

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

کامران حق‌آبی^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@asnrukh.ac.ir

چکیده

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 (۲۰۶۱-۲۰۸۰) 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.

کلمات کلیدی: ارزیابی، پارامتریابی، پیش‌بینی اقلیمی، صفات فنولوژیک، عملکرد دانه.

Forecasting the Yield of Rain fed 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@irimo.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: amirmosavi@asnrukh.ac.ir

Abstract

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 simulate the effects of climate change on wheat production in different periods and scenarios, the APSIM-Wheat. 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. An 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 varying climate and management conditions. 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 model accuracy in estimating wheat yields. Other evaluation indicators (CRM, D-index, and R^2) also confirmed the robustness of the sub-models. In all studied climate periods and scenarios, the grain yield and biological yield of dry 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 distant climate period (2061-2080) and the pessimistic scenario (RCP8.5), despite an increase in rainfall, the yield of the increase 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. Therefore, 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 rainfed 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.

Key Words: Climate Prediction, Evaluation, Parameterization, Phenological Traits, Seed Yield.

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 باتوجه به کاهش بارندگی و افزایش دما با چالش جدی روبه‌رو است (Karandish et al., 2017)، از این رو 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 پیش بینی 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 آپسیم (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 گرداند (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 قابل‌ملاحظه 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)¹ 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

¹ General Circulation Model

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- $nindex = 0.8$). نتایج این محققان نشان داد که اگرچه با افزایش غلظت گاز دی‌اکسیدکربن عملکرد گندم افزایش یافت، ولی با افزایش هم‌زمان دی‌اکسیدکربن 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 که به‌عنوان محصول استراتژیک در تأمین امنیت غذایی مردم ایران نقش بسزایی دارند، تحقیق حاضر با هدف برآورد میزان تولید گندم دیم در شرایط تغییر اقلیم در شهرستان خرم‌آباد با استفاده از زیرمدل APSIM-Wheat انجام شد 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 پارامتریابی و تعیین 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.

۲.۱. پارامتریابی مدل

جهت شبیه‌سازی عملکرد دانه و عملکرد زیستی گندم دیم، 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 بر روی آن‌ها تأثیری ندارد و تغییر آن‌ها در دامنه خاص خود می‌باشند. 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

² *Triticum aestivum* L.

ضرایب مختلفی از جمله: Vern_sens، Photop_sens، mat، Startgf_to، Grains_per_gram_stem، Potential_grain_filling_rate و Phylochron، کنترل می‌شوند (Ahmed *et al.*, 2016; Zhao *et al.*, 2014). 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 دیم 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 نیز ۱۲۵۰ متر از سطح دریا می‌باشد. تیمارهای آزمایش سه رقم گندم دیم (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 نشان دهنده تولید منطقه است. براساس گزارش مؤسسه تحقیقات کشاورزی دیم کشور، ارقام قابوس و آفتاب جزء ارقام جدید و زودرس گندم برای مناطق گرمسیری و نیمه گرمسیری محسوب می‌باشند. 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 اِپسیم براساس اطلاعات سه رقم گندم بومی‌سازی شد و میانگین عملکرد ارقام مذکور به عنوان 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 اقدام به احداث جوی و پشته گردید. 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 مترمربع 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 سوپر فسفات تریپل مصرف گردید و در طول فصل رشد نیز متناسب با نیاز کودی، ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار کود اوره در مرحله اوایل ساقه‌دهی به صورت سرک مصرف شد. عملیات کاشت بذور در ۱۵ آبان‌ماه (تاریخ کاشت بهینه) با استفاده از دستگاه کارنده انجام شد. علف‌های هرز مزرعه نیز به صورت 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 شد 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 موردنظر بود. بدین منظور بوته‌های موردنظر به مدت ۴۸ ساعت در آون با دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند و درنهایت با ترازوهای دیجیتالی عملکرد دانه و عملکرد زیستی ارقام توزین گردید.

۲.۲.۲. 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 و برداشت و چگونگی مدیریت مزرعه ثبت شد. همچنین به‌منظور بررسی وضعیت رشد ارقام در مزارع انتخاب شده، اطلاعات خاکی و گیاهی نیز ثبت شد.

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

اطلاعات خاکی: عبارت‌اند از 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) بودند.

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 مترمربع در روز)، از بانک داده‌های سازمان هواشناسی کشور تهیه گردید. 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 اقدام به شبیه‌سازی آن با استفاده از رابطه آنگستروم (رابطه ۱)، شد.

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

در رابطه بالا، R_s نشان دهنده تشعشع، n ساعات آفتابی، N طول روز و R_a تابش فرازمینی می‌باشد. پارامترهای a و b ضرایب آنگستروم کالیبر شده محلی هستند (Almorox et al., 2005). همچنین به دلیل این که در

بعضی از ایستگاه‌ها داده‌ها به‌طور کامل ثبت نمی‌شود و یا داده‌های پرت و گم‌شده وجود دارد که با استفاده از میان‌گیری به‌صورت دستی اقدام به بازسازی و اصلاح این داده‌ها گردید. 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-RCP2.6، HADCM3-RCP4.5 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 مشاهده شده با استفاده از داده‌های آزمایش‌های میدانی (۱۰ مزرعه منتخب) صحت‌سنجی شدند. بدین منظور مدل اجراء و مراحل رشد، نمو و عملکرد ارقام گندم مورد مطالعه شبیه‌سازی شد، سپس نتایج شبیه‌سازی شده با داده‌های مشاهده شده 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 اسیسم در نظر گرفته شدند. همچنین از شاخص‌های ضریب تبیین^۳ (R^2)، جذر خطای میانگین مربعات نرمال شده^۴ (nRMSE)، (رابطه ۲، Bannayan *et al.*, 2009)، ضریب جرمی خطا^۵ (CRM)، (رابطه ۳، Loague and Green, 1991)، و ضریب هم‌خوانی^۶ (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 مشاهده شده، n تعداد مشاهدات و M میانگین داده‌های مشاهده شده می‌باشند. $nRMSE$ درصد تفاوت نسبی بین مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده نسبت به میانگین داده‌های مشاهده شده 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 مشاهده شده است. منفی بودن این شاخص به معنای بیشتر بودن و مثبت بودن آن به معنای کمتر بودن مقادیر شبیه‌سازی شده از مقادیر مشاهده شده 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 مشاهده شده باشد، مقدار شاخص $D-index$ برابر با یک و اگر مقادیر شبیه‌سازی شده برای تمامی داده‌ها برابر با میانگین داده‌های مشاهده شده 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 شناسایی شده نیز در شرایط قابل دسترس میزان تغییرات عملکردی گیاهان مذکور نسبت به دوره پایه ارزیابی شد.

۳. یافته‌های پژوهش

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 نشان دهنده آن است که مدل اپسیم به‌ترتیب برآورد کمتر و بیشتری نسبت به مقادیر مشاهده شده 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 مشاهده شده برآورد کرد. مقدار عددی شاخص ضریب هم‌خوانی ($D-index$) برای عملکرد دانه ارقام گندم دیم ۰/۶۲ و عملکرد زیستی ۰/۳۸ بود که نشان دهنده تطابق بین داده‌های شبیه‌سازی و مشاهده شده 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 مشاهده شده باشد، مقدار شاخص $D-index$ برابر با یک و اگر مقادیر شبیه‌سازی شده برای تمامی داده‌ها برابر با میانگین داده‌های مشاهده شده باشد، مقدار این شاخص برابر با صفر خواهد بود (Zhao et al., 2020). در خصوص تاریخ گلدهی اختلاف بین داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهده شده کم بوده، ولی در خصوص

رسیدگی فیزیولوژیک مقادیر شبیه‌سازی شده با میانگین داده‌های مشاهده شده ارقام گندم اختلاف کمتری داشتند، لذا شاخص تطابق به سمت صفر میل نموده است.

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

مراحل فنولوژیک (روز پس از کاشت)		عملکرد (کیلوگرم در هکتار)		شاخص	
رشدگی فیزیولوژیک	گلدهی	عملکرد زیستی	عملکرد دانه	پیش‌بینی	مشاهده
پیش‌بینی	مشاهده	پیش‌بینی	مشاهده	پیش‌بینی	مشاهده
۱۸۳	۱۸۰	۹۲۵۲	۹۵۷۱	۳۳۲۵	۳۷۳۹
۶/۶۱	۴/۵۸	۳/۹۱	۴/۴۳	Mean	
-۰/۰۱۷	-۰/۰۰۵	+۰/۰۳	+۰/۱۱	nRMSE (%)	
۰/۴۴	۰/۷۷	۰/۳۸	۰/۶۲	CRM	
۰/۷۸	۰/۸۲	۰/۸۴	۰/۹۵	D-index	
				R ²	

Mean: میانگین 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.

بنابراین به‌طور کلی در گندم دیم، بین مقادیر شبیه‌سازی شده عملکرد با مقدار مشاهده شده اختلاف چندانی وجود نداشت که مقدار ضریب R² نیز گویای این امر است. مقدار جذر میانگین مربعات نرمال شده (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 اِپسیم را در پیش‌بینی عملکرد گیاهان گندم و جو قابل قبول برآورد کردند (Zhao *et al.*, 2020; Gaydon *et al.*, 2017; Zheng *et al.*, 2014).

۲.۳. ارزیابی مدل اِپسیم 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 مشاهده شده و شبیه‌سازی شده بیشتر از ۰/۷۰ بود و همچنین مقدار جذر میانگین مربعات نرمال شده (nRMSE) مدل اِپسیم 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 که در شرایط واقعی عملکرد دانه گندم دیم 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 اِپسیم (APSIM-Wheat)، عملکرد دانه و عملکرد زیستی گندم را در شرایط بدون تنش و واقعی (سطوح مختلف رژیم‌های رطوبتی، کودی، تاریخ کاشت‌های مختلف و غیره)، بدون اجرای آزمایش‌های زمان‌بر و پرهزینه برآورد نمود. بنابراین به‌کارگیری مدل اِپسیم 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 غیراقتصادی نموده و موجب افزایش نیاز به واردات این محصولات خواهد شد. استفاده از مدل‌های گیاهان زراعی همچون اِپسیم 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 استفاده کرد.

محققان طی بررسی کارایی شش مدل گیاهی (APSIM-Wheat، APSIM-Nwheat، CAT-Wheat، CropSyst، OLEARY-CONNOR و SALUS)، 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 and Sinclair, 2015). گایدون و همکاران (Gaydon *et al.*, 2017)، طی ارزیابی مدل اِپسیم 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 دی اکسید 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.

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

شاخص	عملکرد (کیلوگرم در هکتار)	مراحل فنولوژیک (روز پس از کاشت)
------	---------------------------	---------------------------------

عملکرد دانه		عملکرد زیستی		گلدهی		رسیدگی فیزیولوژیک	
مشاهده	پیش‌بینی	مشاهده	پیش‌بینی	مشاهده	پیش‌بینی	مشاهده	پیش‌بینی
Mean	۲۰۸۲/۴۵	۲۴۵۸/۵۲	۸۰۹۴/۴۴	۸۲۰۷/۶۵	۱۲۱	۱۸۴	۱۸۲
nRMSE (%)	۱۲/۳۴			۸/۹۱	۵/۷۶	۳/۱۹	
CRM	-۰/۰۶۰			-۰/۰۰۷	-۰/۰۱۱	+۰/۰۰۴	
D-index	۰/۸۹			۰/۹۷	۰/۷۹	۰/۷۸	
R ²	۰/۸۵			۰/۹۳	۰/۷۵	۰/۷۵	

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 مشاهده‌شده است، D-index: شاخص ضریب هم‌خوانی و R²: ضریب تبیین.

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 (۲۰۴۰-۲۰۲۴، ۲۰۶۰-۲۰۴۱ و ۲۰۸۰-۲۰۶۱)، 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 (۲۰۴۰-۲۰۲۴)، آینده متوسط (۲۰۶۰-۲۰۴۱) 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 به‌صورت بهینه بوده در نظر گرفته شده است.

در شرایط بهینه مدیریتی متوسط عملکرد دانه و عملکرد زیستی گندم دیم در شهرستان خرم‌آباد در دوره پایه (۱۹۸۷-۲۰۲۳)، به‌ترتیب 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). در دوره‌ها و سناریوهای اقلیمی خوش‌بینانه تا بدبینانه، میزان کاهش عملکرد دانه گندم دیم ۷/۳ تا ۵۷/۰ درصد و عملکرد زیستی ۲/۶ تا ۲۷/۹ درصد خواهد بود. نتایج همچنین 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 تحت کنترل دارد (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 کوتاه شدن 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).

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 دی اکسید کربن
۲۰۲۴-۲۰۴۰	۲/۶	+۱۴/۹	+۶/۰	+۱۳/۰	-۳۹/۱	+۱۸/۲
	۴/۵	+۱۱/۴	+۳/۸	+۱۴/۲	-۳۴/۹	+۱۹/۶
	۸/۵	+۱۲/۶	+۴/۲	+۱۳/۸	-۳۴/۲	+۲۳/۴
۲۰۴۱-۲۰۶۰	۲/۶	+۱۸/۱	+۸/۹	+۲/۷	-۴۴/۷	+۲۱/۵
	۴/۵	+۱۸/۳	+۶/۱	+۱۷/۴	-۴۶/۳	+۳۳/۹
	۸/۵	+۲۵/۱	+۸/۵	+۲۳/۱	-۵۰/۸	+۴۸/۷
۲۰۶۱-۲۰۸۰	۲/۶	+۱۸/۰	+۷/۹	+۱۲/۶	-۴۴/۵	+۲۰/۱
	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 نشان دهنده 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 دانه (کیلوگرم در هکتار)				عملکرد زیستی (کیلوگرم در هکتار)			
سناریوی اقلیمی (RCP)				دوره اقلیمی			
مقدار				درصد تغییرات نسبت به دوره پایه			
کوهدشت	آفتاب	قابوس	میانگین	کوهدشت	آفتاب	قابوس	میانگین
پایه				۱۹۸۷-۲۰۲۳			
۳۴۹۲	۳۶۴۷	۴۰۷۹	۳۷۳۹	۹۴۸۱	۹۵۴۴	۹۶۸۸	۹۵۷۱
۲۰۲۴-۲۰۴۰				۲۰۲۴-۲۰۴۰			
۳۱۸۷	۳۲۵۹	۴۰۰۲	۳۴۸۳	۸۶۲۱	۹۷۱۵	۹۶۵۳	۹۳۳۰
۲/۶				۲۰۴۱-۲۰۶۰			
۲۸۷۴	۳۶۹۰	۳۸۹۱	۳۴۸۵	۸۰۹۷	۹۳۵۶	۹۴۷۱	۸۹۷۵
۲۰۶۱-۲۰۸۰				۲۰۶۱-۲۰۸۰			
۲۹۲۱	۳۱۲۱	۳۶۷۷	۳۲۴۰	۸۱۹۷	۸۸۹۷	۸۹۲۱	۸۶۷۳
۲/۶				۲۰۶۱-۲۰۸۰			
۲۹۹۴	۳۳۵۷	۳۸۵۷	۳۴۰۳	۸۳۰۵	۹۳۳۳	۹۳۴۸	۸۹۹۲
۲۰۲۴-۲۰۴۰				۲۰۲۴-۲۰۴۰			
۳۰۱۱	۲۸۵۹	۳۶۵۱	۳۱۷۴	۸۳۹۱	۸۸۹۱	۹۰۹۶	۸۷۹۳
۴/۵				۲۰۴۱-۲۰۶۰			
۲۶۹۱	۲۶۶۱	۳۳۶۹	۲۹۰۷	۷۹۱۴	۸۴۹۸	۸۶۶۷	۸۳۶۰
۲۰۶۱-۲۰۸۰				۲۰۶۱-۲۰۸۰			
۲۹۰۰	۲۵۲۴	۲۹۲۸	۲۷۸۴	۷۹۸۱	۸۰۴۹	۸۰۹۱	۸۰۴۰
۴/۵				۲۰۶۱-۲۰۸۰			
۲۸۶۷	۲۶۸۱	۳۳۱۶	۲۹۵۵	۸۰۹۵	۸۴۷۹	۸۶۱۸	۸۳۹۷
۲۰۲۴-۲۰۴۰				۲۰۲۴-۲۰۴۰			
۲۸۷۹	۲۴۱۳	۲۹۲۲	۲۷۳۸	۷۴۱۵	۸۰۱۲	۸۵۷۲	۸۰۰۰
۸/۵				۲۰۴۱-۲۰۶۰			
۲۵۰۱	۲۳۶۵	۲۷۴۱	۲۵۳۶	۷۱۱۶	۷۷۱۰	۸۱۷۰	۷۶۶۵
۲۰۶۱-۲۰۸۰				۲۰۶۱-۲۰۸۰			
۲۴۵۴	۲۲۰۸	۲۴۸۴	۲۳۸۲	۶۹۷۴	۷۶۶۲	۷۸۱۱	۷۴۸۲
۸/۵				۲۰۶۱-۲۰۸۰			
۲۶۱۱	۲۳۲۹	۲۷۱۶	۲۵۵۲	۷۱۶۸	۷۷۹۵	۸۱۸۴	۷۷۱۶
۲۰۲۴-۲۰۴۰				۲۰۲۴-۲۰۴۰			
۳۰۲۶	۲۸۴۴	۳۵۲۵	۳۱۳۲	۸۱۴۲	۸۸۷۳	۹۱۰۷	۸۷۰۷
۲۰۴۱-۲۰۶۰				۲۰۴۱-۲۰۶۰			
۲۶۸۹	۲۹۰۵	۳۳۳۴	۲۹۷۶	۷۷۰۹	۸۵۲۱	۸۷۶۹	۸۳۳۳
۲۰۶۱-۲۰۸۰				۲۰۶۱-۲۰۸۰			
۲۷۵۸	۲۶۱۸	۳۰۲۰	۲۸۰۲	۷۷۱۷	۸۲۰۳	۸۲۷۴	۸۰۶۵

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

۴. نتیجه گیری

جذر میانگین مربعات نرمال شده (nRMSE)، برای صفات عملکرد دانه و عملکرد زیستی و مراحل فنولوژیک گلدهی و بلوغ فیزیولوژیک ارقام گندم دیم کمتر از ۱۰ درصد بود، لذا زیر مدل APSIM-Wheat توانست با دقت مناسب صفات مذکور را برآورد نماید. سایر شاخص‌های ارزیابی مدل (CRM، D-index و R^2) نیز کارایی زیر مدل مذکور را تأیید کردند. در شرایط تغییر اقلیم در شهرستان خرم آباد، ارقام گندم دیم در سناریوها و دوره‌های اقلیمی مختلف تولید متفاوتی خواهند داشت. میزان کاهش عملکرد دانه رقم قابوس در شرایط مذکور ۵/۸ تا ۵۰/۸ درصد، کوهدشت ۱۵/۶ تا ۳۴/۴ و آفتاب ۹/۲ تا ۵۶/۸ درصد خواهد بود. عملکرد زیستی ارقام قابوس، کوهدشت و آفتاب نیز به ترتیب ۳/۸ تا ۱۸/۵ درصد، ۱۴/۲ تا ۲۳/۳ درصد و ۲/۵ تا ۲۲/۵ 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 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. 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 غیره) را اتخاذ نمود. با توجه به دستیابی به ضرایب ژنتیکی برخی از ارقام گندم دیم در تحقیق حاضر، از زیرمدل APSIM-Wheat به‌عنوان ابزار کم هزینه و سریع می‌توان در برنامه‌ریزی‌های به‌عنوان ابزار پیش‌بینی و اتخاذ تصمیم‌های مدیریتی بهره جست.

۵. تعارض منافع

بنا بر 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., Hoogenboom, 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, pp, 1-44. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2008.11.012>.

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

Abstract (Extended)

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 improving crop management practices, including cultivar selection, optimization of key plant traits such as sowing date and plant density, nitrogen fertilization management, and projecting 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.

Material 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 simulate the effects of climate change on wheat production in different periods and scenarios, the APSIM-Wheat. 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. An experiment was conducted 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 varying 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 model accuracy in estimating wheat yields. Other evaluation indicators (CRM, D-index, and R^2) also confirmed the robustness of the sub-models. In all studied climate periods and scenarios, the grain yield and biological yield of dry 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 distant climate period (2061-2080) and the pessimistic scenario (RCP8.5), despite an increase in rainfall, the yield of the increase 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

Therefore, 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 rainfed 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.

Key Words: Climate Prediction, Evaluation, Parameterization, Phenological Traits, Seed Yield.