌ای ثبت ویژگی‌های عملکردی و فنولوژیک ارقام غالب گندم دیم در منطقه مورد هدف بود. از این رو مدل اپسیم براساس اطلاعات سه رقم گندم بومی‌سازی شده و میانگین عملکرد ارقام مذکور به‌عنوان عملکرد گندم دیم منطقه مدنظر قرار گرفت.

عملیات آماده‌سازی زمین در نیمه دوم شهریورماه صورت گرفت. بدین منظور پس از عملیات دیسک‌زنی جهت تسطیح خاک با استفاده از فارور جوی و پشته احداث شد. هر واحد آزمایشی دارای شش خط کاشت به طول شش متر با فاصله ۲۲ سانتی‌متر بود که با اعمال فاصله‌ی حدود ۱/۵ سانتی‌متر روی ردیف، تراکم ۳۰۰ بوته در متر مربع در نظر گرفته شد. قبل از کاشت حدود ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار کود اوره، ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار نیز کود فسفات آمونیوم و ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار سوپرفسفات تریپل مصرف شد. در طول فصل رشد نیز متناسب با نیاز کودی، ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار کود اوره در مرحله اوایل ساقه‌دهی به‌صورت سرک مصرف شد. عملیات کاشت بذور در ۱۵ آبان‌ماه (تاریخ کاشت بهینه) با استفاده از دستگاه کارنده انجام شد. علف‌های هرز مزرعه نیز به‌صورت دستی وجین شد و مزارع مورد مطالعه عاری از هرگونه آفات و بیماری بودند؛ لذا هیچ کنترلی انجام نشد. در طول فصل رشد تاریخ‌های فنولوژیک گلدهی و رسیدگی فیزیولوژیک ارقام ثبت و در انتهای فصل رشد نیز از دو ردیف وسط به اندازه یک متر برای تعیین عملکرد استفاده شد. معیار رسیدن بوته‌ها به مرحله‌ی بلوغ فیزیولوژیک و برداشت نهایی، سخت و سفت شدن بیش از ۵۰ درصد بذور و طلایی‌رنگ شدن بوته‌های مورد نظر بود. بدین منظور بوته‌های مورد نظر به مدت ۴۸ ساعت در آون با دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد قرار گرفته و درنهایت با ترازوهای دیجیتالی عملکرد دانه و عملکرد زیستی ارقام توزین شد.

۲-۲. ارزیابی مدل

بدین منظور جهت جمع‌آوری داده‌های خاکی، گیاهی و مدیریتی در شرایط واقعی (مدیریت مزرعه توسط کشاورزان)، اطلاعات تعداد ۱۰ مزرعه گندم در شهرستان خرم‌آباد، انتخاب و اقدام به تکمیل پرسش‌نامه شد. از طریق پرسش‌نامه اطلاعات تاریخچه

مزرعه، عملیات کاشت، داشت، برداشت و چگونگی مدیریت مزرعه ثبت شد. همچنین به‌منظور بررسی وضعیت رشد ارقام در مزارع انتخاب‌شده، اطلاعات خاکی و گیاهی نیز ثبت شد.

اطلاعات مدیریتی: شامل تاریخ کاشت، تراکم کاشت، فاصله بین ردیف، زمان و مقدار کوددهی، رقم و زمان برداشت بود که این اطلاعات طی اجرای طرح.

اطلاعات خاکی: شامل بافت خاک (درصد رس، سیلت و شن)، جرم مخصوص ظاهری، ضریب نگهداری آب در خاک، اسیدیته، ظرفیت تبادل کاتیونی، میزان ماده آلی، قابلیت هدایت الکتریکی و غلظت‌های نیتروژن معدنی، فسفر و پتاسیم.

اطلاعات گیاهی: شامل مراحل اصلی فنولوژیک گیاه (تاریخ‌های سبز شدن، گلدهی و برداشت نهایی) و عملکردی (دانه و زیستی).

اطلاعات اقلیمی: جهت پیش‌بینی اقلیمی، آمار بلندمدت داده‌های هواشناسی (از سال ۱۹۸۷ تا ۲۰۲۳) شهرستان خرم‌آباد شامل درجه حرارت حداقل و حداکثر (درجه سانتی‌گراد)، میزان بارندگی روزانه (میلی‌متر) و شدت تشعشع روزانه خورشیدی (مگاژول در متر مربع در روز)، از بانک داده‌های سازمان هواشناسی کشور تهیه شد. از آنجایی که شدت تشعشع روزانه در بسیاری از ایستگاه‌های هواشناسی کشور ثبت نمی‌شود، لذا برای دستیابی به مقادیر این متغیر با در اختیار داشتن طول ساعات آفتابی شبیه‌سازی آن با استفاده از رابطه آنگستروم (رابطه ۱) انجام شد.

$$Rs = [a + b(n/N)] \times Ra \quad \text{رابطه ۱}$$

در رابطه بالا، RS نشان‌دهنده تشعشع، n ساعات آفتابی، N طول روز و Ra تابش فرازمینی می‌باشد. پارامترهای a و b ضرایب آنگستروم کالیبره‌شده محلی هستند (Almorox et al., 2005). همچنین به‌دلیل این که در بعضی از ایستگاه‌ها داده‌ها به‌طور کامل ثبت نمی‌شود و یا داده‌های پرت و گمشده وجود دارد با استفاده از میان‌گیری به‌صورت دستی بازسازی و اصلاح این داده‌ها انجام شد. در این تحقیق از دوره ۳۵ ساله به‌عنوان دوره پایه به‌منظور شبیه‌سازی رشد و عملکرد گیاه زراعی گندم دیم در نرم‌افزار LARS GW استفاده شد. در نهایت در ایستگاه مذکور با استفاده از مدل و سناریوهای HADCM3-RCP4.5، HADCM3-RCP2.6 و HADCM3-RCP8.5 و داده‌های دوره پایه، شبیه‌سازی برای دوره‌های زمانی آینده، با استفاده از مدل اقلیمی LARS-WG انجام شد. برای ارزیابی کارکرد مدل، نتایج شبیه‌سازی شده با داده‌های مشاهده‌شده با استفاده از داده‌های آزمایش‌های میدانی (۱۰ مزرعه منتخب) صحت‌سنجی شد. بدین منظور مدل اجرا، و مراحل رشد، نمو و عملکرد ارقام گندم مورد مطالعه شبیه‌سازی شد، سپس نتایج شبیه‌سازی شده با داده‌های مشاهده‌شده مقایسه و اعتبار مدل با آزمون‌های آماری و رگرسیونی ارزیابی شد. در این آزمایش عملکرد دانه و عملکرد زیستی، تاریخ‌های فنولوژیک گلدهی و رسیدگی فیزیولوژیک به‌عنوان صفات مورد هدف برای ارزیابی مدل اِپسیم در نظر گرفته شدند. همچنین از شاخص‌های ضریب تبیین R^2 ، جذر خطای میانگین مربعات نرمال شده $nRMSE$ (رابطه ۲)، (Bannayan et al., 2009)، ضریب جرمی خطا CRM (رابطه ۳)، (Loague & Green, 1991)، و ضریب همخوانی D -index (رابطه ۴)، (Willmott, 1982)، به‌منظور تجزیه آماری نتایج حاصل از شبیه‌سازی استفاده شد.

$$nRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_i - M_i)^2}{n}} \times \frac{100}{M} \quad \text{رابطه ۲}$$

E_i و M_i مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده‌شده، n تعداد مشاهدات و M میانگین داده‌های مشاهده‌شده می‌باشند. $nRMSE$ درصد تفاوت نسبی بین مقادیر مشاهده‌شده و شبیه‌سازی شده نسبت به میانگین داده‌های مشاهده‌شده را نشان می‌دهد.

$$CRM = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n E_i}{\sum_{i=1}^n M_i} \quad \text{رابطه ۳}$$

CRM ، شاخصی است که نشان می‌دهد آیا مقادیر شبیه‌سازی شده توسط مدل بیشتر و یا کمتر از مقادیر مشاهده‌شده است. منفی بودن این شاخص به معنای بیشتر بودن و مثبت بودن آن به معنای کمتر بودن مقادیر شبیه‌سازی شده از مقادیر مشاهده‌شده است.

3. Coefficient of Determination

4. Normalized Root Mean Square Error

5. Coefficient of Residual Mass

6. Agreement Index

$$D - index = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - M_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|E_i - \bar{M}| + |M_i - \bar{M}|)^2} \quad \text{رابطه ۴}$$

چنانچه مدل، شبیه‌سازی را به‌طور کامل انجام دهد، یعنی مقادیر شبیه‌سازی شده برابر با مقادیر مشاهده‌شده باشد، مقدار شاخص $D-index$ برابر با یک و اگر مقادیر شبیه‌سازی شده برای تمامی داده‌ها برابر با میانگین داده‌های مشاهده‌شده باشد، مقدار این شاخص برابر با صفر خواهد بود.

در نهایت عملکرد دانه و عملکرد زیستی ارقام مورد مطالعه گندم دیم، در دوره‌های اقلیمی (۲۰۴۰-۲۰۲۴، ۲۰۶۰-۲۰۴۱ و ۲۰۸۰-۲۰۶۱) و سناریوهای اقلیمی خوش‌بینانه (RCP2.6)، متوسط (RCP4.5) و بدبینانه (RCP8.5) پیش‌بینی شد. بدین منظور از داده‌های خروجی مدل LARS-WG، به‌عنوان ورودی اقلیمی مدل APSIM استفاده شد. با استفاده از ضرایب ژنتیکی شناسایی‌شده نیز در شرایط قابل دسترس میزان تغییرات عملکردی گیاهان مذکور نسبت به دوره پایه ارزیابی شد.

۳. یافته‌های پژوهش و بحث

۳-۱. پارامتریابی و ارزیابی مدل اپسیم برای شبیه‌سازی عملکرد و مراحل فنولوژیک گندم دیم

نتایج نشان داد که در شهرستان خرم‌آباد برای گیاه گندم دیم، مقدار شاخص ضریب جرمی خطا (CRM) برای شبیه‌سازی عملکرد دانه و عملکرد زیستی مثبت و تاریخ‌های فنولوژیک منفی بود (جدول ۱). علامت‌های مثبت و منفی ضریب جرمی خطا نشان‌دهنده آن است که مدل اپسیم به‌ترتیب برآورد کمتر و بیشتری نسبت به مقادیر مشاهده‌شده داشت؛ بنابراین نتایج نشان داد که مدل اپسیم عملکرد ارقام مورد مطالعه را به‌طور جزئی کمتر و تاریخ‌های فنولوژیک گلدهی و رسیدگی فیزیولوژیک را بیشتر از مقدار مشاهده‌شده برآورد کرد. مقدار عددی شاخص ضریب هم‌خوانی (D-index) برای عملکرد دانه ارقام گندم دیم ۰/۶۲ و عملکرد زیستی ۰/۳۸ بود که نشان‌دهنده تطابق بین داده‌های شبیه‌سازی و مشاهده‌شده می‌باشد. مقدار عددی شاخص ضریب هم‌خوانی برای تاریخ گلدهی ۰/۷۷ و رسیدگی فیزیولوژیک ۰/۴۴ بود. محققان گزارش کردند که چنانچه مدل، شبیه‌سازی را به‌طور کامل انجام دهد، یعنی مقادیر شبیه‌سازی شده برابر با مقادیر مشاهده‌شده باشد، مقدار شاخص $D-index$ برابر با یک و اگر مقادیر شبیه‌سازی شده برای تمامی داده‌ها برابر با میانگین داده‌های مشاهده‌شده باشد، مقدار این شاخص برابر با صفر خواهد بود (Zhao et al., 2020). در خصوص تاریخ گلدهی اختلاف بین داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهده‌شده کم بوده، ولی در خصوص رسیدگی فیزیولوژیک مقادیر شبیه‌سازی شده با میانگین داده‌های مشاهده‌شده ارقام گندم اختلاف کمتری داشتند، لذا شاخص تطابق به سمت صفر میل نموده است.

جدول ۱. پارامتریابی مدل اپسیم برای شبیه‌سازی عملکرد و صفات فنولوژیک گندم دیم.

مراحل فنولوژیک (روز پس از کاشت)		عملکرد (کیلوگرم در هکتار)		شاخص
رسیدگی فیزیولوژیک	گلدهی	عملکرد زیستی	عملکرد دانه	
مشاهده پیش‌بینی	مشاهده پیش‌بینی	مشاهده پیش‌بینی	مشاهده پیش‌بینی	
۱۸۳	۱۸۰	۹۲۵۲	۹۵۷۱	Mean
۶/۶۱	۴/۵۸	۳/۹۱	۴/۴۳	nRMSE (%)
-۰/۰۱۷	-۰/۰۰۵	+۰/۰۳	+۰/۱۱	CRM
۰/۴۴	۰/۷۷	۰/۳۸	۰/۶۲	D-index
۰/۷۸	۰/۸۲	۰/۸۴	۰/۹۵	R ²

Mean: میانگین ارقام، nRMSE: جذر میانگین مربعات نرمال‌شده، CRM: ضریب جرمی خطا که علامت مثبت و منفی به‌ترتیب نشان‌دهنده برآورد کمتر و بیشتر مدل نسبت به مقادیر مشاهده‌شده است، D-index: شاخص ضریب هم‌خوانی و R²: ضریب تبیین.

بنابراین به‌طور کلی در گندم دیم، بین مقادیر شبیه‌سازی شده عملکرد با مقدار مشاهده‌شده اختلاف چندانی وجود نداشت که مقدار ضریب R² نیز گویای این امر است. مقدار جذر میانگین مربعات نرمال‌شده (nRMSE) برای صفات عملکرد دانه و عملکرد زیستی و تاریخ گلدهی کمتر از پنج درصد و برای رسیدگی فیزیولوژیک کمتر از ۱۰ درصد بود، لذا مدل توانست صفات مورد مطالعه

را با کیفیت پیش‌بینی کند. محققان مختلفی نیز کارایی مدل اپسیم را در پیش‌بینی عملکرد گیاهان گندم و جو قابل قبول برآورد کردند (Zhao et al., 2020; Gaydon et al., 2017; Zheng et al., 2014).

۳-۲. ارزیابی مدل اپسیم برای شبیه‌سازی عملکرد دانه و عملکرد زیستی

در مزارع مورد مطالعه شهرستان خرم‌آباد، برخلاف نتایج پارامتریابی مدل، در صفات عملکرد دانه، عملکرد زیستی و تاریخ گلدهی ضریب جرمی خطا (CRM) منفی بود (جدول ۲). این نشان‌دهنده آن است که مدل به‌طور جزئی صفات مذکور را در شرایط واقعی بیشتر از حد واقعی برآورد نموده است. در شرایط واقعی مقدار ضریب هم‌خوانی (D-index) داده‌های مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده بیشتر از ۰/۷۰ بود و همچنین مقدار جذر میانگین نرمال‌شده (nRMSE) مدل اپسیم برای عملکرد دانه گندم در بازه ۱۰ تا ۱۵ درصد و برای عملکرد زیستی و صفات فنولوژیک کمتر از ۱۰ درصد بود؛ لذا مدل توانست در شرایط واقعی عملکرد دانه گندم را با کیفیت قابل قبول (خوب) و سایر صفات را با دقت مناسب شبیه‌سازی نماید.

با توجه به دست‌یابی به ضرایب ژنتیکی برخی از ارقام گندم دیم که سطح زیر کشت قابل توجهی در ایران دارند، می‌توان با استفاده از زیرمدل اپسیم (APSIM-Wheat)، عملکرد دانه و عملکرد زیستی گندم را در شرایط بدون تنش و واقعی (سطوح مختلف رژیم‌های رطوبتی، کودی، تاریخ کاشت‌های مختلف و ...)، بدون اجرای آزمایش‌های زمان‌بر و پرهزینه برآورد نمود. بنابراین به‌کارگیری مدل اپسیم در دست‌یابی به تولید پایدار و صرفه‌جویی اقتصادی نهاده‌های کشاورزی در منطقه می‌تواند کارگشا باشد و دورنمایی از شرایط تولید گندم را در اختیار کشاورزان، مدیران و برنامه‌ریزان قرار دهد. از سویی دیگر، با توجه به این‌که در شهرستان خرم‌آباد معیشت کشاورزان وابستگی زیادی به تولید غلاتی هم‌چون گندم دارد، لذا کاهش عمده عملکرد می‌تواند تولید را غیر اقتصادی نموده و موجب افزایش نیاز به واردات این محصولات شود. استفاده از مدل‌های گیاهان زراعی هم‌چون اپسیم در برنامه‌ریزی‌های مدیریتی در شرایط بحران نقش داشته و می‌تواند جهت کاهش اثرات نامطلوب تغییرات اقلیمی از مدل‌ها برای اتخاذ تصمیم‌های مدیریتی مانند انتخاب تاریخ کاشت مناسب، انتخاب ارقام مقاوم به تنش‌های محیطی و برنامه‌ریزی آبیاری بهینه مورد استفاده قرار گیرد.

محققان طی بررسی کارایی شش مدل گیاهی (CropSyst، CAT-Wheat، APSIM-Nwheat، APSIM-Wheat، SALUS و OLEARY-CONNOR) برای پیش‌بینی عملکرد گندم در شرایط تغییر اقلیم گزارش کردند که همه مدل‌ها قادر به پیش‌بینی با دقت مناسب بودند (Oleary et al., 2015). برخی دیگر از محققان طی بررسی قابلیت چهار مدل CropSyst، SSM، APSIM و DSSAT گزارش کردند که مدل‌های ساده (CropSyst و SSM) در پیش‌بینی عملکرد گندم قوی‌تر از مدل‌های پیچیده (APSIM و DSSAT) بودند (Soltani & Sinclair, 2015). گایدون و همکاران (Gaydon et al., 2017) طی ارزیابی مدل اپسیم در پیش‌بینی سیستم‌های زراعی آسیا گزارش کردند که این مدل در آینده می‌تواند یکی از بهترین ابزارهای مدیریتی محسوب شود و می‌تواند در ارزیابی اثر عوامل اقلیمی (تغییرات دما، بارش و غلظت دی‌اکسید کربن) و مدیریتی (استفاده از عناصر و کودهای مختلف و آب) بر تولیدات محصولات زراعی نقش بسزایی ایفا کند. ژائو و همکاران (Zhao et al., 2014)، طی بررسی حساسیت و تأثیر عوامل ژنتیکی (رقم)، محیطی و مدیریتی بر عدم قطعیت آنالیزهای مدل APSIM-Wheat، در استرالیا گزارش کردند که ارقام مختلف یک گیاه ممکن است در شرایط مختلف آب و هوایی و رشدی پاسخ‌های متفاوتی نشان دهند و در بین شاخص‌های مورد مطالعه، عملکرد دانه و مراحل فنولوژیک گندم نسبت به ضرایب ژنتیکی بسیار حساس بودند، لذا برای کاهش خطا و عدم قطعیت مدل که ناشی از ضرایب ژنتیکی رقم است، بایستی مدل برای ارقام جدید و شرایط آب و هوایی مختلف کالیبره شود.

۳-۳. شبیه‌سازی عملکرد ارقام گندم دیم در شرایط تغییر اقلیم

نتایج متغیرهای اقلیمی طی دوره‌ها و سناریوهای اقلیمی مختلف نشان داد که با افزایش غلظت دی‌اکسید کربن از ۱۸ تا ۸۹ درصد در سناریوها (RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5)، و دوره‌های اقلیمی آینده (۲۰۲۴-۲۰۴۰، ۲۰۴۱-۲۰۶۰ و ۲۰۶۱-۲۰۸۰)، دماهای کمینه و بیشینه، میزان بارش سالانه و تشعشع افزایش و تعداد روزهای یخبندان منطقه کاهش خواهد یافت (جدول ۳). در این راستا در این بخش از پژوهش، تأثیر توأم عوامل اقلیمی مذکور تحت سناریوهای اقلیمی خوش‌بینانه (RCP2.6)، متوسط (RCP4.5) و بدبینانه (RCP8.5) در دوره‌های اقلیمی پایه (۱۹۸۷-۲۰۲۳)، آینده نزدیک (۲۰۲۴-۲۰۴۰)، آینده متوسط (۲۰۴۱-۲۰۶۰) و آینده

دور (۲۰۸۰-۲۰۶۱) بر عملکرد دانه و عملکرد زیستی برخی از ارقام گندم دیم بررسی شد. لازم به ذکر است که سایر فاکتورهای آزمایش از جمله بخش مدیریتی و خاکی در این بخش به صورت بهینه در نظر گرفته شده است. در شرایط بهینه مدیریتی متوسط عملکرد دانه و عملکرد زیستی گندم دیم در شهرستان خرم‌آباد در دوره پایه (۲۰۲۳-۱۹۸۷)، به ترتیب ۳۷۳۸ و ۹۵۷۱ کیلوگرم در هکتار بود (جدول ۴). در تمام دوره‌ها و سناریوهای اقلیمی مورد مطالعه، عملکردهای زیستی و دانه گندم دیم نسبت به دوره پایه کاهش خواهد یافت (جدول ۴).

جدول ۲. ارزیابی مدل اسیم برای شبیه‌سازی عملکرد دانه و عملکرد زیستی گندم دیم در شرایط واقعی.

مراحل فنولوژیک (روز پس از کاشت)		عملکرد (کیلوگرم در هکتار)						
رسیدگی فیزیولوژیک		گلدگی		عملکرد زیستی		عملکرد دانه		شاخص
مشاهده	پیش‌بینی	مشاهده	پیش‌بینی	مشاهده	پیش‌بینی	مشاهده	پیش‌بینی	
۱۸۲	۱۸۴	۱۲۴	۱۲۱	۸۲۰۷/۶۵	۸۰۹۴/۴۴	۳۴۵۸/۵۲	۲۰۸۲/۴۵	Mean
۳/۱۹		۵/۷۶		۸/۹۱		۱۲/۳۴		nRMSE (%)
+۰/۰۰۴		-۰/۰۱۱		-۰/۰۰۷		-۰/۰۰۶		CRM
۰/۷۸		۰/۷۹		۰/۹۷		۰/۸۹		D-index
۰/۷۵		۰/۷۵		۰/۹۳		۰/۸۵		R ²

Mean: میانگین عملکرد ارقام، nRMSE: جذر میانگین مربعات نرمال شده، CRM: ضریب جرمی خطا که علامت مثبت و منفی به ترتیب نشان‌دهنده برآورد کمتر و بیشتر مدل نسبت به مقادیر مشاهده شده است، D-index: شاخص ضریب هم‌خوانی و R²: ضریب تبیین.

جدول ۳. پیش‌بینی درصد تغییرات متغیرهای اقلیمی در دوره و سناریوهای اقلیمی مختلف در شهرستان خرم‌آباد.

دوره اقلیمی	سناریوی اقلیمی (RCP)	دمای کمینه	دمای بیشینه	بارش	تعداد روزهای یخبندان	غطت دی‌اکسید کربن
	۲/۶	+۱۴/۹	+۶/۰	+۱۳/۰	-۳۹/۱	+۱۸/۲
۲۰۴۰-۲۰۲۴	۴/۵	+۱۱/۴	+۳/۸	+۱۴/۲	-۳۴/۹	+۱۹/۶
	۸/۵	+۱۲/۶	+۴/۲	+۱۳/۸	-۳۴/۲	+۲۳/۴
	۲/۶	+۱۸/۱	+۸/۹	+۲/۷	-۴۴/۷	+۲۱/۵
۲۰۶۰-۲۰۴۱	۴/۵	+۱۸/۳	+۶/۱	+۱۷/۴	-۴۶/۳	+۳۳/۹
	۸/۵	+۲۵/۱	+۸/۵	+۲۳/۱	-۵۰/۸	+۴۸/۷
	۲/۶	+۱۸/۰	+۷/۹	+۱۲/۶	-۴۴/۵	+۲۰/۱
۲۰۸۰-۲۰۶۱	۴/۵	+۲۳/۹	+۸/۱	+۱۹/۴	-۵۳/۲	+۴۴/۰
	۸/۵	+۴۱/۴	+۱۳/۹	+۲۰/۷	-۷۶/۲	+۸۹/۱

* علامت‌های منفی (-) و مثبت (+) به ترتیب نشان‌دهنده کاهش و افزایش متغیرهای اقلیمی مورد مطالعه در دوره‌های آینده نسبت به دوره پایه می‌باشد.

جدول ۴. میزان و درصد تغییرات عملکرد دانه و عملکرد زیستی ارقام گندم دیم در شهرستان خرم‌آباد در دوره‌ها و سناریوی اقلیمی مختلف.

عملکرد زیستی (کیلوگرم در هکتار)				عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار)				سناریوی اقلیمی (RCP)	دوره اقلیمی				
درصد تغییرات نسبت به دوره پایه				درصد تغییرات نسبت به دوره پایه									
میانگین	قابوس	آفتاب	کوهدشت	میانگین	قابوس	آفتاب	کوهدشت	میانگین	قابوس	آفتاب	کوهدشت		
-	-	-	-	۹۵۷۱	۹۶۸۸	۹۵۴۴	۹۴۸۱	۳۷۳۹	۴۰۷۹	۳۶۴۷	۳۴۹۲	۲۰۲۳-۱۹۸۷	پایه
-۲/۶	-۰/۴	+۱/۸	-۱۰/۰	۹۳۳۰	۹۶۵۳	۹۷۱۵	۸۶۲۱	۳۴۸۳	۴۰۰۲	۳۲۵۹	۳۱۸۷	۲۰۴۰-۲۰۲۴	
-۶/۶	-۲/۳	-۲/۰	-۱۷/۱	۸۹۷۵	۹۴۷۱	۹۳۵۶	۸۰۹۷	۳۴۸۵	۳۸۹۱	۳۶۹۰	۲۸۷۴	۲۰۶۰-۲۰۴۱	۲/۶
-۱۰/۴	-۸/۶	-۷/۳	-۱۵/۷	۸۶۷۲	۸۹۲۱	۸۸۹۷	۸۱۹۷	۳۲۴۰	۳۶۷۷	۳۱۲۱	۲۹۲۱	۲۰۸۰-۲۰۶۱	
-۶/۴	-۳/۶	-۲/۴	-۱۴/۲	۸۹۹۲	۹۳۴۸	۹۳۲۳	۸۳۰۵	۳۴۰۳	۳۸۵۷	۳۳۵۷	۲۹۹۴		۲/۶
-۸/۹	-۶/۵	-۷/۳	-۱۳/۰	۸۷۹۳	۹۰۹۶	۸۸۹۱	۸۳۹۱	۳۱۷۴	۳۶۵۱	۲۸۵۹	۳۰۱۱	۲۰۴۰-۲۰۲۴	
-۱۴/۵	-۱۱/۸	-۱۲/۳	-۱۹/۸	۸۳۶۰	۸۶۶۷	۸۴۹۸	۷۹۱۴	۲۹۰۷	۳۳۶۹	۲۶۶۱	۲۶۹۱	۲۰۶۰-۲۰۴۱	۴/۵
-۱۹/۰	-۱۹/۷	-۱۸/۶	-۱۸/۸	۸۰۴۰	۸۰۹۱	۸۰۴۹	۷۹۸۱	۲۷۸۴	۲۹۲۸	۲۵۲۴	۲۹۰۰	۲۰۸۰-۲۰۶۱	
-۱۴/۰	-۱۲/۴	-۱۲/۶	-۱۷/۱	۸۳۹۷	۸۶۱۸	۸۴۷۹	۸۰۹۵	۲۹۵۵	۳۳۱۶	۲۶۸۱	۲۸۶۷		۴/۵
-۱۹/۶	-۱۳/۰	-۱۹/۱	-۲۷/۹	۸۰۰۰	۸۵۷۲	۸۰۱۲	۷۴۱۵	۲۷۳۸	۲۹۲۲	۲۴۱۳	۲۸۷۹	۲۰۴۰-۲۰۲۴	
-۲۴/۹	-۱۸/۶	-۲۳/۸	-۳۳/۲	۷۶۶۵	۸۱۷۰	۷۷۱۰	۷۱۱۶	۲۵۳۶	۲۷۴۱	۲۳۶۵	۲۵۰۱	۲۰۶۰-۲۰۴۱	۸/۵
-۲۷/۹	-۲۴/۰	-۲۴/۶	-۳۵/۹	۷۴۸۲	۷۸۱۱	۷۶۶۲	۶۹۷۴	۲۳۸۲	۲۴۸۴	۲۲۰۸	۲۴۵۴	۲۰۸۰-۲۰۶۱	
-۲۴/۰	-۱۸/۴	-۲۲/۴	-۳۲/۳	۷۷۱۶	۸۱۸۴	۷۷۹۵	۷۱۶۸	۲۵۵۲	۲۷۱۶	۲۳۲۹	۲۶۱۱		۸/۵
-۹/۹	-۶/۴	-۷/۶	-۱۶/۴	۸۷۰۷	۹۱۰۷	۸۸۷۳	۸۱۴۲	۳۱۳۲	۳۵۲۵	۲۸۴۴	۳۰۲۶	۲۰۴۰-۲۰۲۴	
-۱۴/۹	-۱۰/۵	-۱۲/۰	-۲۳/۰	۸۳۳۳	۸۷۶۹	۸۵۲۱	۷۷۰۹	۲۹۷۶	۳۳۳۴	۲۹۰۵	۲۶۸۹	۲۰۶۰-۲۰۴۱	
-۱۸/۷	-۱۷/۱	-۱۶/۳	-۲۲/۹	۸۰۶۵	۸۲۷۴	۸۲۰۳	۷۷۱۷	۲۸۰۲	۳۰۳۰	۲۶۱۸	۲۷۵۸	۲۰۸۰-۲۰۶۱	

* علامت‌های منفی (-) و مثبت (+) به ترتیب نشان‌دهنده کاهش و افزایش عملکرد در دوره‌های آینده نسبت به دوره پایه (۱۹۳۷-۲۰۲۳) می‌باشد.

در دوره‌ها و سناریوهای اقلیمی خوش‌بینانه تا بدبینانه، میزان کاهش عملکرد دانه گندم دیم $7/3$ تا $57/0$ درصد و عملکرد زیستی $2/6$ تا $27/9$ درصد خواهد بود. همچنین نتایج نشان داد که درصد کاهش عملکرد دانه و عملکرد زیستی در دوره اقلیمی دور (۲۰۸۰-۲۰۶۱) و سناریوی بدبینانه (RCP8.5) بیشتر خواهد بود. در سناریوی بدبینانه با وجود افزایش بارش‌ها، باتوجه به افزایش بیشتر دماهای کمینه و بیشینه، میزان تعرق و تنفس گیاه افزایش یافت و از سویی دیگر نیز با توجه به کاهش طول دوره رشد گیاه، عملکرد گیاهان به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافت.

تحقیقات نشان داد که تأثیر تغییر اقلیم بر کشاورزی، تنها محدود به افزایش متوسط مقادیر درجه حرارت و بارش نمی‌شود و فراوانی و شدت تغییر متغیرهای هواشناسی در فصل رشد از اهمیت بیشتری برخوردار می‌باشد که بدون تردید درجه حرارت هوا مهم‌ترین پارامتر هواشناسی است که فرآیندهای مختلف رویشی و زایشی گیاهان را کنترل می‌کند (Pradhan et al., 2018). در حالت کلی، افزایش درجه حرارت تا یک حد بهینه با افزایش سرعت رشد و توسعه گیاه توأم بوده، اما اگر درجه حرارت فراتر از حد آستانه گیاه شود، رشد گیاه روند کاهشی به خود می‌گیرد و در چنین شرایطی عملکرد گیاهان احتمالاً به‌علت کوتاه‌شدن چرخه فنولوژیک در گیاه، افزایش سرعت تنفس شبانه، کاهش جذب مواد غذایی، افزایش احتمال ناباروری سنبلچه، تشکیل دانه‌های کمتر و کاهش ظرفیت مخزن هنگام پر شدن دانه، کاهش خواهد یافت (Wahid et al., 2007).

۴. نتیجه‌گیری

جزر میانگین مربعات نرمال‌شده (nRMSE)، برای صفات عملکرد دانه و عملکرد زیستی و مراحل فنولوژیک گلدهی و بلوغ فیزیولوژیک ارقام گندم دیم کمتر از ۱۰ درصد بود، لذا زیرمدل APSIM-Wheat توانست با دقت مناسب صفات مذکور را برآورد نماید. سایر شاخص‌های ارزیابی مدل (CRM، D-index و R^2) نیز کارایی زیرمدل مذکور را تأیید کردند. در شرایط تغییر اقلیم در شهرستان خرم‌آباد، ارقام گندم دیم در سناریوها و دوره‌های اقلیمی مختلف تولید متفاوتی خواهند داشت. میزان کاهش عملکرد دانه رقم قابوس در شرایط مذکور $5/8$ تا $50/8$ درصد، کوهدشت $15/6$ تا $34/4$ و آفتاب $9/2$ تا $56/8$ درصد خواهد بود. عملکرد زیستی ارقام قابوس، کوهدشت و آفتاب نیز به‌ترتیب $3/8$ تا $18/5$ درصد، $14/2$ تا $23/3$ درصد و $2/5$ تا $22/5$ درصد کاهش خواهد یافت. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان داد که به‌طور متوسط در شهرستان خرم‌آباد بسته به نوع سناریو و دوره اقلیمی، عملکرد دانه گندم دیم $7/3$ تا $57/0$ درصد و عملکرد زیستی $2/6$ تا $27/9$ درصد کاهش خواهد یافت. در دوره اقلیمی دور (۲۰۸۰-۲۰۶۱) و سناریوی بدبینانه (RCP8.5) با وجود افزایش بارش‌ها، باتوجه به افزایش بیشتر دماهای کمینه و بیشینه نسبت به دوره پایه و کاهش طول دوره رشد گیاه، عملکرد گیاهان به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش خواهد یافت. با توجه به تغییرات عملکردی ارقام گندم دیم در شرایط اقلیمی مختلف، جهت سازگاری با شرایط محیطی و کاهش اثرات منفی تغییر اقلیم بر تولیدات غذایی و علوفه‌ای منطقه، بسته به هدف می‌توان تدابیر مدیریتی مناسب منطقه (از جمله انتخاب رقم، تاریخ کشت، تراکم کشت، روش آبیاری مناسب و ...) را اتخاذ نمود. با توجه به دستیابی به ضرایب ژنتیکی برخی از ارقام گندم دیم در تحقیق حاضر، می‌توان از زیرمدل APSIM-Wheat به‌عنوان ابزار کم‌هزینه و سریع در برنامه‌ریزی‌ها به‌عنوان ابزار پیش‌بینی و اتخاذ تصمیم‌های مدیریتی بهره‌جست.

۵. تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

۶. منابع

- Ahmed, M., Akram, M.N., Asim, M., Aslam, M., Hassan, F. Higgins, S., Stockle, C., & Hoogenboom, G. (2016). Calibration and validation of APSIM-Wheat and CERES-Wheat for spring wheat under rainfed conditions: Models evaluation and application. *Computers and Electronics in Agriculture*, 123, 381-401. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.03.015>.
- Bannayan, M., Hoogenboom, G., & Crout, N.M.J. (2009). Photothermal impact on maize performance: A simulation approach. *Ecological Modeling*, 180, 277-290. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2004.04.022>.
- Chen, C., Wang, E., & Yu, Q. (2010). Modelling the effects of climate variability water management on crop water productivity and water balance in the China Plain. *Agricultural Water Management*, 97(8), 1175-1184. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2008.11.012>.

- Devkota, K.P., Hoogenbom, G., Boote, K.J., Singh, U., Lamers, J.P.A., Devkota, M., & Velk, P.L.G. (2015). Simulating the impact of water saving irrigation and conservation agriculture practices for rice – wheat systems in the irrigated semi-arid drylands of Central Asia. *Agricultural and Forest Meteorology*, 214, 266-280. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.08.264>.
- Frank, S., Schmid, E., Havilk, P., Schneider, U.A., Bottcher, H., Balkovic, J., & Obersteiner, M. (2015). The dynamic soil organic carbon mitigation potential of European cropland. *Global Environmental Change*, 35, 269-278. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.08.004>.
- Gaydon, D.S., Wang, E., Poulton, P.L., Ahmad, B., Ahmed, F., Akhter, S., Ali, I., Amarasingha, R., Chaki, A.K., & Chen, C. (2017). Evaluation of the APSIM model in cropping systems of Asia. *Field Crops Research*, 204, 52-75. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.12.015>.
- Hatfield, J. (2014). Radiation interception, extinction coefficient and use efficiency of wheat crop at various irrigation and nitrogen levels in a semiarid location. *Agronomy Journal*, 106(5), 1820-1827.
- Hochman, Z., Gobbett, D., Horan, H., & Garcia, J.N. (2016). Data rich yield gap analysis of wheat in Australia. *Field Crops Research*, 197, 97-106. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.08.017>.
- Holzworth, D.P., Huth, N.I., Dvoil, P.G., Zurcher, E.G., Herrmann, N.I., Mclean, G., Chenu, K., Voonstrom, E., Snow, V., Murphy, C., Moore, A.D., Brown, H., Wish, J.P., Verral, S., Fainges, J., Bell, L.W., Peake, A.S., Poulton, P.L., & Keating, B.A. (2014). APSIM– evolution towards a new generation of agricultural systems simulation. *Environmental Modelling & Software*, 62, 327-350.
- Innes, P.J., Tan, D.K.Y., Van Ogtrop, F., & Amthor, J.S. (2015). Effects of high-temperature episodes on wheat yields in New South Wales, Australia. *Agricultural and Forest Meteorology*, 208, 95-107. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.03.018>.
- IPCC. 2014. Climate Change Impacts, Adaptation and Vulnerability: Regional Aspects: Cambridge University Press.
- Karandish, F., Mousavi, S., & Tabari, H. (2017) Climate change impact on precipitation and cardinal temperatures in different climatic zones in Iran: analyzing the probable effects on cereal water-use efficiency. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 31, 2121–2146. <https://doi.org/10.1007/s00477-016-1355-y>.
- Loague, K., & Green, R.W. (1991). Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: Overview and application. *Journal of Contaminant Hydrology*, 7, 51-73. [http://dx.doi.org/10.1016/0169-7722\(91\)90038-3](http://dx.doi.org/10.1016/0169-7722(91)90038-3).
- Matin, M.M., Olesen, J.E., & Porter, J.R. (2014). A genotype, environment and management analysis of adaption in winter wheat to climate change in Denmark. *Agricultural and Forest Meteorology*, 187, 1-13. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.11.009>.
- Oleary, G.J., Christy, B., Nuttall, J., Huth, N., Cammarano, D., Stockle, C., Basso, B., Shcherbak, I., Fitzgerald, G., Luo, Q., Farre-Codina, I., Palta, J., & Asseng, S. (2015). Response of wheat growth, grain yield and water use to elevate CO₂ under a free-air CO₂ enrichment (FACE) experiment and modelling in a semi-arid environment. *Global Change Biology*, 21(7), 2670-2686. http://dx.doi.org/10.1007/978-981-15-4728-7_6.
- Rezaei, E.E., Siebert, S., & Ewert, F. (2015). Intensity of heat stress in winter wheat phenology compensates for the adverse effect of global warming. *Environmental Research Letters*, 10(2), 12-24. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/10/2/024012>.
- Soltani, A., & Sinclair, T.R. (2015). A comparison of four wheat models with respect to robustness and transparency: Simulation in a temperate, sub-humid environment. *Field Crops Research*, 175, 37-46. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2014.10.019>.
- Wahid, A., Gelani, S., Ashraf, M., & 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, J., Enli, W., & De, L. (2018). Modelling the impacts of climate change on wheat yield and field water balance over the Murray–Darling Basin in Australia. *Theoretical and Applied Climatology*, 104(4), 285-300. <https://doi.org/10.1007/s00704-010-0343-2>.
- Willmott, C.J. (1982). Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 63, 1309-1313. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1982\)063%3C1309:SCOTEO%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1982)063%3C1309:SCOTEO%3E2.0.CO;2).
- Zhao, G., Bryan, B., & Song, X. (2014). Sensitivity and uncertainty analysis of the APSIM – Wheat model: Interaction between cultivar, environment and management parameters. *Ecological Modelling*, 279, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2014.02.003>.
- Zhao, P., Zhou, Y., Li, F., Ling, X., Deng, N., Peng, S., & Man, J. (2020). The adaptability of Apsim-Wheat model in the middle and lower reaches of the Yangtze River plain of China: A case study of winter wheat in Hubei province. *Agronomy*, 10, 981-995. <https://doi.org/10.3390/agronomy10070981>.
- Zheng, B., Chenu, K., Doherty, A., Doherty, T., & Chapman, L. (2014). The APSIM-Wheat Module. APSRU Australia, 1-44. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2008.11.012>.