

Parameterization and evaluation of SSM-iCrop2 model to simulate the growth and yield of rice in Iran

Saleh Keramat¹, Benjamin Torabi^{*2}, Afshin Soltani³, Ebrahim Zeinali⁴

1. Ph.D. Graduate, Dept. of Agronomy, Faculty of Plant Production, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: salehkeramat@gmail.com
2. Corresponding Author, Associate Prof., Dept. of Agronomy, Faculty of Plant Production, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: ben_torabi@yahoo.com
3. Professor, Dept. of Agronomy, Faculty of Plant Production, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: afshin.soltani@gau.ac.ir
4. Associate Prof., Dept. of Agronomy, Faculty of Plant Production, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: e.zeinali@gau.ac.ir

Article Info

Article type:

Full Length Research Paper

Article history:

Received: 05.03.2021

Revised: 07.12.2021

Accepted: 08.05.2021

Keywords:

Grain yield,
Leaf area,
Phenology,
Simulation,
Soil water

ABSTRACT

Background and Objectives: In order to identify the possibility of supplying food to the world's population, given the need for continued production in sustainable agriculture, it is necessary to correctly predict the yield of crops. For this purpose, modeling of growth stages and yield of rice based on meteorological statistics of Iran, was studied in Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources. The purpose of this study was to use the simple model SSM-iCrop2 to simulate rice growth and yield to investigate the effects of climatic factors, soil, agronomic management and to determine the genetic coefficients of rice in Iran. Due to the appropriate ability of the model in rice simulation, it can be used as a suitable tool for better planning and management of rice fields in the country.

Materials and Methods: In this study, the SSM-iCrop2 model was used to simulate the potential yield. In this model, the amount of potential yield is calculated based on meteorological data, soil conditions, management and plant parameters. The model needs a series of inputs to run, which is made to perform the simulation of the collected model. The most important processes to be simulated in the model are plant phenology, leaf area changes, dry matter production and distribution, and soil water balance. For parameterization and evaluation of the model, the values of performance and day to maturity of the simulated were compared with those observed. According to the statistics of the Ministry of Agriculture, 2001-2016, the main areas of rice cultivation and production in Iran were identified. In this study, to compare the deviation of the simulated values from the observed squared error mean (RMSE), coefficient of variation (CV), correlation coefficient (r) and the deviation of the simulated results from line 1:1 with a range of 20% difference. Between the simulated and observed values was used to test the model results.

Results: In parameterization of SSM-iCrop2 model for rice, the comparison of observed and simulated days to maturity with RMSE, CV and r values of respectively 12 days, 11 percent and 0.61, respectively, and for grain yield of 56 g m⁻², 21 percent and 0.80 indicated the accuracy of the used parameters. Furthermore, in evaluation the model, RMSE, CV and r values for days to maturity were 9 days, 10 percent and 0.95 and for

grain yield were 43 g m⁻², 14 percent and 0.77 and in simulation evapotranspiration were 44 mm, 9 percent and 0.79 respectively, which confirms the precision of the model simulation. Application of SSM-iCrop2 model is simple and acceptably precise simulation is possible with minimal parameters and inputs.

Conclusion: The results of parameterization and evaluation of SSM-iCrop2 model, which was (RMSE), (r) and (CV), showed that this model includes phenological stages and grain yield in the history of different plantings in the climatic conditions of Iran simulates with great accuracy, which indicates the appropriate structure of the model in the simulation. Therefore, considering the appropriate accuracy of SSM-iCrop2 model in simulating rice phenology and yield, it can be used as a suitable tool to study cropping systems and interpret the results in different environmental and management conditions to plan and improve the management of rice fields in the country.

Cite this article: Keramat, Saleh, Torabi, Benjamin, Soltani, Afshin, Zeinali, Ebrahim. 2023. Parameterization and evaluation of SSM-iCrop2 model to simulate the growth and yield of rice in Iran. *Journal of Plant Production Research*, 30 (1), 21-47.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/JOPP.2021.19090.2822

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

پارامتریابی و ارزیابی مدل SSM-iCrop2 برای شبیه‌سازی رشد و عملکرد گیاه برنج در ایران

صالح کرامت^۱، بنیامین ترابی^{۲*}، افشین سلطانی^۳، ابراهیم زینلی^۴

۱. دانش‌آموخته دکتری زراعت، گروه زراعت، دانشکده تولید گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: salehkeramat@gmail.com
۲. نویسنده مسئول، دانشیار گروه زراعت، دانشکده تولید گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: ben_torabi@yahoo.com
۳. استاد گروه زراعت، دانشکده تولید گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: afshin.soltani@gu.ac.ir
۴. دانشیار گروه زراعت، دانشکده تولید گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: e.zeinali@gu.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی- پژوهشی	سابقه و هدف: برای شناسایی امکان تامین غذای جمعیت جهان، با توجه به لزوم تداوم تولید در کشاورزی پایدار، پیش‌بینی درست عملکرد گیاهان زراعی امری لازم و ضروری است. به‌منظور، مدل‌سازی مراحل رشد و عملکرد برنج بر اساس آمار هواشناسی کشور ایران، مطالعه‌ای در دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان صورت گرفت. هدف از این مطالعه استفاده از مدل ساده SSM-iCrop2 برای شبیه‌سازی رشد و عملکرد برنج به‌منظور بررسی اثرات عوامل آب و هوایی، خاک، مدیریت زراعی و تعیین ضرایب ژنتیکی برنج در شرایط کشور ایران بود. با توجه به توانایی مناسب مدل در شبیه‌سازی برنج، می‌توان از آن به عنوان ابزار مناسبی برای برنامه‌ریزی و مدیریت بهتر مزارع برنج در کشور استفاده نمود.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۱۳ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۰/۰۴/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۱۴	
واژه‌های کلیدی: آب خاک، سطح برگ، شبیه‌سازی، عملکرد دانه، فنولوژی	مواد و روش‌ها: در این مطالعه از مدل SSM-iCrop2 برای شبیه‌سازی پتانسیل عملکرد استفاده شد. در این مدل مقدار عملکرد پتانسیل بر مبنای داده‌های هواشناسی، شرایط خاک، نحوه مدیریت (مانند آبیاری) و پارامترهای گیاهی محاسبه می‌شود. مدل برای اجرا نیاز به یک سری پارامترهای ورودی شامل: روابط آب، اطلاعات هواشناسی، مکانی، خاک و مدیریت زراعی دارد که برای انجام شبیه‌سازی، ورودی‌های مورد نیاز مدل جمع‌آوری شدند. مهم‌ترین فرآیندهایی که در مدل باید شبیه‌سازی شوند عبارت است از، فنولوژی گیاه، تغییرات سطح برگ، تولید و توزیع ماده خشک و موازنه آب خاک. برای پارامتریابی و ارزیابی مدل، مقادیر عملکرد و روز تا رسیدگی شبیه‌سازی شده با مشاهده شده مقایسه شدند. براساس آمار وزارت کشاورزی ۱۳۸۰-۱۳۹۵، مناطق اصلی کشت و تولید برنج در ایران مشخص شد. در این مطالعه

برای مقایسه انحراف مقادیر شبیه‌سازی شده از مشاهده شده از میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب تغییرات (CV)، ضریب همبستگی (r) و میزان انحراف نتایج شبیه‌سازی شده از خط ۱:۱ با طیفی از اختلاف ۲۰ درصد بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده شده (به‌وسیله خطوط منقطع تعریف شده) برای آزمون نتایج مدل استفاده شد.

یافته‌ها: در پارامتریابی مدل SSM-iCrop2 برای برنج، مقایسه بین روز تا رسیدگی مشاهده شده و شبیه‌سازی شده، با RMSE، cv و r به ترتیب برابر با ۱۲ روز، ۱۱ درصد و ۰/۶۱ و برای عملکرد دانه به ترتیب ۵۶ گرم در مترمربع، ۲۱ درصد و ۰/۸۰ درستی پارامترهای مورد استفاده را نشان داد. هم‌چنین، در ارزیابی مدل، مقادیر RMSE، cv و r برای روز تا رسیدگی به ترتیب برابر با ۹ روز، ۱۰ درصد و ۰/۹۵، برای عملکرد دانه به ترتیب ۴۳ گرم در مترمربع، ۱۴ درصد و ۰/۷۷ و در شبیه‌سازی تبخیر و تعرق به ترتیب ۴۴ میلی‌متر، ۹ درصد و ۰/۷۹، دقت شبیه‌سازی مدل را تأیید نمود. استفاده از مدل SSM-iCrop2 آسان بوده و شبیه‌سازی‌ها با تعداد پارامتر کم و داده‌های ورودی قابل دسترس با دقت قابل قبول امکان‌پذیر است.

نتیجه‌گیری: نتایج پارامتریابی و ارزیابی مدل SSM-iCrop2 با استفاده از شاخص‌های جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب همبستگی (r) و ضریب تغییرات (CV)، نشان داد که این مدل مراحل فنولوژیکی (روز تا رسیدگی) و عملکرد دانه را در تاریخ کاشت‌های مختلف در شرایط اقلیمی ایران با دقت زیادی شبیه‌سازی می‌کند که نشان‌دهنده ساختار مناسب مدل در شبیه‌سازی است. بنابراین، با توجه به دقت مناسب مدل SSM-iCrop2 در شبیه‌سازی فنولوژی و عملکرد برنج، می‌توان از آن به عنوان ابزار مناسبی برای بررسی سامانه‌های زراعی و تفسیر نتایج در شرایط محیطی و مدیریتی متفاوت در جهت برنامه‌ریزی و بهبود مدیریت مزارع برنج در کشور استفاده نمود.

استناد: کرامت، صالح، ترابی، بنیامین، سلطانی، افشین، زینلی، ابراهیم (۱۴۰۲). پارامتریابی و ارزیابی مدل SSM-iCrop2 برای شبیه‌سازی رشد و عملکرد گیاه برنج در ایران. نشریه پژوهش‌های تولید گیاهی، ۳۰ (۱)، ۴۷-۲۱.

DOI: 10.22069/JOPP.2021.19090.2822



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

برنج (*Oryza sativa* L.) یکی از مهم‌ترین غلات جهان است، یک سوم مواد غذایی مورد نیاز جمعیت جهان را تامین می‌کند و حدود ۷۰۰ کالری برای هر نفر، که عمدتاً در کشورهای در حال توسعه ساکن هستند، فراهم می‌کند (۱). سطح زیر کشت برنج در جهان در سال ۲۰۱۹، ۱۶۷/۲ میلیون هکتار و تولید آن، ۵۱۳ میلیون تن گزارش شده است (۲). در جهان، برنج بیش‌تر در قاره آسیا کشت و مصرف می‌شود (۳). در ایران استان‌های گیلان و مازندران از مناطق مهم تولید برنج هستند و استان‌های خوزستان، گلستان و فارس در رتبه‌های بعدی قرار دارند. طبق آمار وزارت جهاد کشاورزی، در سال ۱۳۹۵، در ایران، سطح زیر کشت برنج ۵۹۶۰۳۵ هکتار و تولید آن ۲/۹۲ میلیون تن بوده است (۴).

پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۵۰ جمعیت جهان به ۹ میلیارد نفر افزایش یابد. بنابراین، تقاضا برای دستیابی به غذا افزایش یافته و برای پاسخ‌گویی به این تقاضا باید تولید مواد غذایی تا سال ۲۰۵۰، ۱۰۰ تا ۱۱۰ درصد افزایش یابد (۵). در این خصوص، غلات با بالاترین میزان مصرف در درجه اول اهمیت قرار دارند. در سال‌های اخیر، با توجه به اهمیت برنج در ایجاد امنیت غذایی و توسعه پایدار، تلاش‌های زیادی در جهت افزایش تولید آن صورت گرفته است (۶). در عین حال، استفاده از آزمایش‌های مزرعه‌ای برای ارزیابی راه‌های افزایش عملکرد برنج می‌تواند بسیار زمان‌بر و پرهزینه باشد بنابراین، نیاز به پیش‌بینی عملکرد محصول در آینده برای مدیریت و آزمون فرضیه‌ها، همراه با پیشرفت در علوم زراعی و فناوری‌های رایانه‌ای، باعث به‌وجود آمدن مدل‌سازی گیاهان شد (۷).

امروزه مدل‌های شبیه‌سازی گیاهان زراعی این امکان را فراهم ساخته‌اند که با استفاده از آن‌ها و

داده‌های هواشناسی بلندمدت، محدودیت‌های محیطی در عملکرد هر منطقه را بتوان ارزیابی کرد و به تحلیل عملکرد و تغییرات آن در رابطه با عوامل آب و هوایی (دما، تشعشع، بارندگی و دی‌اکسیدکربن) پرداخت (۸) و تیمارهای موردنظر را با صرفه‌جویی در مصرف زمان و هزینه اجرا کرد بدون این‌که به نتایج حاصله خدشه وارد گردد. هم‌چنین، از این مدل‌ها در ارزیابی صفات فیزیولوژیکی برای بهبود عملکرد و کمک به تصمیم‌گیری برای به حداکثر رساندن استفاده از منابع قابل‌دسترس استفاده می‌شود (۹). از مدل‌ها می‌توان در بهبود مدیریت تولید گیاهان زراعی برای پیش‌بینی تاریخ‌های احتمالی برداشت، عملکرد نهایی، زمان وقوع مراحل فنولوژی و ارزیابی صفات فیزیولوژیکی به نحوی که کود، تنظیم‌کننده‌های رشد، علف‌کش‌ها و کنترل بیماری‌ها در مناسب‌ترین زمان به‌کار گرفته شوند، استفاده نمود. از دیگر کاربردهای مدل‌های گیاهان زراعی علاوه بر تعیین پتانسیل عملکرد، می‌توان کمک به مدیریت آبیاری و ارزیابی اثرات تغییر اقلیم نیز اشاره کرد (۷ و ۹).

در جهان مطالعات متعددی در رابطه با کاربرد مدل‌های شبیه‌سازی بر روی گیاه زراعی برنج انجام شده است که می‌توان به مطالعه (۱۰، ۱۱، ۱۲ و ۱۳) اشاره نمود. در ایران نیز مطالعاتی در زمینه شبیه‌سازی رشد و عملکرد برنج در مقیاس کم با استفاده از مدل‌ها صورت گرفته است و نتایج این مطالعات کارایی قابل‌قبول این مدل‌ها در تخمین رشد و عملکرد برنج را نشان دادند (۱۴، ۱۵ و ۱۶).

استفاده از یک مدل شبیه‌سازی در پیش‌بینی رشد و عملکرد، به پارامترهای ورودی آن مدل در منطقه موردنظر بستگی دارد. هم‌چنین برخی از مدل‌ها ممکن است معادلات یا روابط بین فرآیندهای مختلف رشد و عملکرد گیاه و یا حتی مقدار یک پارامتر مربوط به خصوصیات گیاه را با توجه به اقلیم منطقه معینی

SSM-iCrop2 نسبت به سایر مدل‌های موجود، بومی بودن آن می‌باشد. در این مدل مقدار عملکرد پتانسیل بر مبنای داده‌های هواشناسی، شرایط خاک، نحوه مدیریت و پارامترهای گیاهی محاسبه می‌شود. این مدل توانایی شبیه‌سازی مراحل نمو فنولوژیک، گسترش و پیری برگ، توزیع ماده خشک، تشکیل عملکرد و موازنه آب خاک را دارد. مدل SSM-iCrop2، شبیه‌سازی را به صورت روزانه انجام می‌دهد. این مدل مراحل سبز شدن، شروع مؤثر پرشدن دانه، پایان مؤثر پرشدن دانه، شروع پیر شدن برگ و رسیدگی را نیز پیش‌بینی می‌کند (۲۵). بنابراین، پژوهش حاضر با هدف استفاده از مدلی ساده در بررسی اثر عوامل اقلیمی، مدیریت زراعی و ویژگی‌های رشدی گیاه در شبیه‌سازی رشد و عملکرد برنج در شرایط اقلیمی کشور انجام شد تا به‌عنوان ابزاری کارگشا برای مطالعه عوامل مؤثر بر عملکرد به‌کار گرفته شود. پارامتریابی و ارزیابی مدل در مقیاس ملی، امکان مقایسه و سنجش رشد محصول در شرایط محیطی مختلف و دسترسی ناهمگون به منابع و همچنین مدیریت زراعی متنوع در مناطق مختلف را فراهم می‌کند.

برای استفاده از مدل SSM-iCrop2 نیاز به تعیین ضرایب ژنتیکی (پارامتریابی) و ارزیابی مدل است و با توجه به این‌که پارامتریابی و ارزیابی گیاه زراعی برنج در سطح کشوری تاکنون انجام نگرفته است، هدف از این مطالعه، پارامتریابی ارقام برنج برای استفاده از مدل SSM-iCrop2 و ارزیابی این مدل در شرایط اقلیمی ایران بود.

مواد و روش‌ها

ساختار مدل: مدل SSM-iCrop2 در دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان توسط سلطانی و همکاران (۲۰) طراحی و ساخته شده است. در این

به‌دست آورده باشند که در مناطق دیگر قابل استفاده نباشد، یا کارایی قابل‌قبولی نداشته باشند، هر یک از مدل‌های شبیه‌سازی رشد گیاهان نقاط قوت و ضعف‌های خاصی دارد که شناخت آن برای دریافت نتیجه مطلوب از یک مدل شبیه‌سازی بسیار دارای اهمیت است (۱۷ و ۱۸).

در بین مدل‌ها، از مدل‌های ساده که استفاده از آن‌ها و تفسیر نتایج آن‌ها آسان می‌باشد به صورت موفقیت‌آمیزی برای بررسی پتانسیل عملکرد اقلیمی و محدودیت‌های آن استفاده شده است (۸). شبیه‌سازی فنولوژی و تولید ماده خشک در مدل SSM (Simple Simulation Models) به دلیل استفاده از روش‌ها و الگوریتم‌های متفاوت و جدید در ساختار مدل برای بیان گسترش و پیر شدن برگ‌ها و همچنین توزیع ماده خشک، نسبت به سایر مدل‌ها ساده‌تر بوده و نیاز به پارامترهای ورودی کم‌تری دارد (۱۹ و ۲۰). فنولوژی، مطالعه پیشرفت مراحل نموی در ارتباط با عوامل محیطی است و این‌که چگونه این مراحل تحت تاثیر عوامل محیطی قرار می‌گیرند. پیش‌بینی دقیق فنولوژی گیاهان زراعی از ویژگی‌های ضروری مدل‌های شبیه‌سازی گیاهان زراعی به شمار می‌رود. تولید و تسهیم ماده خشک در مدل‌های شبیه‌سازی گیاهان زراعی تا حد زیادی به‌وسیله زمان‌بندی مراحل نمو تنظیم می‌شود (۷). در ایران مطالعه‌های متعددی با استفاده از مدل ساده، به شبیه‌سازی رشد محصولات مختلف پرداخته شده و به نتایج قابل‌قبولی دست یافتند (۱۷، ۲۱ و ۲۲). همچنین مطالعه‌های متعددی بر روی گیاه برنج با استفاده از مدل ORYZA انجام شده که مدل عملکرد دانه را با دقت بالا و خطای پایین پیش‌بینی کرده است (۱۴، ۱۵، ۲۳ و ۲۴).

مدل SSM-iCrop2 برای شبیه‌سازی گیاهان زراعی مختلف تهیه شده است. وجه تمایز مدل

بهره‌وری آب و سطح برگ را پیش‌بینی و از اطلاعات قابل‌دسترس آب و هوا و خاک استفاده می‌کند. در این مدل فرض شده است که از لحاظ عناصر غذایی کمبودی وجود ندارد و آفات، بیماری‌ها و علف‌های هرز نیز به‌طور مؤثر کنترل می‌شوند. مهم‌ترین فرآیندهایی که در مدل باید شبیه‌سازی شوند عبارت است از، فنولوژی گیاه، تغییرات سطح برگ، تولید و توزیع ماده خشک و موازنه آب خاک.

مدل مقدار عملکرد پتانسیل بر مبنای داده‌های هواشناسی، شرایط خاک (عمق ۲۵۰ میلی‌متر)، نحوه مدیریت (مانند آبیاری) و پارامترهای گیاهی محاسبه می‌شود. این مدل با استفاده از ورودی‌های ارائه شده در جدول ۱ می‌تواند محاسبات را از کاشت تا رسیدگی به صورت روزانه انجام دهد و زمان وقوع مراحل مختلف نموی، سرعت رشد روزانه محصول، عملکرد دانه، شاخص برداشت، تبخیر و تعرق،

جدول ۱- پارامترهای ورودی مورد نیاز مدل SSM-iCrop2.

Table 1. Required parameters inputs for running the SSM-iCrop2 model.

پارامتر	واحد
Parameter	Unit
واحد دمایی نرمالیزه شده که در آن رشد عمقی ریشه آغاز می‌گردد Fraction of tuHAR for beginning root growth (frBRG)	-
واحد دمایی نرمالیزه شده که در آن رشد عمقی ریشه متوقف می‌شود Fraction of tuHAR for termination root growth (frTRG)	-
عمق اولیه ریشه در هنگام نشاء یا شروع رشد Initial depth of roots at transplanting or beginning of growth (iDTPORT)	میلی‌متر mm
حداکثر عمق مؤثر استخراج آب از خاک Maximum effective depth of water extraction from soil (MEED)	میلی‌متر mm
ضریب کارایی تعرق Transpiration efficiency coefficient (TEC)	کیلو پاسکال KPa
آستانه FTSW برای رشد FTSW threshold when biomass production starts to decline (WSSG)	-
آستانه FTSW برای نمو سطح برگ FTSW threshold when leaf area development starts to decline (WSSL)	-
مقدار ضریب اصلاح تنش کمبود آب برای سرعت نمو فنولوژیک A coefficient that specifies acceleration or retardation in development in response to water deficit (WSSD)	-
حداکثر دمای روزانه Maximum temperature (TMAX)	درجه سانتی‌گراد °C
حداقل دمای روزانه Minimum temperature (TMIN)	درجه سانتی‌گراد °C
تابش خورشیدی روزانه Solar radiation (SRAD)	مگاژول در مترمربع در روز MJ m ⁻² d ⁻¹
بارندگی روزانه Daily precipitation (RAIN)	میلی‌متر mm
عرض جغرافیایی Latitude	درجه degree
غلظت دی‌اکسیدکربن اتمسفر Atmosphere CO ₂ concentration (CO ₂)	میکرومول بر مول μmol mol ⁻¹
ضریب محاسبه کمبود فشار بخار Vapor pressure deficit calculation coefficient (VPDF)	-
مقدار تغییر دما Temperature change (tchng)	درجه سانتی‌گراد °C

ادامه جدول ۱ -

Continue Table 1.

پارامتر Parameter	واحد Unit
شیب زمین Land slope (SLOPE)	متر در متر m m ⁻¹
ضریب تغییر بارندگی Precipitation coefficient of variation (pchng)	-
عمق خاک Soil depth (SOLDEP)	میلی‌متر mm
آلبیدوی خاک Soil albedo (SALB)	-
عامل زهکشی خاک Soil drainage factor (DRAINF)	-
اطلاعات خاک Soil data عامل زهکشی سطحی Surface drainage factor (SDRAINF)	-
مقدار آب در خاک پس از خروج آب ثقلی Soil water after release of gravitational water (DUL)	میلی‌متر در میلی‌متر mm mm ⁻¹
حداقل مقدار آب در خاک Lowest level of soil water (LL)	میلی‌متر در میلی‌متر mm mm ⁻¹
مقدار آب در خاک در زمان اشباع Soil water at saturation (SAT)	میلی‌متر در میلی‌متر mm mm ⁻¹
مقدار آب قابل دسترس خاک Volumetric soil water content available for extraction by crop roots (EXTR)	میلی‌متر در میلی‌متر mm mm ⁻¹
شماره منحنی خاک Curve number (CN)	-
تاریخ کاشت Planting date (PDOY)	روز day
تاریخ شروع شبیه‌سازی آب خاک Start of soil water simulation date (SimDoy)	روز day
تاریخ شروع به جستجو برای تاریخ کاشت Start of searching for planting date (FPDoy)	روز day
اطلاعات مدیریت زراعی Management operations data طول مدت جستجو برای کاشت Duration of searching for planting (SearchDur)	روز day
سطح آستانه آبیاری Irrigation threshold level (IRGLVL)	-
تاریخ خاتمه دوره رشد گیاه Termination of plant growth date (StopDoy)	روز day
حداکثر ارتفاع آب Minimum water height (mnWH)	میلی‌متر mm
حداقل ارتفاع آب Maximum water height (mxWH)	میلی‌متر mm
اولین آب خاک در شروع شبیه‌سازی Initial soil water at start of simulation (ISW)	میلی‌متر mm

افزایش می‌یابد و در دمایی به نام دمای مطلوب تحتانی، به حداکثر (از صفر به یک) می‌رسد. با افزایش دما نسبت به دمای مطلوب تحتانی تا رسیدن به دمای مطلوب فوقانی، سرعت نمو در حداکثر مقدار خود باقی می‌ماند که به معنی عدم افزایش سرعت نمو با افزایش دما می‌باشد. با افزایش دما نسبت به دمای مطلوب فوقانی، سرعت نمو مجدداً کاهش می‌یابد تا این‌که در دمایی موسوم به دمای سقف و دمای بالاتر از آن، سرعت نمو به صفر می‌رسد (۹).

بر اساس توضیحات ارائه شده مقدار واحد دمایی روزانه با استفاده از رابطه ۲ محاسبه می‌شود:

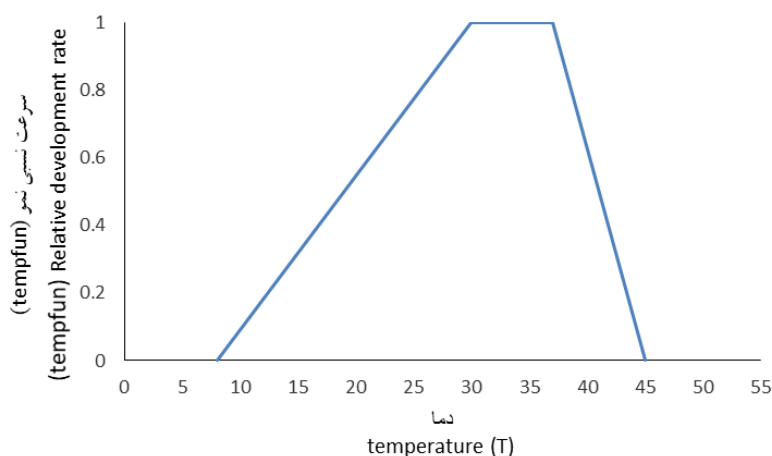
$$DTU = (TP1D - TBD) \times f(T) \quad (1)$$

$$TU = \sum DTU \quad (2)$$

برای گیاه، $f(T)$ سرعت نمو نسبی با توجه به دمای روزانه، TU واحد دمایی تجمعی هستند.

فنولوژی: فنولوژی براساس مفهوم واحد دمایی که برای کمبود آب تعدیل می‌شود، صورت می‌گیرد (۲۶). مدل، مراحل سبز شدن، شروع گلدهی، شروع مؤثر پر شدن دانه‌ها، پایان مؤثر پر شدن دانه‌ها، شروع پیر شدن برگ‌ها و رسیدگی را پیش‌بینی می‌کند. مدل، واکنش سرعت نسبی نمو در گیاه به میانگین دمای روزانه را با استفاده از یک تابع دندان مانند^۱ توصیف می‌کند. بر اساس تابع دندان مانند در یک دمای معین و کم‌تر از آن، سرعت نمو صفر می‌باشد که این دما، دمای پایه نامیده می‌شود، بدین معنی است که گیاه هیچ دمایی که در نمو آن مؤثر باشد، تجربه نمی‌کند. با افزایش دما نسبت به دمای پایه، سرعت نمو نیز

در روابط ۱ و ۲، DTU واحد دمایی روزانه، $TP1D$ دمای مطلوب تحتانی برای گیاه، TBD دمای پایه



شکل ۱- واکنش سرعت نسبی نمو (tempfun) به دما در برنج.

Fig. 1. Relative development rate response (tempfun) to temperature in rice.

محاسبه واحد دمایی روزانه از طریق رابطه ۱ و جمع این اعداد از زمان کاشت با استفاده از رابطه ۲، می‌توان زمان وقوع هر یک از مراحل فنولوژیک گیاه را پیش‌بینی کرد. سپس مرحله نمو نرمالیزه شده (NGS) که یک متغیر بدون بعد است و مقدار آن در کاشت صفر و در رسیدگی برداشت ۱ می‌باشد با استفاده از رابطه ۳ محاسبه می‌شود:

$$NGS = CTU/TTU$$

تغییرات سطح برگ: محاسبه‌های مربوط به سطح برگ با روشی مشابه با مدل EPIC (۲۷) که در مدل SBEET (۲۸) به کار گرفته شده بود، انجام گرفت. در این روش میزان شاخص سطح برگ در هر روز از کاشت تا برداشت از طریق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$LAI = RLAI \times LAIMAX$$

می‌باشد. مقدار RLAI از طریق رابطه‌های زیر به دست می‌آید:

$$RLAI = NGS / (NGS + EXP((a+b) \times NGS))$$

$$RLAI = BSLAI \times ((1-NGS)/(1-BLS))$$

دمایی از کاشت تا برداشت، LAI به ۵ درصد حداکثر خود می‌رسد و (X2, Y2) نشان می‌دهد که LAI با سپری شدن ۵۰ درصد واحد دمایی به ۹۵ درصد حداکثر خود می‌رسد (۹).

در برخی از گیاهان پیر شدن برگ به صورت خطی اتفاق نمی‌افتد. ممکن است پیر شدن بسیار سریع یا به کندی رخ دهد. در زیرمدل SSM-iCrop2 برای حل این مشکل از پارامتری به نام SRATE استفاده

گیاهان برای رسیدن به هر یک از مراحل (سبز شدن، شروع گلدهی، شروع مؤثر پر شدن دانه‌ها، پایان مؤثر پر شدن دانه‌ها، شروع پیر شدن برگ‌ها و رسیدگی) نیاز به مقادیر مشخصی از واحد دمایی تجمعی دارند که این مقادیر به عنوان پارامترهای ورودی زیرمدل SSM-iCrop2 جهت مدل‌سازی مراحل فنولوژیک گیاهان محسوب می‌شوند. با

(۳)

که در آن، TTU واحد دمایی مورد نیاز از کاشت تا رسیدگی برداشت برای رقم‌های زودرس، متوسط‌رس و دیررس به ترتیب (۱۲۰۰، ۱۷۰۰ و ۲۲۰۰ درجه سانتی‌گراد) و CTU^۲ واحد دمایی تجمعی برای مرحله نموی مورد نظر می‌باشد.

(۴)

که در آن، LAI شاخص سطح برگ، LAIMAX حداکثر شاخص سطح برگ و RLAI نسبت LAI موجود به حداکثر LAI قابل حصول توسط محصول

$$\text{اگر } NGS < BLS \quad (۵)$$

$$\text{اگر } NGS \geq BLS$$

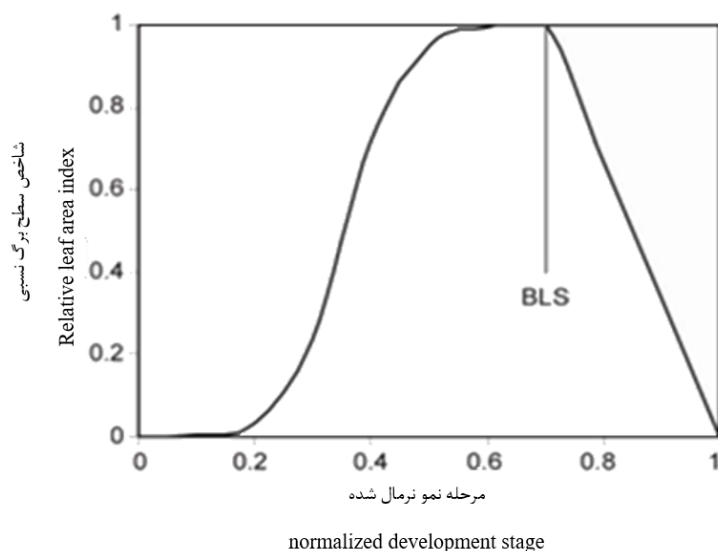
که در آن، BLS مرحله نموی نرمال شده در شروع پر شدن دانه است که در آن حداکثر شاخص سطح برگ (BSGLAI) به دست می‌آید و بعد از آن کاهش LAI شروع می‌شود (شکل ۲). در این مدل مقدار BLS برابر ۰/۹۵ در نظر گرفته شد. a و b ضرایب معادله هستند و با در دست بودن دو نقطه (X1, Y1) و (X2, Y2) و از طریق حل هم‌زمان معادله بالا برای آن دو نقطه به دست می‌آید. مقدار (X1, Y1) به این مفهوم است که پس از طی شدن ۱۵ درصد واحد

1- Total temperature unit

2- Cumulative temperature unit

شد. متغیرهای مربوط به سطح برگ و تخمین آن‌ها در (جدول ۴) نشان داده شده است.

می‌شود. با تغییر مقدار این پارامتر روند پیر شدن نیز تغییر می‌کند و به صورت شکل ۲ در می‌آید. در این مطالعه میزان SRATE برای برنج ۱ در نظر گرفته



شکل ۲- شاخص سطح برگ نسبی (RLAI) در مقابل واحد دمایی نرمالیزه شده یا مرحله نمو نسبی (NDS).

BLS واحد حرارتی برای شروع پیر شدن برگ‌ها را نشان می‌دهد (۹).

Fig. 2. Relative leaf area index (RLAI) versus normalized thermal unit or relative development stage (NDS). BLS shows the thermal unit for the beginning of the leaf senescence (9).

سطح برگ و ضریب خاموشی نور (K برای PAR) براساس قانون بیر- بوگر- لامبرت در مدل محاسبه می‌شود (۲۹). مقدار ماده خشک تولید شده در هر روز (DBP) از حاصل ضرب PAR دریافت شده، کسری از تشعشع رسیده که به وسیله جامعه گیاهی دریافت می‌شود (FINT، بدون واحد) و RUE به دست می‌آید:

$$DBP = PAR \times FINT \times RUE \quad (6)$$

$$PAR = SRAD \times 0.5 \quad (7)$$

کسر تشعشع دریافت شده (FINT) به صورت تابع نمایی از LAI و ضریب استهلاک نور (K_{PAR}) مطابق رابطه زیر به دست می‌آید:

تولید و توزیع ماده خشک: هسته اصلی مدل‌های شبیه‌سازی گیاهی، محاسبه تولید ماده خشک است که در آن انرژی خورشیدی به انرژی نهفته در پیوندهای شیمیایی ماده خشک تولیدی، تبدیل می‌شود. در مدل تولید ماده خشک با روش ساده مبتنی بر کارایی استفاده از تشعشع^۱ (RUE) پیش‌بینی می‌شود. مقدار PAR دریافت شده در هر روز (FINT) از شاخص

مقدار ۰/۵ به عنوان ضریبی برای تبدیل کل تشعشع خورشیدی (SRAD) به تشعشع فعال فتوسنتزی (PAR) در معادله بالا منظور شده است.

1- Radiation use efficiency

$$FINT = 1 - \exp(-K_{PAR} \times LAI) \quad (8)$$

مدل مقدار RUE در هر روز را از RUE در شرایط مطلوب (IRUE) و فاکتور تصحیح RUE برای دما (TCFRUE) محاسبه می‌نماید:

$$RUE = IRUE \times TCFRUE \quad (9)$$

مدل با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود (۹):

$$\begin{aligned} TCFRUE &= 0 & \text{اگر } TMP \leq TBRUE \\ TCFRUE &= (TMP - TBRUE) / (TP1RUE - TBRUE) & \text{اگر } TBRUE < TMP < TP1RUE \\ TCFRUE &= 1 & \text{اگر } TP1RUE \leq TMP \leq TP2RUE \\ TCFRUE &= (TCRUE - TMP) / (TCRUE - TP2RUE) & \text{اگر } TP2RUE < TMP < TCRUE \\ TCFRUE &= 0 & \text{اگر } TMP \geq TCRUE \end{aligned}$$

دانه و تشکیل عملکرد بر مبنای مفهوم افزایش خطی شاخص برداشت شرح داده شده است (۲۵). سرعت رشد واقعی دانه به تولید ماده خشک روزانه و ماده خشک حاصل از انتقال مجدد^۱ (TRANSL) محدود می‌شود. در مدل کل ماده خشک فراهم برای انتقال مجدد (TRLDM) برای رشد دانه از حاصل ضرب کسر ماده خشک تاج پوشش در شروع رشد دانه که قابل انتقال مجدد^۲ می‌باشد (FRTRL) و مقدار ماده خشک تاج پوشش در شروع رشد دانه (BSGDM) به دست می‌آید.

$$TRLDM = BSGDM \times FRTRL \quad (11)$$

خشک تولیدی روزانه (DDMP) به دست می‌آید که همان انتقال مجدد روزانه یعنی TRANSL است.

در این مطالعه مقدار K_{PAR} برابر ۰/۶ تخمین زده شد (۲۵). مقدار LAI در معادله بالا توسط رابطه ۴ به دست می‌آید.

عامل تصحیح RUE برای دما (TCFRUE) در

$$\begin{aligned} & \text{اگر } TMP \leq TBRUE & (10) \\ & \text{اگر } TBRUE < TMP < TP1RUE \\ & \text{اگر } TP1RUE \leq TMP \leq TP2RUE \\ & \text{اگر } TP2RUE < TMP < TCRUE \\ & \text{اگر } TMP \geq TCRUE \end{aligned}$$

مقدار TCFRUE بین صفر تا ۱ تغییر می‌کند و در واقع این فاکتور مقدار RUE در هر دمایی را نسبت به دمای مطلوب نشان می‌دهد. TBRUE، TP1RUE، TP2RUE و TCRUE دماهای کاردینال برای RUE هستند و به ترتیب دمای پایه، دمای مطلوب تحتانی، دمای مطلوب فوقانی و دمای سقف را نشان می‌دهند. مقادیر متغیرهای مربوط به RUE و K_{PAR} در جدول ۷ آورده شده است.

تشکیل عملکرد: رشد دانه با استفاده از یک روش، مشابه روشی که برای مدل سیریوس گندم استفاده شد، محاسبه می‌شود (۳۰). مدل‌سازی سرعت رشد

طی دوره پرشدن دانه، در هر روز که تولید ماده خشک روزانه کم‌تر از نیاز دانه‌ها (یعنی SGR) باشد، این مقدار کمبود، از تفاضل سرعت رشد دانه اصلاح شده برای ماده خشک (SGR/GCC) و مقدار ماده

1- Total Crop Mass at Beginning Seed Growth Which is Translocate able to Grains
2- Fraction Crop Mass at Beginning Seed Growth Which is Translocate able to Grains

$$TRANSL = DTU / (tuTSG - tuBSG) \times TRLDM \quad (12)$$

(شکل ۳). در هر مورد برای انجام شبیه‌سازی، ورودی‌های مورد نیاز مدل جمع‌آوری شدند. به این ترتیب که آمار هواشناسی منطقه مورد نظر در سال‌های انجام آزمایش‌های مزرعه‌ای به صورت یک فایل در اختیار مدل قرار گرفت. ورودی‌های مدیریت زراعی نیز مطابق گزارش آزمایش‌ها وارد گردید. در این مطالعه برای مقایسه انحراف مقادیر شبیه‌سازی شده از مشاهده شده از میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب تغییرات (CV)، ضریب همبستگی (r) و میزان انحراف نتایج شبیه‌سازی شده از خط ۱:۱ با طیفی از اختلاف ۲۰ درصد بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده شده (به وسیله خطوط منقطع تعریف شده) برای آزمون نتایج مدل استفاده شد (۳۱)، براساس رابطه‌های زیر:

$$RMSE(\%) = \sqrt{\left(\frac{\sum(Xi - Yi)^2}{n-1}\right)} \times \frac{100}{\bar{X}} \quad (13)$$

شبیه‌سازی شده است که برای محاسبه RMSE استفاده می‌شوند.

$$CV = \frac{\delta}{\mu} \times 100 \quad (14)$$

برای محاسبه ضریب همبستگی (r) از رابطه زیر استفاده شد:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (Xi - \bar{X})(Yi - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Xi - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Yi - \bar{Y})^2}} \quad (15)$$

n تعداد مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده است.

مقادیر tuTSG و tuBSG برای این پژوهش در جدول فنولوژی نشان داده شده است. پارامتریایی و ارزیابی مدل: برای پارامتریایی و ارزیابی مدل، مقادیر ET، عملکرد و روز تا رسیدگی شبیه‌سازی شده با مشاهده شده مقایسه شدند. برای این منظور از مجموعه‌ای از داده‌های آزمایشی (داده‌های مربوط به رشد و تولید برنج از مقالات و گزارش‌های چاپ شده و چاپ نشده) در مناطق مهم تحت کشت برنج کشور استفاده شد (جدول ۲). براساس آمار وزارت کشاورزی ۱۳۸۰-۱۳۹۵ پنج استان مازندران، گیلان، خوزستان، گلستان و فارس به‌ترتیب با ۳۴، ۲۷، ۹، ۹ و ۸ درصد در مجموع ۸۷ درصد تولید برنج کشور را به خود اختصاص داده و مناطق اصلی کشت و تولید برنج در ایران هستند

که در آن، Xi مقدار اندازه‌گیری شده، Yi مقدار شبیه‌سازی شده و n تعداد مقادیر اندازه‌گیری شده و

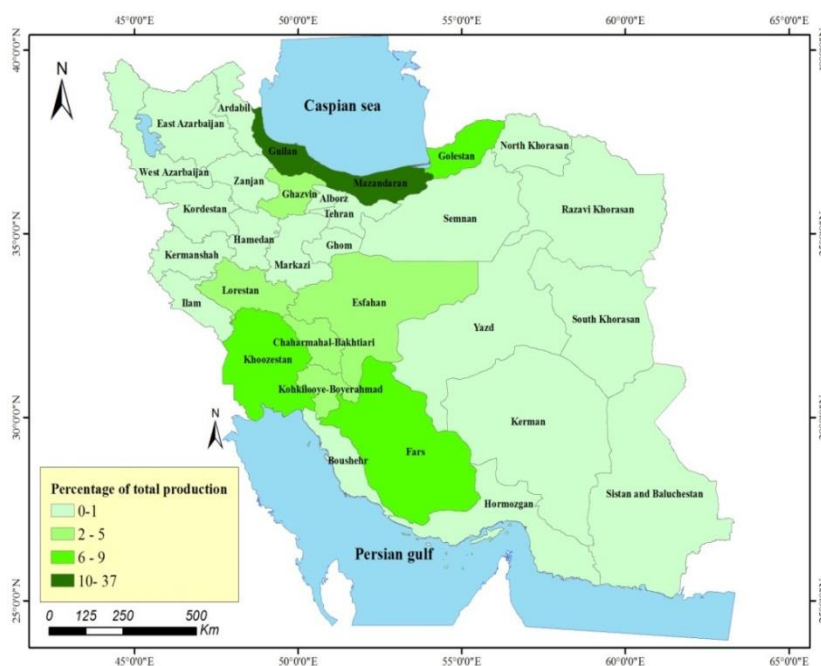
در رابطه ۱۴، CV ضریب تغییرات، δ انحراف معیار و μ میانگین صفت مورد بررسی می‌باشد.

که در آن، Xi مقدار اندازه‌گیری شده، Yi مقدار شبیه‌سازی شده، \bar{X} و \bar{Y} میانگین مقادیر Xi و Yi و

جدول ۲- آزمایش‌های مورد استفاده برای پارامتریابی و ارزیابی مدل SSM-iCrop2 برای برنج در ایران.

Table 2. Experiments used for parameterization and evaluation of SSM-iCrop2 model for Rice.

استان، محل و سال Province, Location and Year	تیمارها Treatments	منابع Reference
Experiments used for parameter estimation		آزمایش‌های مورد استفاده برای پارامتریابی مدل
آمل، مازندران، ۱۳۸۹-۱۳۹۰ Amol, Mazandaran, 2010-2011	علف هرز و علف‌کش Weeding and herbicide	(۳۲) (32)
نکا، مازندران، ۱۳۹۱-۱۳۹۲ Neka, Mazandaran, 2012-2013	ژنوتیپ، سیستم کاشت Genotype, Cropping Systems	(۲۸) (28)
آمل، مازندران، ۱۳۹۱-۱۳۹۲ Amol, Mazandaran, 2012-2013	تاریخ نشاءکاری، میزان کود نیتروژن Transplanting date, nitrogen fertilizer rate	(۳۳) (33)
آمل، مازندران، ۱۳۹۲-۱۳۹۳ Amol, Mazandaran, 2013-2014	تاریخ نشاءکاری Transplanting Date	(۳۴) (34)
شاوور، خوزستان، ۱۳۸۵-۱۳۸۶ Shavour, Khouzeestan, 2006-2007	ژنوتیپ، تاریخ کاشت Genotype, planting date	(۳۵) (35)
خوی، آذربایجان غربی Khui, Azarbaijanganharbi, 2011-2012	روش کاشت Planting method	(۳۶) (36)
Experiments used for model evaluation		آزمایش‌های مورد استفاده برای ارزیابی مدل
آمل، مازندران، ۱۳۸۴-۱۳۸۵ Amol, Mazandaran, 2005-2006	ژنوتیپ Genotype	(۳۷) (37)
رشت، گیلان، ۱۳۸۲-۱۳۸۴ Rasht, Gilan, 2003-2005	ژنوتیپ، آبیاری Genotype, Irrigation	(۳۸) (38)
رشت، گیلان، ۱۳۸۸-۱۳۸۹ Rasht, Gilan, 2009-2010	ژنوتیپ، همزیستی باکتریایی Genotype, Bacteria coexist	(۳۹) (39)
رشت، گیلان، ۱۳۸۷-۱۳۸۵ Rasht, Gilan, 2006-2008	آبیاری، میزان کود نیتروژن Irrigation, nitrogen fertilizer rate	(۴۰) (40)
رشت، گیلان، ۱۳۸۶-۱۳۸۵ Rasht, Gilan, 2006-2007	ژنوتیپ، آبیاری Genotype, Irrigation	(۴۰) (40)
Experiments used for evapotranspiration		آزمایش‌های مورد استفاده برای تبخیر و تعرق
رشت، گیلان، ۱۳۷۳-۱۳۷۵ Rasht, Gilan, 1994-1996	ژنوتیپ، ضرایب محصول Genotype, crop coefficients	(۴۱) (41)
صومعه‌سرا، گیلان، ۱۳۸۹-۱۳۹۰ Soumeesara, Gilan, 2010-2011	ژنوتیپ، ضرایب محصول Genotype, crop coefficients	(۴۲) (42)
رشت، گیلان، ۱۳۹۰-۱۳۹۱ Rasht, Gilan, 2011-2012	ژنوتیپ، ضرایب محصول Genotype, crop coefficients	(۴۳) (43)
آمل، مازندران، ۱۳۹۰ Amol, Mazandaran, 2011	روش‌های اندازه‌گیری تبخیر و تعرق Evapotranspiration measurement methods	(۴۴) (44)



شکل ۳- مناطق اصلی تولید برنج کشور براساس آمار وزارت کشاورزی (۱۳۹۵-۱۳۸۰).

Fig. 3. Major rice production regions of Iran according to the ministry of Agriculture statistical data (2001-2016).

گرفته شده است. پس از مرحله سبز شدن به ازای هر واحد دمایی، به مقداری که جزء پارامترهای گیاهی محسوب می‌شود، بر عمق ریشه افزوده می‌شود. عمق نهایی قابل دسترس برای ریشه می‌تواند بر اساس مرحله فنولوژیک، عمق نفوذ ریشه، عمق خاک و یا موانع فیزیکی و شیمیایی موجود در خاک برای رشد ریشه تعیین شود (۲۶). در مدل SSM-iCrop2 مقدار آب قابل دسترس برای گیاه و کسر آب قابل تعرق روزانه برای گیاه از رابطه‌های ۱۶ تا ۱۹ به دست می‌آید:

موازنه آب خاک در مدل SSM-iCrop2: مقدار آب قابل دسترس برای گیاه تحت تأثیر عمق ریشه و به تبع آن حجم خاکی است که ریشه در طول فصل رشد به آن دسترسی دارد. در مدل SSM-iCrop2 برای انجام محاسبات موازنه آب خاک، خاک به صورت دو لایه در نظر گرفته شده است: یک لایه فوقانی با ضخامت ۲۰۰ میلی‌متر و یک لایه دوم که شامل لایه اول نیز می‌باشد و برابر با عمق مؤثر استخراج آب^۱ است. عمق لایه دوم با شروع رشد ریشه افزایش می‌یابد تا به حداکثر خود برسد. عمق خاک در زمان سبز شدن برابر ۲۰۰ میلی‌متر در نظر

$$ESW_i = ESW_{i-1} + I - ES - TR - D \quad (16)$$

$$ATSW_i = ATSW_i + I + EWAT - ES - TR - D \quad (17)$$

$$FTSW_i = ATSW_i / TTSW \quad (18)$$

$$TTSW = DEPORT \times EXTR \quad (19)$$

1- Effective extraction depth

خشک تأثیر گذارد. در زیر مدل iCrop2 اثر تنش کم‌آبی با محاسبه تعدادی ضریب اصلاحی لحاظ می‌شود. ضرایب اصلاحی به کسر آب قابل دسترس خاک (FTSW) ارتباط داده می‌شوند. آستانه FTSW برای نمو سطح برگ (WSSL) ۰/۶ و آستانه FTSW برای رشد (WSSG) ۰/۶ برای مدل در نظر گرفته شد (۴۵). در مدل فرض می‌شود که تنش آب تأثیری بر زمان تا مراحل مختلف نمو در برنج ندارد. اما این فاکتور در مدل گنجانده شده است تا بتوان در صورت نیاز در مطالعات از آن استفاده کرد. مقدار ضریب اصلاح تنش کمبود آب برای سرعت نمو فنولوژیک (WSSD) در مدل صفر در نظر گرفته شد. هم‌چنین حداکثر عمق مؤثر استخراج آب (MEED) ۲۵۰ میلی‌متر و ضریب کارایی تعرق (TEC) ۵/۸ پاسکال در مدل قرار داده شد (۲۵). این پارامترها در جدول ۳ نشان داده شده‌اند.

در رابطه‌های ۱۶ تا ۱۹، ESW مقدار آب قابل دسترس در لایه اول، ATSW مقدار آب قابل دسترس در لایه دوم، FTSW کسر آب قابل تعرق خاک، I مقدار آب نفوذ کرده به خاک در اثر بارندگی (پس از کسر رواناب) یا آبیاری، ES تبخیر از سطح خاک، TR1 مقدار آب تعرق یافته که از لایه اول جذب شده است، D مقدار زهکشی، EWAT مقدار آبی که در اثر افزایش عمق مؤثر استخراج آب یعنی نفوذ ریشه به لایه‌های زیرین، قابل دسترس شده است، TR مقدار آب تعرق یافته، TTSW کل آب قابل تعرق خاک (بالقوه)، DEPORT عمق مؤثر استخراج آب، EXTR کسر حجمی آب قابل استخراج خاک که برابر ۰/۱۲۷ و ۰/۱۷۲ متر بر متر می‌باشد (۲۵). به جز FTSW که فاقد واحد است، سایر اجزای معادلات دارای واحد میلی‌متر هستند.

تنش کم‌آبی یکی از عواملی است که می‌تواند بر سرعت نمو و به دنبال آن تولید برگ و تجمع ماده

جدول ۳- پارامترهای مربوط به روابط آب خاک در مدل SSM-iCrop2 برای برنج (۹ و ۳۲).

Table 3. Water-Soil relationships Parameters in SSM-iCrop2 model for rice (9 and 32).

پارامتر Parameter	مقدار Value
عمق اولیه ریشه در مرحله سبز شدن Initial depth of roots at emergence (iDEPORT, mm)	200
واحد دمایی برای شروع رشد ریشه Temperature unit for growth of roots start (tuBRG, °C)	0.001
واحد دمایی برای شروع توقف ریشه Temperature unit for growth of roots stop (tuTRG, °C)	0.65
حداکثر عمق مؤثر استخراج آب Effective depth of water extraction from soil (MEED, mm)	250
ضریب کارایی تعرق Transpiration efficiency coefficient (TEC, Pa)	5.8
آستانه FTSW برای رشد FTSW threshold when dry matter production starts to decline (WSSG)	0.6
آستانه FTSW برای نمو سطح برگ FTSW threshold when leaf area development starts to decline (WSSL)	0.6
مقدار ضریب اصلاح تنش کمبود آب برای سرعت نمو فنولوژیک A coefficient that specifies acceleration or retardation in development in response to water deficit (WSSD)	0

FTSW: Fraction transportable soil water

نتایج و بحث

پارامتریابی: با توجه به تنوع ارقام برنج در کشور، نیاز به تعریف ارقام مختلف با پارامترهای متفاوت وجود داشت. در این مطالعه، برای مدل ۶ رقم برنج تعریف گردید که شامل ارقام پرمحصول (دیررس، میان‌رس و زودرس) و کم‌محصول (دیررس، میان‌رس و زودرس) بود. بنابراین، پارامترهای متغیر در این ارقام به صورت محدوده کمینه و بیشینه گزارش می‌شوند.

بر اساس نتایج پارامتریابی، دمای کاردینال برنج شامل دمای پایه برای نمو (TBD)، دمای مطلوب تحتانی برای نمو (TP1D)، دمای مطلوب فوقانی برای نمو (TP2D) و دمای سقف برای نمو (TCD) به ترتیب ۸، ۳۰، ۳۷ و ۴۵ درجه سانتی‌گراد بود (جدول ۵). هم‌چنین واحد دمایی تجمعی برای مراحل مختلف فنولوژیکی از جمله واحد دمایی برای نشاءکاری (tuEMR)، شروع مؤثر پر شدن دانه (tuBSG)، پایان مؤثر پر شدن دانه (tuTSG)، شروع پیر شدن برگ‌ها (tuBLS) و رسیدگی برداشت (tuHAR) برای رقم زودرس ۱/۲، ۷۸۳، ۱۱۴۳، ۷۸۳ و ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد و برای رقم دیررس ۲/۲، ۱۴۳۵، ۲۰۹۵، ۱۴۳۵ و ۲۲۰۰ درجه سانتی‌گراد تخمین زده شد (جدول ۵). نتایج نشان داد مدل، روز تا رسیدگی را برای پارامتریابی با مقادیر RMSE، CV و r به ترتیب ۱۲ روز، ۱۱ درصد و ۰/۶۱ پیش‌بینی کرد (شکل ۴). پژوهش‌گران در مطالعات انجام شده بر روی مدل‌های شبیه‌سازی رشد محصول غالباً به نتایج مثبت و قابل‌قبولی دست یافته‌اند. برای مثال، در شبیه‌سازی مراحل فنولوژیکی برنج در منطقه شمال‌غربی ازبکستان، مدل ORYZA، روز تا رسیدگی برنج را در مرحله پارامتریابی با RMSE و R² به ترتیب برابر با ۳/۳۸ روز و ۰/۹۷ پیش‌بینی کرد (۴۶). در مطالعه دیگری، مراحل فنولوژیکی برنج با استفاده از مدل ORYZA با دقت قابل‌قبولی تخمین زده شد. نتایج این مطالعه نشان داد در مقایسه داده‌های پیش‌بینی شده و مشاهده

شده برای مرحله رسیدگی فنولوژیکی، میزان RMSE و R² به ترتیب ۴ روز و ۰/۹۷ بود (۲۳). در مطالعه‌ای چهار مدل SSM، CropSyst، APSIM و DSSAT را بر روی گندم مقایسه کردند و به این نتیجه رسیدند که SSM در پیش‌بینی رشد، نمو و عملکرد گندم نیرومندتر از مدل‌های دیگر بود. هم‌چنین، تعداد پارامترهای ورودی در مدل SSM (۵۵ پارامتر) در مقایسه با مدل APSIM (۲۹۲ پارامتر) و مدل DSSAT (۲۱۱ پارامتر) بسیار کم‌تر بود. در مدل SSM، برای صفت روز تا رسیدگی گندم، RMSE، CV و r به ترتیب برابر با ۸/۲ روز، ۵/۶ درصد و ۰/۹۶ بود، که نشان‌دهنده دقت قابل‌قبول مدل است.

برای مشخص کردن دقت میزان پراکندگی داده‌های مدل و میزان دقت برآورد داده‌ها از دامنه تغییرات استفاده شد. دامنه تغییرات روز تا رسیدگی برنج در پارامتریابی برای داده‌های مشاهده شده و پیش‌بینی شده به ترتیب بین ۷۴ تا ۱۳۴ و ۶۸ تا ۱۱۸ روز با میانگین ۱۰۵ و ۹۹ روز بود.

در هر منطقه، یک نوع خاک غالب انتخاب شد. واحدهای خاک از واحدهای نقشه انتخابی تا رسیدن به پوشش ۵۰ درصد مساحت برای هر واحد نقشه، پس از حذف آن دسته از خاک‌هایی که احتمالاً برای دوره طولانی مدت تولید سالانه برنج مناسب نیستند یا خاک‌هایی که بخش کوچکی از منطقه برداشت محصول را تشکیل می‌دهند، انتخاب شدند. متغیرهای مورد نیاز خاک برای شبیه‌سازی Yp، شامل عمق مؤثر ریشه خاک و ظرفیت نگهداری آب قابل دسترس گیاه (PASW; in cm³ cm⁻³) است. از این‌رو، داده‌های مشخصات خاک باید خصوصیات "کارکردی" خاک (به عنوان مثال، حد نگهداری آب خاک) یا حداقل داده‌هایی را که می‌توان استخراج کرد (به عنوان مثال، کلاس بافت خاک) داشته باشد. سایر خصوصیات خاک و زمین مانند شیب و زهکشی نیز برای تعیین

وجود ندارد، بنابراین از پایگاه داده HC27 (۳۵) استفاده شد. پایگاه داده خاک HC27 که در مطالعه حاضر استفاده شده دارای وضوح ۱۰ کیلومتری است. جزئیات مربوط به خاک‌های غالب در مناطق تولید برنج ایران در جدول ۴ آورده شده است.

میزان رواناب سطحی مورد نیاز است (۴۷). اطلاعات مورد نیاز خاک شامل شاخص آلدوی خاک، ضریب زهکشی، حجم آب خاک در ظرفیت مزرعه، نقطه پژمردگی و شرایط اشباع بود. در ایران هیچ پایگاه داده محلی دیجیتالی شده برای مدل‌سازی محصولات

جدول ۴- خاک‌های غالب در مناطق تولید برنج در ایران بر اساس انتخاب سطح برداشت IFPRI (۴۸).

Table 4. Dominant soils in rice production area in Iran based on harvest selection IFPRI (48).

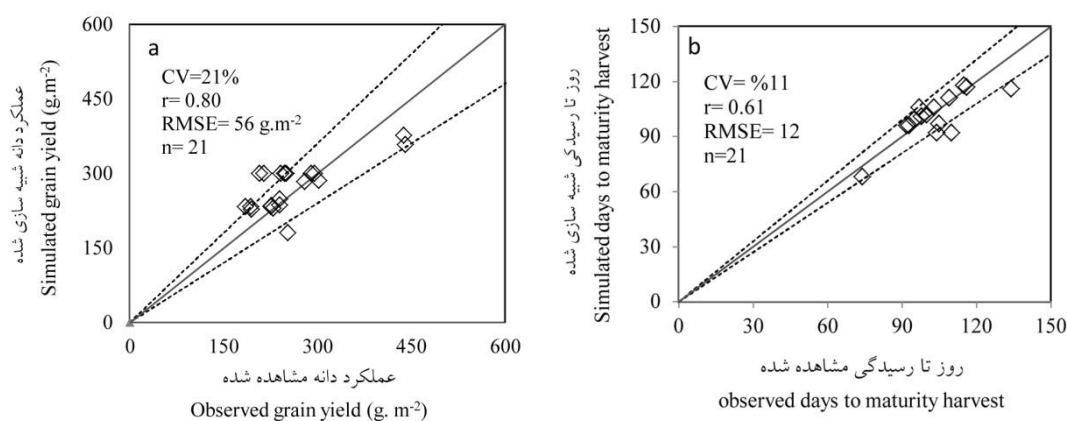
Soil code	Soc	SOLDEP	SALB	CN	DRAINF	SAT	DUL	LL
Silt clay MF 25	0.7-1.2	250	0.11	78	0.03	0.756	0.677	0.517
Silt loam MF 25	0.7-1.2	250	0.12	79	0.03	0.361	0.261	0.110
HC12-Clay HF 25	>1.2	250	0.05	85	0.035	0.458	0.405	0.233
HC15-Clay MF 25	0.7-1.2	250	0.05	85	0.035	0.458	0.405	0.233
HC18-Clay LF 25	0-0.7	250	0.5	85	0.038	0.458	0.405	0.233
HC24-Loam MF 25	0.7-1.2	250	0.1	75	0.035	0.41	0.307	0.180
HC27-Loam LF 25	0-0.7	250	0.1	75	0.035	0.41	0.307	0.180

Soc کربن آلی خاک، SOLDEP عمق خاک، SALB آلدوی خاک، CN شماره خمیدگی، DRAINF فاکتور زهکشی، SAT حجم آب حجمی خاک در اشباع، DUL محتوای حجمی آب خاک در حد بالایی زهکشی، LL محتوای حجمی آب خاک در حد پایین کدهای خاک (انتخاب سطح برداشت IFPRI): ۱۲ = رس، باروری زیاد، عمق ۲۵۰ میلی‌متر؛ ۱۵ = رس، باروری متوسط، عمق ۲۵۰ میلی‌متر؛ ۱۸ = رس، باروری کم، عمق ۲۵۰ میلی‌متر؛ ۲۴ = لوم، باروری متوسط، عمق ۲۵۰ میلی‌متر؛ ۲۷ = لوم، باروری کم، عمق ۲۵۰ میلی‌متر.

جدول ۵- پارامترهای مربوط به فنولوژی در مدل SSM-iCrop2 برای برنج در ایران.

Table 5. Phenology parameters in SSM-iCrop2 model for rice in Iran.

پارامتر Parameter	مقدار Value	منابع References
دمای پایه برای نمو Base temperature for development (TBD, °C)	8	(۲۵) (25)
دمای مطلوب اول برای نمو Lower optimum temperature for development (TP1D, °C)	30	(۲۵) (25)
دمای مطلوب دوم برای نمو Upper optimum temperature for development (TP2D, °C)	37	(۲۵) (25)
دمای سقف برای نمو Ceiling temperature for development (TCD, °C)	45	(۲۵) (25)
واحد دمایی برای برداشت Temperature unit for harvest index (tuHAR, °C)	1200-2200	جدول ۲ Table 2
واحد دمایی برای سبز شدن Temperature unit for emergence (tuEMR, °C)	1.2-2.2	جدول ۲ Table 2
واحد دمایی برای شروع رشد دانه Temperature unit for beginning seed growth occurs (tuBSG, °C)	783-1435	جدول ۲ Table 2
واحد دمایی برای پایان رشد دانه Temperature unit for termination seed growth occurs (tuTSG, °C)	1143-2095	جدول ۲ Table 2
واحد دمایی برای شروع پیر شدن برگ‌ها Temperature unit for maturity that leaves start senescence (tuBLS, °C)	783-1435	جدول ۲ Table 2



شکل ۴- عملکرد دانه (a) و روز تا رسیدگی (b) شبیه‌سازی شده در برابر مشاهده شده برنج با استفاده از مدل SSM-iCrop2 بر اساس داده‌های مورد استفاده در پارامتریابی. خطوط اختلاف $\pm 20\%$ درصد برای عملکرد و $\pm 10\%$ درصد برای روز تا رسیدگی با خطوط منقطع نشان داده شده است. خط ممتد خط ۱:۱ است.

Fig. 4. Grain yield (a) and days to maturity (b) Simulated versus measured rice by SSM-iCrop2 model based on data used in model parameterization. The $\pm 20\%$ for yield and $\pm 10\%$ for days to maturity discrepancy lines are indicated by dashed lines. Solid line is 1:1 line.

دمایی که در کم‌تر از آن برگ‌ها از بین می‌روند (FrzTh) و مقدار سطح برگ مرده به ازای هر درجه سانتی‌گراد کم‌تر از FrzTh (FrzLDR) به ترتیب ۸ درجه سانتی‌گراد و ۰/۰۱ سانتی‌متر مربع بر درجه سانتی‌گراد برآورد شد. آستانه دمایی که در بالاتر از آن تنش گرما باعث تسریع پیر شدن برگ‌ها می‌شود (HeatTh) و میزان تسریع در پیر شدن برگ‌ها در هر درجه سانتی‌گراد بالاتر از HeatTh (HtLDR) به ترتیب ۳۷ درجه سانتی‌گراد و ۰/۱ سانتی‌مترمربع بر درجه سانتی‌گراد به دست آمد (جدول ۶).

پارامترهای مورد نیاز برای گسترش سطح برگ در این زیرمدل شامل واحد دمایی از نشاء تا ۵ درصد حداکثر شاخص سطح برگ (x_1)، شاخص سطح برگ نسبی در مرحله سبز شدن (y_1)، واحد دمایی از نشاء تا ۹۵ درصد حداکثر شاخص سطح برگ (x_2)، شاخص سطح برگ نسبی در مرحله شروع مؤثر پیر شدن دانه (y_2) به ترتیب ۰/۰۱، ۰/۱۵، ۰/۷۰ و ۰/۹۵ برآورد شدند. همچنین حد کمینه و بیشینه پارامتر حداکثر شاخص سطح برگ (LAIMX) برابر با ۲-۳ و ضریب پیر شدن برگ (SRATE) ۱ محاسبه گردید. پارامترهای شبیه‌سازی پیری برگ برای آستانه

جدول ۶- پارامترهای مربوط به تغییرات شاخص سطح برگ در مدل SSM-iCrop2 برای برنج در ایران.

Table 6. Parameters related to the changes in leaf area in SSM-iCrop2 model for rice in Iran.

پارامتر Parameter	مقدار Value	منابع References
واحد دمایی از کاشت تا ۵ درصد حداکثر شاخص سطح برگ Temperature unit from sowing to 5% of maximum LAI (x1)	0.01	جدول ۲ Table 2
شاخص سطح برگ نسبی در زمان سبز شدن Relative LAI at emergence (y1)	0.15	جدول ۲ Table 2
واحد دمایی از کاشت تا ۹۵ درصد حداکثر شاخص سطح برگ Temperature unit from sowing to 95% of maximum LAI (x2)	0.70	جدول ۲ Table 2
شاخص سطح برگ نسبی در شروع رشد دانه Relative LAI at beginning seed growth occurs (y2)	0.95	جدول ۲ Table 2
حداکثر شاخص سطح برگ Maximum leaf area index (LAIMX)	2-3	جدول ۲ Table 2
ضریب سرعت پیری برگ Leaf senescence rate coefficient (SRATE)	1	جدول ۲ Table 2
دمای پایین / آستانه انجماد برای مرگ برگ Low temperature/freezing threshold for leaf death (°C) FrzTh	8	(۹) (۹)
میزان مرگ برگ در هر درجه سانتی‌گراد زیر FrzTh Leaf death rate per °C below FrzTh (cm ² °C ⁻¹) FrzLDR	0.01	(۹) (۹)
آستانه دمایی گرما برای مرگ برگ Heat threshold temperature for leaf death (°C) HeatTH	37	(۹) (۹)
میزان مرگ برگ در هر درجه سانتی‌گراد بالاتر از HeatTh death rate per °C above HeatTh (cm ² °C ⁻¹) HtLDR	0.1	(۹) (۹)

(شکل ۴). مقایسه مقادیر عملکرد دانه پیش‌بینی شده با استفاده از مدل SSM-iCrop2 با مقادیر مشاهده شده در مزارع آزمایشی در مرحله پارامتریابی و ارزیابی، صحت داده‌ها و پارامترها و دقت و کارایی قابل قبول مدل در تخمین عملکرد برنج در مقیاس ملی را نشان می‌دهد که با توجه به شکل ۴، همه داده‌های عملکرد در دامنه ۲۰ درصد بالا و پایین خط ۱:۱ قرار گرفته‌اند. دامنه تغییرات عملکرد دانه برنج در پارامتریابی برای داده‌های مشاهده شده و پیش‌بینی شده به ترتیب بین ۱۸۴ تا ۴۸۶ و ۱۸۱ تا ۶۰۸ گرم در مترمربع، به ترتیب با میانگین ۲۶۹ و ۲۸۹ گرم در مترمربع بود (شکل ۴). هم‌چنین، نزدیک بودن دامنه تغییرات و پراکندگی داده‌های عملکرد پیش‌بینی شده

پارامترهای مربوط به دمای کاردینال برای تولید ماده خشک شامل دمای پایه برای تولید ماده خشک (TBRUE)، دمای مطلوب تحتانی برای تولید ماده خشک (TP1RUE)، دمای مطلوب فوقانی برای تولید ماده خشک (TP2RUE) و دمای سقف برای تولید ماده خشک (TCRUE) به ترتیب ۵، ۱۵، ۳۵ و ۵۰ درجه سانتی‌گراد حاصل شد. هم‌چنین مقدار ضریب خاموشی (KPAR) ۰/۶ و مقدار کارایی استفاده از تشعشع در شرایط مطلوب رشد (IRUE) ۲/۲ گرم در مگاژول به دست آمد (جدول ۵). نتایج نشان داد مدل، صفت عملکرد دانه را به‌طور قابل‌قبولی برای پارامتریابی با مقادیر RMSE، CV و r به ترتیب ۵۶ گرم در مترمربع، ۲۱ درصد و ۰/۸۰ پیش‌بینی کرد

مربعات خطا و ضریب تبیین وزن خشک کل در شرایط پارامتریابی، نشان‌دهنده صحت پارامترهای شبیه‌سازی شده با استفاده از مدل ORYZA است. RMSE وزن خشک کل ۵۸۰ کیلوگرم بر هکتار و R^2 ۰/۹۷ محاسبه گردید (۳۷).

ارقام برنج در ایران از نظر عملکرد تنوع بالایی دارند، با این وجود شبیه‌سازی رشد و عملکرد ارقام مختلف برنج با استفاده از مدل SSM-iCrop2 با پارامتر واحد دما از کاشت تا برداشت (جدول ۵)، پارامتر LAIMX (جدول ۶) و پارامتر HImax (جدول ۷) انجام شد و ارقام کم‌محصول و پرمحصول از یکدیگر تفکیک شدند. بنابراین مدل توانست با تعداد پارامترهای ورودی محدود، عملکرد و روز تا رسیدگی برنج در ایران را با دقت بالایی شبیه‌سازی کند.

و مشاهده شده برنج به یکدیگر نیز این موضوع را تأیید می‌کند.

کارایی قابل‌قبول مدل‌های شبیه‌سازی رشد و عملکرد محصول در سایر مطالعات نیز مشهود است. در یک مطالعه، در مرحله پارامتریابی گیاه برنج با استفاده از مدل ORYZA، مقادیر R^2 ، RMSE و CV به ترتیب ۱۷۵ کیلوگرم در هکتار، ۰/۸۳ و ۳ درصد بود (۴۹). در پیش‌بینی عملکرد برنج در مؤسسه تحقیقات برنج کشور در رشت، در پارامتریابی مدل ORYZA، مقادیر R^2 و RMSE به ترتیب ۴۶۴ کیلوگرم در هکتار و ۰/۶۷ گزارش شد (۱۴). در مقایسه بین مقادیر عملکرد دانه پیش‌بینی شده به مشاهده شده برنج در مرحله پارامتریابی در مؤسسه تحقیقات برنج کشور با استفاده از مدل ORYZA، RMSE برابر با ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار و R^2 برابر با ۰/۷۱ به دست آمد (۱۵). مقادیر ریشه میانگین

جدول ۷- پارامترهای تولید ماده خشک و تشکیل عملکرد در مدل SSM-iCrop2 برای برنج در ایران.

Table 7. parameters of dry matter production and yield formation in SSM-iCrop2 model for rice in Iran.

پارامتر Parameter	مقدار Value	منابع References
دمای پایه برای تولید ماده خشک Base temperature for dry matter production (TBRUE, °C)	5	(۲۵) (25)
حداقل دمای مطلوب برای تولید ماده خشک Lower optimum temperature for dry matter production (TP1RUE, °C)	15	(۲۵) (25)
حداکثر دمای مطلوب برای تولید ماده خشک Upper optimum temperature for dry matter production (TP2RUE, °C)	35	(۲۵) (25)
دمای سقف برای تولید ماده خشک Ceiling temperature for dry matter production (TCRUE, °C)	50	(۲۵) (25)
ضریب خاموشی برای PAR Extinction coefficient for PAR (KPAR)	0.60	(۲۵) (25)
کارایی استفاده از تشعشع تحت شرایط مطلوب رشد Radiation use efficiency under optimal growth conditions (IRUE, g MJ ⁻¹)	2.2	(۲۵) (25)
حداکثر شاخص برداشت/ شیب افزایش خطی شاخص برداشت The slope of linear increase in harvest index/maximum harvest index (HImax, g g ⁻¹ d ⁻¹)	0.25-0.50	جدول ۲ Table 3

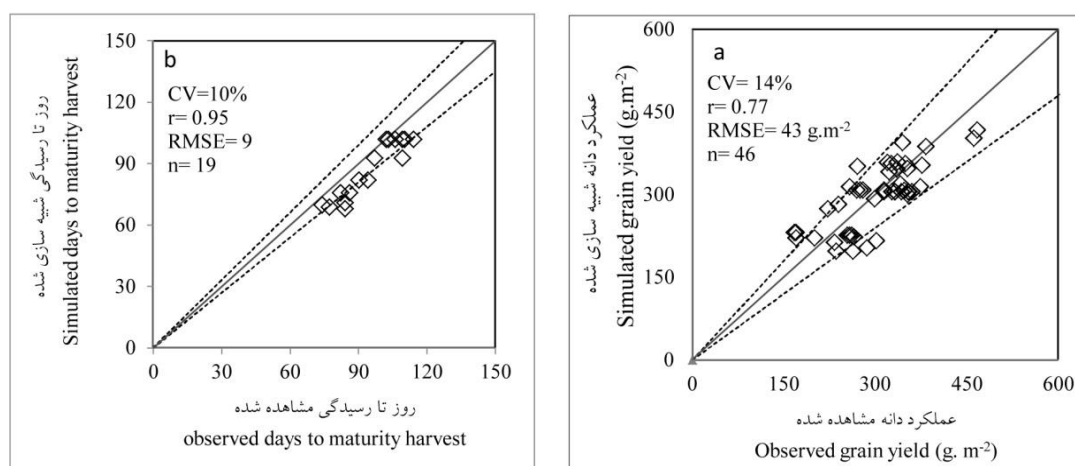
گیاهان گرمادوست غیرحساس به طول روز، مراحل نمو به‌طور عمده به وسیله دما کنترل می‌شوند (۹). برنج یک گیاه زراعی گرمادوست و حساس به طول روز است، بنابراین، مراحل نمو آن عمدتاً تحت تأثیر فتوپریود و دما است. علاوه بر نقش مهم مراحل نمو در مدیریت مزرعه، تعیین زمان دقیق این مراحل برای شبیه‌سازی رشد اندام‌های گیاهی و در نهایت عملکرد دانه نیز دارای اهمیت است، چون میزان تسهیم مواد فتوسنتزی بین اندام‌های رویشی و زایشی گیاه متناسب با مراحل نمو گیاه انجام می‌گیرد (۹). مقادیر CV ، $RMSE$ و r در ارزیابی مدل برای عملکرد دانه به‌ترتیب ۴۳ گرم در مترمربع، ۱۴ درصد و ۰/۷۷ پیش‌بینی شد (شکل ۵). هم‌چنین دامنه تغییرات عملکرد دانه در ارزیابی برای داده‌های مشاهده شده و پیش‌بینی شده به ترتیب بین ۱۶۷ تا ۴۶۷ و ۱۹۷ تا ۴۱۸ گرم در مترمربع، به ترتیب با میانگین ۳۰۵ و ۲۹۸ گرم در مترمربع بود. نتایج ارزیابی مدل $ORYZA$ برای عملکرد دانه برنج، با مقادیر $RMSE$ ، R^2 و CV به‌ترتیب ۱۶۷ کیلوگرم در هکتار، ۰/۹۸ و ۲ درصد رضایت‌بخش گزارش شده است (۳۶). پیش‌بینی عملکرد دانه برنج در مؤسسه تحقیقات برنج کشور در ارزیابی مدل $ORYZA$ با مقادیر $RMSE$ و R^2 به‌ترتیب ۱۵۵ کیلوگرم در هکتار و ۰/۹۶ قابل‌قبول گزارش و کارایی مدل تأیید شد (۱۴). نسبت بین مقادیر عملکرد دانه پیش‌بینی شده با استفاده از مدل $ORYZA$ به مقادیر مشاهده شده عملکرد برنج در مرحله ارزیابی، با $RMSE$ برابر با ۱۸۲ کیلوگرم در هکتار و R^2 برابر با ۰/۶۳ برآورد شد (۱۵). در یک مطالعه، مقادیر $RMSE$ و R^2 به ترتیب ۵۳۲-۸۷۱ کیلوگرم بر هکتار و ۰/۹۴-۰/۹۸ در ارزیابی مدل $ORYZA$ ، دقت و کارایی مطلوب مدل در شبیه‌سازی وزن خشک کل برنج را تأیید نمود (۵۰). با توجه به

ارزیابی مدل: با توجه به نتایج ارزیابی با استفاده از داده‌های مستقل از آزمایش‌های مورد استفاده در پارامتریابی، مقادیر $RMSE$ ، CV و r برای روز تا رسیدگی به ترتیب ۹ روز، ۱۰ درصد و ۰/۹۵ برآورد شد (شکل ۵). هم‌چنین، دامنه تغییرات روز تا رسیدگی در ارزیابی برای داده‌های مشاهده شده و پیش‌بینی شده به ترتیب بین ۷۴ تا ۱۱۴ و ۶۸ تا ۱۰۲ روز با میانگین ۹۶ و ۸۸ روز بود. در منطقه شمال غربی ازبکستان نسبت بین مقادیر روز تا رسیدگی پیش‌بینی شده به مقادیر مشاهده شده برنج در ارزیابی مدل $ORYZA$ ، مقادیر $RMSE$ برابر با ۲/۵۳ روز و R^2 برابر با ۰/۹۷، دقت بالایی مدل را نشان داد (۳۳).

با توجه به شکل‌های ۴ و ۵، بیش‌تر داده‌های روز تا رسیدگی در دامنه ۱۰ درصد بالا و پایین خط ۱:۱ قرار گرفته‌اند که این نشان‌دهنده کارایی خوب مدل $SSM-iCrop2$ و برآورد صحیح و دقیق پارامترهای مدل برنج می‌باشد. در مدل‌های شبیه‌سازی گیاهان زراعی پیش‌بینی دقیق مراحل نمو فنولوژیک گیاه از اهمیت بالایی برخوردار است، زیرا در این مدل‌ها تولید و تخصیص ماده خشک به‌طور عمده از طریق مراحل فنولوژیک تنظیم می‌شوند به همین دلیل، پیش‌بینی آن نسبت به پیش‌بینی تغییرات سایر فرآیندها نسبتاً مشکل‌تر است، زیرا تفاوت بین گونه‌ها و ارقام زیاد است، انواع واکنش‌های متفاوت وجود دارد و اطلاعات کمی زیادی وجود ندارد (۸). به‌علاوه، پیش‌بینی دقیق رشد گیاه نیاز به پیش‌بینی دقیق نمو فنولوژیک دارد. مراحل نمو فنولوژیک در گیاهان زراعی تحت تأثیر دما، فتوپریود و بهاره‌سازی قرار می‌گیرند (۵۰). در گیاهان زراعی سرمادوست مانند گندم و کلزا مراحل نمو گیاه تحت تأثیر هر سه عامل قرار می‌گیرند و در گیاهان گرمادوست مراحل نمو به‌طور عمده تحت تأثیر دما و فتوپریود می‌باشند. اما در

مراحل رشد و نمو و عملکرد برنج و سایر گیاهان زراعی در مقیاس‌های وسیع نشان می‌دهد، استفاده از مدل‌ها به دلیل عملکرد مطلوب و قابل اعتماد، در آینده نزدیک در جهت توسعه کشاورزی پایدار و بهبود تولید و تامین امنیت غذایی، گامی مؤثر و مهم است (۵۱).

شکل‌های ۴ و ۵، بیش‌تر نقاط در دامنه ۲۰ درصد بالا و پایین خط ۱:۱ قرار گرفته‌اند که این نشان‌دهنده کارایی خوب مدل در پیش‌بینی عملکرد برنج می‌باشد. بر این اساس، نتایج حاصل از شبیه‌سازی عملکرد با استفاده از مدل SSM-iCrop2 رضایت‌بخش بود. مطالعات متعدد بر روی کاربرد مدل‌ها در بررسی

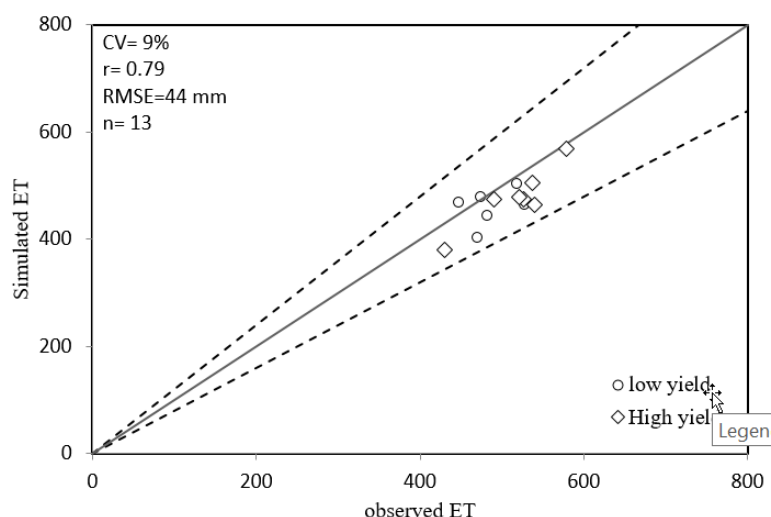


شکل ۵- عملکرد دانه (a) و روز تا رسیدگی (b) شبیه‌سازی شده در برابر مشاهده شده برنج با استفاده از مدل SSM-iCrop2 بر اساس داده‌های مورد استفاده در ارزیابی مدل. خطوط اختلاف $\pm 20\%$ درصد برای عملکرد و $\pm 10\%$ درصد برای روز تا رسیدگی با خطوط منقطع نشان داده شده است. خط ممتد خط ۱:۱ است.

Fig. 5. Grain yield (a) and days to maturity (b) Simulated versus measured rice by SSM-iCrop2 model based on data used in model evaluation. The $\pm 20\%$ for yield and $\pm 10\%$ for days to maturity discrepancy lines are indicated by dashed lines. Solid line is 1:1 line.

SSM-iCrop2 تبخیر و تعرق گیاه زراعی برنج را برای مناطق مهم تولیدکننده این گیاه در ایران با دقت بالایی پیش‌بینی می‌کند. این مدل مقدار ET گیاهان زراعی دانه‌ای و غیردانه‌ای مهم ایران را به‌خوبی شبیه‌سازی کرد (۵۲).

مقدار RMSE، r و CV برای مقایسه بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده شده ET به‌ترتیب برابر با ۴۴ میلی‌متر، ۰/۷۹ و ۹ درصد بود. بر اساس نتایج، بیش‌تر نقاط در دامنه ۲۰ درصد بالا و پایین خط ۱:۱ قرار دارند (شکل ۶). این نتایج نشان داد مدل



شکل ۶- تبخیر و تعرق مشاهده شده در برابر شبیه‌سازی شده با استفاده از مدل SSM-iCrop2 در مناطق مهم تولیدکننده برنج در ایران. خطوط اختلاف $\pm 20\%$ درصد با خطوط منقطع نشان داده شده است. خط ممتد خط ۱:۱ است.

Fig. 6. Observed VS simulated evapotranspiration (ET) using SSM-iCrop2 model in major rice production regions in Iran. The $\pm 20\%$ discrepancy lines are indicated by dashed lines. Solid line is 1:1 line.

نتیجه‌گیری

نتایج ارزیابی مدل SSM-iCrop2 که با استفاده از شاخص‌های جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب همبستگی (r) و ضریب تغییرات (CV) انجام گرفت، نشان داد که این مدل ET، مراحل فنولوژیکی (روز تا رسیدگی) و عملکرد دانه را در تاریخ کاشت‌های مختلف در شرایط اقلیمی ایران با دقت زیادی شبیه‌سازی می‌کند که نشان‌دهنده ساختار مناسب مدل در شبیه‌سازی است. بنابراین با توجه به نتایج به‌دست آمده می‌توان از مدل SSM-iCrop2 در پیش‌بینی رشد و عملکرد برنج در شرایط پتانسیل بهره‌برد. این مدل می‌تواند در مطالعات شبیه‌سازی عملکرد برنج و محدودیت‌های آن در واکنش به شرایط محیط زیستی، ورودی‌های مدیریتی و عوامل ژنتیکی در شرایط کشور ایران استفاده شود.

نتایج پارامتریابی و ارزیابی مدل نشان داد مدل SSM-iCrop2 پارامترهای گیاه زراعی برنج را برای کل کشور با دقت بالایی برآورد نمود. کم‌تر بودن مقدار جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب تغییرات (CV) و نیز بالاتر بودن مقدار ضریب همبستگی (R^2) نشان‌دهنده بالاتر بودن کارایی مدل می‌باشد. بنابراین، مقایسه مقادیر روز تا رسیدگی و عملکرد دانه پیش‌بینی شده با استفاده از مدل با مقادیر مشاهده شده در مزارع آزمایشی در مرحله پارامتریابی و ارزیابی در شکل‌های ۴ و ۵، صحت داده‌ها و پارامترها و دقت و کارایی قابل قبول مدل در تخمین مراحل فنولوژیک و عملکرد دانه برنج در مقیاس ملی را نشان می‌دهد. هم‌چنین، نزدیک بودن دامنه تغییرات و پراکندگی داده‌های روز تا رسیدگی و عملکرد دانه پیش‌بینی شده و مشاهده شده برنج به یکدیگر نیز تأییدکننده این امر است (۵۳).

منابع

1. Barari Tari, D., Gazanchian, A., Pirdashti, H.A. and Nasiri, M. 2009. Flag leaf morphophysiological response to different agronomic treatments in promising line of rice (*Oryza sativa* L.), American-Eurasian J. Agric. Env. Sci. 5: 3. 403-408.
2. FAO. 2019. <http://statistics.amis-outlook.org/data/index.html>.
3. Chakravarthi, B. and Naravaneni, R. 2006. SSR marker-based DNA fingerprinting and diversity study in rice (*Oryza sativa* L.). Afr. J. Biotechnol. 5: 684-688.
4. Ministry of Agriculture Statistics. 2016. Agricultural Statistics Bulletin Volume I. Ministry of Agriculture Jihad, Deputy of Planning and Economics, Bureau of Statistics and Information Technology.
5. Tilman, D., Balzer, C., Hill, J. and Befort, B.L. 2011. Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 108: 50. 20260-20264.
6. Liu, S.L., Pu, C., Ren, Y.X., Zhao, X.L., Zhao, X. and Chen, F. 2016. Yield variation of double-rice in response to climate change in Southern China. Eur. J. Agron. 81: 161-168.
7. Sinclair, T.R. and Seligman, G. 1996. Crop modeling: from infancy to maturity. J. Agron. 88: 5. 698-704.
8. Soltani, A., Hammer, G.L., Torabi, B., Robertson, M.J. and Zeinali, E. 2006. Modeling chickpea growth and development: Phenological development. Field Crop Res. 99: 1-13.
9. Soltani, A. 2009. Mathematical modelling in crops. JDM Press. 175p. (In Persian)
10. Bouman, B.A.M. and van Laar, H.H. 2006. Description and evaluation of the rice growth model ORYZA2000 under nitrogen-limited conditions. Agric. Syst. 87: 249-273.
11. Chen, Y., Wang, P., Zhang, Z., Tao, F. and Wei, X. 2017. Rice yield development and the shrinking yield gaps in China, 1981-2008. Reg. Environ. Change. 17: 2397-2408.
12. Feng, L.P., Bouman, B.A.M., Tuong, T.P., Cabangon, R.J., Li, Y.L., Lu, G.A. and Feng, Y.H. 2007. Exploring options to grow rice using less water in northern China using a modelling approach. I. Field experiments and model evaluation. Agric. Water Manage. 88: 1-13.
13. Timsina, J. and Humphreys, E. 2006. Performance of CERES-rice and CERES-wheat models in rice-wheat systems: a review. Agric. Syst. 90: 5-31.
14. Amiri, E., Razavipour, T. and Bannayan Awal, M. 2011. Evaluation of yield and water productivity in rice under irrigation management and plant density with use ORYZA2000 model. J. Crop Prod. 4: 3. 1-19.
15. Amiri, E., Rezaei, M. and Bannayan Aval, M. 2011. Evaluation of the rice growth model ORYZA2000 under nitrogen and water limited conditions (Calibration and Validation). J. Water Soil. 5: 4. 757-769.
16. Rezaei, M., Amiri, E. and Motamed, M.K. 2011. Effects of irrigation interval and nitrogen fertilizer on yield and water productivity of rice (Hashemi cultivar) in Guilan. J. Agron. 93: 57-67.
17. Bagheri, V. and Torabi, B. 2015. A simple model for simulation of growth, development and yield of faba bean in Golestan province. Hajizadeh, H. 2005. SBEET: A simple model to simulate growth and yield of sugar beet. J. Agric. Sci. Technol. 19: 11-26.
18. Sinclair, T., Farias, J., Neumaier, N. and Nepomuceno, A. 2003. Modeling nitrogen accumulation and use by soybean. Field Crop Res. 81: 149-158.
19. Soltani, A., Maddah, V. and Sinclair, T.R. 2013. SSM-Wheat: a simulation model for wheat development, growth and yield. Int. J. Plant Prod. 7: 711-740.
20. Soltani, A. and Sinclair, T.R. 2015. A comparison of four wheat models with respect to robustness and transparency: Simulation in a temperate, sub-humid environment. Field Crop Res. J. Crop Prod. 8: 2. 133-152.
21. Dadrasi, A., Torabi, B. and Ghasemi Maham, S. 2018. Modeling growth and yield of safflower in Isfahan. J. Plant Ecophysiol. 10: 32. 161-176.

22. Dadrasi, A., Torabi, B., Rahimi, A., Soltani, A. and Zeinali, E. 2020. Parameterization and evaluation of a simple simulation model (SSM-iCrop2) for potato (*Solanum tuberosum* L.) growth and yield in Iran. *Potato Res.* pp. 1-19.
23. Torabi, B. and Soltani, A. 2013. A simple model for predicting grain yield of maize single cross 704 hybrid. *J. Crop Prod. Proc.* 3: 7. 47-59.
24. Amiri Larijani, B., Tahmasebi Sarvetani, Z., Nematzadeh, G., Amiri, E. and Esfahani, M. 2011. Simulation of phenological development and growth duration of three rice cultivars at different seedling ages using ORYZA2000 model. *Iranian J. Crop Sci.* 13: 3. 466-480.
25. Amiri, E. and Rezaei, R. 2009. Testing the modelling capability of ORYZA2000 under water-nitrogen limit conditions in northern Iran. *World Appl. Sci. J.* 6: 8. 1113-1122. (In Persian)
26. Soltani, A. and Sinclair, T.R. 2012. Modeling physiology of crop development, growth and yield. CABI Publishing, Wallingford, UK.
27. Soltani, A. and Sinclair, T.R. 2011. A simple model for chickpea development, growth and yield. *Field Crops Res.* 124: 252-260.
28. Williams, J.R., Jones, C.A., Kiniry, J.R. and Spanel, D.A. 1989. The EPIC crop growth model. *Trans ASAE.* 32: 497-510.
29. Dastan, S., Noormohamadi, Gh., Madani, H., Ebrahimi, M. and Yasari, E. 2016. Investigation of growth and phenology of main crop and ratoon of rice cultivars in different cropping systems. *Plant Prod. Technol.* 16: 1. 81-101. (In Persian)
30. Sinclair, T.R. 2006. A reminder of the limitations in using Beer's law to estimate daily radiation interception by vegetation. *Crop Sci.* 46: 2343-2347.
31. Jamieson, P.D., Semenov, M.A., Brooking, I.R. and Francis, G.S. 1998. Sirius: a mechanistic model of wheat response to environmental variation. *Eur. J. Agron.* 8: 161-179.
32. Soltani, A. and Hoogenboom, G. 2007. Assessing crop management options with crop simulation models based on generated weather data. *Field Crop Res.* 103: 198-207.
33. Mahzari, S., Baghestani, M.A., Shirani Rad, A.H., Nasiri, M. and Omrani, M. 2012. Investigation of mechanical and chemical weeds management on rice agronomical traits. *J. Agroecol.* 2: 2. 100-116. (In Persian)
34. Akbari, R. and Moumeni, A. 2015. Study of optimum transplanting date and nitrogen application in a double-cropping system of rice (*Oryza sativa* L.) for 'Kuhsaar' Cultivar in Mazandaran. *J. Crop Prod.* 8: 2. 195-207. (In Persian)
35. Esmaeilzadeh, M., Niknejad, Y., Fallah Amoli, H. and Kheyri, N. 2016. Determination of Optimum Transplanting Date for Double Cropping of Rice (*Oryza sativa* L. CV. Tarom Mahalli) in Mazandaran. *J. Crop Ecophysiol.* 4: 40. 991-1006. (In Persian)
36. Limochi, K., Siadat, S.A. and Gilani, A. 2013. Effect of planting time on the flag leaf anatomy and grain yield of rice genotypes in Khuzestan province. *Iran J. Crop Sci.* 15: 2. 136-151. (In Persian)
37. Akbarlou, R. 2013. Effect of potassium and planting method on yield and some agronomical traits of local variety of round-grain rice in Khoy. *J. Res. Crop Sci.* 5: 19. 1-14. (In Persian)
38. Bakhshipour, S., Gazanchian, A., Mohaddesi, A., Rahimsouroush, H. and Nasiri, M. 2012. Genotypic and phenotypic correlations between grain yield and some agronomic traits in promising rice lines. *J. Agron.* 97: 82-90.
39. Saadati, Z., Pirmoradian, N., Amiri, E. and Rezaei, M. 2012. Assessment of WOFOST model in simulating yields of two rice varieties under different irrigation regimes. *J. Water Res. Agric.* 26: 3. 323-338.
40. Amin Deldar, Z. and Ehteshami, M.R. 2012. The effects of different strains of *Pseudomonas* on uptake efficiency, yield and yield components of rice. *Plant Proc. Func.* 1: 2. 73-88.

41. Modaberi, H. 2010. Determination of evapotranspiration and vegetative factor of two common varieties of rice in the dashtemordab (gilan). Master's thesis for irrigation-drainage. School of Agriculture. University of Tarbiat Modares.
42. Pirmoradian, N., Zekri, F., Rezaei, M. and Abdollahi, V. 2013. Derivation of crop coefficients of three rice varieties based on ET estimation method in Rasht region. *J. Cereal Res.* 3: 2. 95-106. (In Persian)
43. Zare Abianeh, H., Nouri, H., Liaghat, A.M., Nouri, H. and Karimi, V.A. 2011. Comparison of Penman-Monteith FAO Method and a Class Pan Evaporation with Lysimeter Measurements in Estimation of Rice Evapotranspiration in Amol Region. *J. Phys. Geogr. Res. Q.* 43: 76. 71-83. (In Persian)
44. Poor Yazdankhah, H., Razavipoor, T., Khaledian, M.R. and Rezaie, M. 2014. Determining crop coefficient of Binam and Khazar cultivars of rice by lysimeter and controlled basins in Rasht region. *J. Agroecol.* 6: 2. 238-249. (In Persian)
45. Rezaei, M., Motamed, M.K., Yousefi, A. and Amiri, E. 2010. Evaluation of Different Irrigation Management on Rice Yield. *J. Water Soil.* 24: 3. 565-573.
46. Amir, J. and Sinclair, T.R. 1991. A model of water limitation on spring wheat growth and yield. *Field Crops Res.* 28: 1-2. 59-69.
47. Devkota, K.P., Manschadi, A.M., Devkota, M., Lamers, J.P.A., Ruzibaev, E., Egamberdiev, O., Amiri, E. and Vlek, P.L.G. 2013. Simulating the impact of climate change on rice phenology and grain yield in irrigated drylands of central Asia. *J. Appl. Meteor. Climatol.* 52: 2033-2050.
48. Grassini, P., van Bussel, L.G.J., Van Wart, J., Wolf, J., Claessens, L., Yanga, H., et al. 2015. How good is good enough? Data requirements for reliable crop yield simulations and yield-gap analysis. *Field Crops Res.* 177: 49-63.
49. Koo, J. and Dimes, J. 2013. HC27 Generic Soil Profile Database. <http://hdl.handle.net/1902.1/20299>, Harvard Data verse, V4.
50. Yuan, Sh., Peng, Sh. and Tao, Li. 2017. Evaluation and application of the ORYZA rice model under different crop. Managements with high-yielding rice cultivars in central China. *Field Crop Res.* 212: 115-125.
51. Amiri, E. 2009. Simulation of rice growth and development under irrigation constraint conditions. *J. Biol. Sci.* 1: 4. 1-13. (In Persian)
52. Streck, N.A., Weiss, A., Xue, Q. and Baenziger, P.S. 2003. Improving predictions of developmental stages in winter wheat: a modified Wang and Engel model. *Agric. Meteorol.* 115: 139-150.
53. Soltani, A., Alimagham, S., Nehbandani, A., Torabi, B., Zeinali, E., Dadrasi, A., et al. 2020. SSM-iCrop2: A simple model for diverse crop species over large areas. *Agric. Syst.* 182: 102855.

