

Application of SSM-iCrop2 Model for Yield and Water Balance Simulation under Grower Field Conditions

Safora JafarNodeh, Afshin Soltani*, Elias Soltani, Amir Dadrasi, Samaneh Rahban

Afshin.soltani@gmail.com*

Introduction

Accurate knowledge of water balance components is necessary to optimize water consumption in agriculture. On the other hand, measuring water balance components is expensive and difficult. Therefore, the use of models that can simulate water balance values is important for water management in agriculture and water used by plants. Crop simulation models have been turned into essential tools for studying plant production systems. In models SSM-iCrop2, it is presumed that diseases and weeds are optimally managed and will not affect growth and yield. Also, except for the cases in which the model covers the effect of certain nutrients such as nitrogen, in most cases it is presumed that nutrient deficiency is eliminated due to fertilizing. Therefore, parameterized and evaluated models are fit for these conditions. These factors are present in the field and affect crop growth and yield as well as water use. However, in several cases it is required to estimate yield and water balance components and irrigation water volume under grower conditions. Naturally, models parameterized using experiments are unable to simulate these conditions. Therefore, a model must be prepared that can simulate the real conditions of farmers. In this study, the SSM-iCrop2 model has been calibrated for the real conditions of farmers, and the purpose of this study is to use the SSM-iCrop2 model in simulating water performance and water balance for farmers.

Materials and Methods

In this study, the SSM-iCrop2 model was calibrated for grower s using variables such as yield and harvest index, which are available for grower fields or are cheap to measure. The effect of factors such as pests and diseases, weeds and unsuitable nutrients, density and sowing date entered the model along with the calibration of three parameters of radiation use efficiency, maximum leaf area and maximum harvest index for grower fields. Calibration was done by comparing the performance of farmers against the performance simulated by the model and by changing the parameters of radiation use efficiency (IRUE), maximum leaf area (LAIMX) and maximum harvest index (HIMAX). This calibration was done at Hashem Abad station in Gorgan for irrigated rice (paddy) and wheat. The simulated actual yield was calibrated with the actual yield. Due to the acceptable simulation of actual yields after calibration, it was presumed that other estimates made by the model are also reliable.

Results and Discussion

Measurement of water balance and other estimates of the model from growth and yield formation in the grower fields is expensive, but the calibrated model can estimate them at a low cost. In this study, it was shown that with the model calibrated for farmers' conditions, other information (such as the volume of irrigation water) that cannot be easily measured can be obtained, with the assumption that the model accurately captures this information as well as performance. It is considered acceptable. To evaluate the simulated real performance model, it was compared with the model against the real performance of farmers (Agricultural Jihad Report) after calibration. In addition to phenology, the SSM model simulates traits related to growth and yield, evapotranspiration values, irrigation water volume, runoff, available soil water during planting and harvesting, cumulative drainage, etc. The output of the model shows the user what amount of irrigation water is needed for a certain amount of performance in a certain place (certain rainfall and transpiration). The results of the irrigation water volume calculated by the model have been compared with the results of the field tests of the previous studies of the researchers of agricultural research centers and it was found that the output results of the model and the observed values are in good agreement. The root mean square error for rice and wheat was 216.6 and 157.6 kg per hectare, respectively, and the coefficient of variation and correlation coefficient were 4 and 85% for rice and 3 and 94% for wheat, respectively. Then, the irrigation water volume estimated by the model was evaluated and validated with the measured irrigation water volume in different crops (in Golestan province and different years). Based on the results of the evaluation, the coefficient of variation and the correlation coefficient for the simulated

irrigation water volume were equal to 8.9 and 98% compared with the observed value. Another part of this study shows the daily simulation and the application of the model in this field. This calibration was done for rice (paddy) and irrigated wheat in the fields of Gorgan township, and the simulation and running were done using the meteorological statistics recorded in Hashem Abad weather station, Gorgan. Noting the fact that the actual yield has been simulated with good accuracy after the calibration, it was assumed that the other estimates of the model are also reliable. Thus, the calibrated model estimates them with low cost and appropriate accuracy and can complement field experiments.

Conclusions

In this study, it was found that the SSM_iCrop2 model, which is calibrated for the conditions of farmers' fields, in addition to simulating traits related to growth and yield, can estimate traits related to water balance with appropriate accuracy. One of the most important estimates of the model is the irrigation water volume under grower conditions which is critical for agricultural planning and adaptation to drought.

Keywords: Evapotranspiration, Index leaf area, Modeling, Water productivity, Water footprint.

مجله دانش کشاورزی

کاربرد مدل SSM-iCrop2 در شبیه‌سازی عملکرد و بیلان آب برای شرایط مزارع

کشاورزان

صفورا جعفرنوده، افشین سلطانی، الیاس سلطانی، امیر دادرسی، سمانه رهبان

چکیده

اطلاع از اجزای بیلان آب و حجم آب کاربردی برای بهینه‌سازی مصرف آب در کشاورزی ضروری است از طرفی اندازه‌گیری آن‌ها پرهزینه و مشکل است. بنابراین استفاده از مدل‌هایی که بتواند مولفه‌های بیلان آب و حجم آب کاربردی را شبیه‌سازی کند برای مدیریت آب در کشاورزی اهمیت دارد. مدل SSM-iCrop2 در سال‌های اخیر در مطالعات متعدد استفاده شده است. در این مدل مشابه آزمایش‌ها، فرض می‌شود آفات، بیماری‌ها و علف‌های هرز و نیز عناصر غذایی در مزرعه به نحو مطلوب مدیریت شده و تأثیری بر رشد و عملکرد ندارند. در حالی که در مزارع کشاورزان این عوامل وجود دارند و بر رشد و عملکرد گیاه و نیز مصرف آب اثر می‌گذارند. از سوی دیگر در موارد متعددی به برآورد عملکرد و مؤلفه‌های بیلان آب و حجم آب آبیاری در شرایط کشاورزان نیاز وجود دارد که طبیعتاً مدل‌های پارامتریابی شده با آزمایش‌ها قادر به شبیه‌سازی آن‌ها نیستند. در این مطالعه با استفاده از متغیرهایی مانند عملکرد و شاخص برداشت که برای مزارع کشاورزان موجود هستند یا با هزینه کم قابل اندازه‌گیری هستند مدل SSM-iCrop2 برای شرایط کشاورزان کالیبره شد. تاثیر عواملی نظیر آفات و بیماری‌ها، علف‌های هرز و تغذیه، تراکم و تاریخ کاشت نامناسب با کالیبراسیون سه پارامتر کارایی استفاده از تشعشع، حداکثر سطح برگ و حداکثر شاخص برداشت برای مزارع کشاورزان در مدل وارد شد. ابتدا خروجی مدل (میانگین ۱۵ ساله، در شهرستان‌های استان گلستان) با استفاده از داده‌های عملکرد واقعی (میانگین چند ساله در شهرستان‌های مختلف استان گلستان) کالیبره و ارزیابی شد. جذرمیانگین مربعات خطا برای برنج و گندم آبی به ترتیب ۲۱۶/۶ و ۱۵۷/۶ کیلوگرم در هکتار و ضریب تغییرات و ضریب همبستگی برای برنج به ترتیب ۴ و ۸۵ درصد و برای گندم ۳ و ۹۴ درصد بود. سپس حجم آب آبیاری برآورد شده مدل با حجم آب آبیاری اندازه‌گیری شده در محصولات مختلف (در استان گلستان و در سال‌های مختلف) ارزیابی و صحت‌سنجی شد. بر اساس نتایج ارزیابی ضریب تغییرات و ضریب همبستگی برای حجم آب آبیاری شبیه‌سازی شده در مقایسه با مشاهده شده برابر با ۸/۹ و ۹۸ درصد به دست آمد. بخش دیگر این مطالعه شبیه‌سازی روزانه و کاربرد مدل در این زمینه نشان داده شده است. این کالیبراسیون برای برنج (شلتوک) و گندم آبی در مزارع شهرستان گرگان انجام شد و شبیه‌سازی و اجرای با استفاده از آمار هواشناسی ثبت شده در ایستگاه هواشناسی هاشم‌آباد گرگان صورت پذیرفت. با توجه به این که پس از کالیبراسیون عملکردهای واقعی با دقت خوبی شبیه‌سازی شده است فرض شد سایر برآوردهای مدل نیز قابل اعتماد هستند. بدین ترتیب، مدل کالیبره شده با هزینه کم و دقت مناسب آن‌ها را برآورد می‌کند و می‌تواند تکمیل‌کننده آزمایش‌های مزرعه‌ای باشد. یکی از مهم‌ترین

برآوردهای مدل حجم آب آبیاری در شرایط کشاورزان است که برای برنامه‌ریزی‌های کشاورزی و سازگاری به کم‌آبی حیاتی می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: بهره‌وری آب، تبخیر-تعرق، ردپای آب آبی، شاخص سطح برگ، مدل‌سازی.

مقدمه

مدل‌های متعددی مانند WOFOST (Diepen et al., 1989)، EPIC (Williams et al., 1989)، OZCOT (Hearn, 1994)، DSSAT (Jones et al., 2013)، AquaCrop (Raes et al., 2009)، SSM (Soltani et al., 2013) و CropSyst (Stockle et al., 2003 Van Evert et al., 1994)؛ DSSAT (IBSNAT, 1993) و APSIM (McCown et al., 1996) برای شبیه‌سازی رشد محصولات زراعی وجود دارد. از مدل‌های شبیه‌سازی گیاهان زراعی جهت بررسی وضعیت مدیریت، اثرات متقابل شرایط محیطی، بهره‌وری آب، تغییر اقلیم، خلأ عملکرد، تحلیل‌های مرتبط با رشد و عملکرد گیاهان مختلف استفاده می‌شود (Torabi, et al., 2020). در این رابطه می‌توان به شبیه‌سازی گندم در خاورمیانه (Schoppach et al., 2017)، ذرت در ایالات متحده (Messina et al., 2015)، سویا در ایالات متحده (Sinclair et al., 2010)، عدس در شمال آفریقا (Ghanem et al., 2015) و جنوب آسیا (Guiguitant et al., 2017) اشاره نمود.

در اغلب مطالعات برآورد مدل‌ها برای شرایطی مشابه آزمایش‌ها انجام می‌شود با این فرض که عواملی مانند آفات و بیماری‌ها، تغذیه، علف‌های هرز وجود نداشته و یا تأثیر قابل توجهی بر عملکرد ندارند. این مدل‌ها قادر به شبیه‌سازی مزارع کشاورزان (شرایط واقعی) نیستند زیرا در مزارع کشاورزان وجود عواملی مانند آفات بیماری‌ها، تغذیه نامناسب، مدیریت زراعی نامطلوب منجر به کاهش عملکرد می‌شود. بنابراین برای تعیین عملکرد واقعی در شرایط کشاورزان لازم است شرایط واقعی مزارع در مدل‌ها لحاظ شود. برای مثال، در یک تلاش گروهی سعی شده است تأثیر بیماری‌ها با مدل‌های شبیه‌سازی بررسی شود. برای این منظور مکانیسم‌های آسیب مرتبط با چهار بیماری اصلی گندم (زنگ قهوه‌ای و زرد، لکه سپتوریایی و سفیدک پودری) را با استفاده از پنج مدل شبیه‌سازی (SSM-HERMES، DSSAT-Nwheat، WHEATPEST، WHEAT و WOFOST_GT) مورد بررسی قرار دادند و با توجه به شدت بیماری و تأثیر آن بر شاخص سطح برگ، کاهش نسبی عملکرد گندم را برآورد کردند (Bregaglio et al., 2021). از مدل‌های حاصله می‌توان برای مطالعات بیش‌تر مثلاً تأثیر بیماری‌ها در شرایط تغییر اقلیم آینده استفاده نمود.

مدل‌های SSM قبلاً برای سه سطح تولید پتانسیل، آب محدود و نیتروژن محدود ایجاد و استفاده شده‌اند (Soltani and Sinclair, 2012; Soltani et al., 2013; Soltani et al., 2018; Soltani et al., 2019; Soltani et al., 2020a). مدل SSM با وجود نیاز به تعداد کم‌تر پارامترهای ورودی از دقت خوبی برخوردار است (Soltani and Sinclair, 2015). همچنین از مدل شبیه‌سازی SSM-iCrop به صورت گسترده در مطالعات با موضوعات گوناگون

از جمله فیزیولوژی محصول و اندام‌های گیاهی، ارزیابی مدیریتی و انتخاب ژنوتیپ‌ها در بهبود عملکرد محصول (Vadez)؛ [Sinclair et al., 2020](#)؛ [Soltani and Sinclair, 2011](#)؛ [et al., 2017](#)) شبیه‌سازی رشد و عملکرد عدس ([Ghanem et al., 2015](#)) ارزیابی دقت مدل در برآورد عملکرد گندم ([Wolfgang Fuchs, 2021](#))، پارامتریابی و ارزیابی محصولات ذرت، سیب زمینی، چغندر قند ([Manschadi et al., 2019](#)) پیش‌بینی پویایی نیتروژن ([Manschadi et al., 2022](#)) استفاده شده است.

این مدل در مطالعات داخلی و خارجی برای شبیه‌سازی در شرایط پتانسیل ارزیابی و پارامتریابی شده است. در یک بررسی برای شبیه‌سازی عملکرد پنبه از مدل SSM استفاده شد ([Kamari et al., 2019](#)) در مطالعه ایشان مقدار RMSE برای عملکرد پنبه برابر با ۷۷/۶ گرم در مترمربع و حدود ۱۳ درصد میانگین عملکرد بود. در مطالعه ایشان ضریب همبستگی شبیه‌سازی شده و گزارش شده برابر با ۰/۷۲ بود. طی یک مطالعه ([Rahban et al., 2021](#)) با استفاده از مدل SSM_iCrop2 فنولوژی، عملکرد و بهره‌وری آب کلزای آبی را پیش‌بینی کردند. ایشان با توجه به مقادیر آماره‌های مربوطه (R^2 , RMSE, CV) کارایی مدل در شبیه‌سازی رشد و عملکرد کلزای آبی را رضایت‌بخش دانستند. در مطالعه ایشان مقادیر ضریب تبیین، ضریب تغییرات و جذر میانگین مربعات خطا برای عملکرد دانه کلزا به ترتیب ۰/۸۷، ۱۸ درصد و ۶۷ گرم در مترمربع گزارش شد.

Ghanem و همکاران ([Ghanem et al., 2015](#)) با استفاده از مدل SSM-Legumes به شبیه‌سازی رشد و عملکرد عدس در خاورمیانه (سوریه و لبنان) با ویژگی آب و هوایی رطوبت کم، درجه حرارت بالا و سرمای زمستانه در ارتفاعات و نوسانات شدید بارندگی، پرداختند. مدل عملکرد عدس را با دقت خوبی برآورد کرد به طوری که مقادیر R^2 , RMSE و CV شبیه‌سازی عملکرد عدس به ترتیب برابر با ۰/۶۷، درصد، ۳۰۸/۳۶ کیلوگرم در هکتار و ۱۴/۲۸ درصد، بود.

مدل شبیه‌سازی SSM-iCrop برای پیش‌بینی پویایی و رشد و نیتروژن ارقام زمستانه گندم (*Triticum aestivum*) در بخشی از منطقه اتریش با شرایط آب و هوایی معتدل ارزیابی مورد قرار گرفت. اطلاعات دقیق گیاه و خاک (داده‌های واقعی) از سه آزمایش مزرعه‌ای با ۴ رقم گندم جمع‌آوری شد. دوره زمانی شبیه‌سازی شده ویژگی‌های محصول در طول فصل رشد، مطابقت خوبی با داده‌های مشاهده‌شده نشان داد. مقادیر CV و RMSE برای ماده خشک به ترتیب ۵/۹ درصد و ۱۱۵/۶ گرم در مترمربع و برای عملکرد دانه ۱/۹ درصد و ۶۰/۵ گرم در مترمربع بود. نتایج مطالعه ایشان دقت مدل را در پیش‌بینی رشد، پویایی نیتروژن و عملکرد گندم را در تأیید کرد. ایشان معتقدند ساختار نسبتاً ساده و درجه شفافیت بالا، مدل SSM-iCrop را برای ادغام در ابزارهای کشاورزی هوشمند برای بهبود تصمیم‌گیری زراعی در تولید محصول مناسب می‌کند ([Manschadi et al., 2022](#)).

در مطالعه‌ی دیگر پارامترهای گیاهی و ارزیابی عملکرد علوفه یونجه با استفاده از مدل SSM-iCrop2 در مناطق عمده تولید آن در ایران بررسی شد. ارزیابی مدل بر اساس داده‌های آزمایشی مستقل از مرحله پارامتریابی انجام شد. مجموع عملکرد علوفه سالانه مشاهده شده بین ۶۴۶ تا ۴۰۴۲ با میانگین ۱۷۱۷ گرم در مترمربع و نیاز آبی یونجه حاصل

از برنامه NETWAT بین ۵۱۴۰ تا ۱۲۶۹۰ با میانگین ۸۷۴۶ مترمکعب در هکتار بود. عملکرد شبیه‌سازی شده و نیاز آبی یونجه به ترتیب بین ۶۹۳ تا ۳۲۹۶ با میانگین ۱۶۵۴ گرم در مترمربع و ۴۰۹۳ تا ۱۶۸۷۴ با میانگین ۱۰۹۴۰ مترمکعب در هکتار برآورد شد. نتایج ارزیابی مطالعه ایشان نشان داد، ضریب همبستگی (r)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب تغییرات (CV) برای عملکرد تک چین شبیه‌سازی شده در مقایسه با مشاهده شده به ترتیب ۰/۷۹، ۸۸/۳ و ۲۶/۷۸ در مترمربع و ۲۶/۷۸ درصد، برای عملکرد علوفه سالانه به ترتیب ۰/۹۰، ۳۴۴/۴ گرم در مترمربع، ۲۰/۰۵ درصد و برای نیاز آبی یونجه به ترتیب ۰/۴۳، ۳۵۰۳ مترمکعب در هکتار و ۴۰ درصد به دست آمد (Pourshirazi et al., 2023).

در مطالعه حاضر مدل SSM-iCrop2 برای شرایط مزارع کشاورزان با داده‌های واقعی عملکرد (گزارش جهاد کشاورزی) کالیبره می‌شود. این کالیبراسیون برای محصولات برنج تازه (شلتوک) و گندم آبی (گیاهان مهم استان گلستان) انجام می‌گردد. هدف کاربردی این است مدل کالیبره شده برای برآورد عملکرد و دیگر متغیرها مثل مؤلفه‌های بیلان آب، بهره‌وری و غیره در شرایط مزارع کشاورزان مورد استفاده قرار گیرد. به‌ویژه، برآورد حجم آب آبیاری و بهره‌وری آب آبیاری در شرایط کشاورزان از اهمیت زیادی برخوردار است.

روش‌ها

ساختار مدل SSM-iCrop2 به گونه‌ای است که توانایی شبیه‌سازی مراحل فنولوژی، گسترش و پیری برگ، توزیع ماده خشک، عملکرد را دارد. واکنش گیاه به عوامل محیطی و مدیریت زراعی در مدل قابل اجرا بوده به طوری که شبیه‌سازی به صورت روزانه و با استفاده از اطلاعات آب و هوا و خاک و پارامترهای گیاهی انجام می‌شود (Soltani and Sinclair; 2011).

تشکیل عملکرد مدل با توجه به کل ماده خشک تولید شده در دوره پرشدن دانه و تیز ماده خشک تخصیص یافته به دانه شبیه‌سازی می‌شود. مدل‌سازی سرعت رشد دانه و تشکیل عملکرد بر مبنای مفهوم افزایش خطی شاخص برداشت انجام می‌شود (Soltani and Sinclair; 2011). مدل توانایی شبیه‌سازی نمو فنولوژیک، گسترش و پیری برگ، تجمع و توزیع ماده خشک، تشکیل عملکرد، مؤلفه‌های موازنه آب خاک (مانند تبخیر و تعرق گیاه؛ میزان بارندگی، آب آبیاری، رواناب، زه‌کشی) را دارد. مدل شبیه‌سازی را به صورت روزانه انجام می‌دهد. نحوه استفاده از مدل در سایت <https://sites.google.com/view/ssm-crop-models> وجود است.

داده‌های ورودی مدل شامل اطلاعات هواشناسی (حداکثر دمای روزانه، حداقل دمای روزانه، تشعشع خورشیدی، بارندگی روزانه)؛ مدیریت‌های زراعی؛ اطلاعات خاک (عمق خاک، زه‌کشی، حد ظرفیت زراعی و غیره) و پارامترهای گیاهی می‌باشند (جدول ۱). پارامترهای گیاهان گونه‌ها و ارقام (بیش از ۵۰ گیاه زراعی و باغی دیم و آبی) در سایت www.SSM-crop-models.net موجود است. اگر چه مدل SSM-iCrop2 به ۳۷ پارامتر نیاز دارد اما، تعداد واقعی مربوط به پارامترها تقریباً نیمی از تعداد کل است (بین ۱۵ تا ۲۰ بسته به گونه‌های گیاهی) زیرا بسیاری از پارامترها به هم مرتبط هستند و برخی پارامترها برای برخی از گونه‌ها مهم نیستند پارامترهای گیاهی (برای محصولات برنج و گندم

آبی) بر اساس مطالعات قبلی استفاده شده است (Soltani et al., 2020b؛ Karamat et al., 2021). در این مطالعه شبیه‌سازی برنج برای رقمی دیررس با عملکرد متوسط و گندم رقمی مشابه تجن صورت می‌گیرد. مدل SSM-iCrop2 قبلاً برای شبیه‌سازی تبخیر-تعرق / آب آبیاری و عملکرد گیاهان برنج (Karamat et al., 2021) و گندم آبی (Zand et al., 2019) در شرایط کشور پارامتریابی و ارزیابی شده است (شکل پیوست).

جدول ۱. پارامترهای ورودی مورد نیاز مدل SSM-iCrop2
Table 1. Required parameters inputs for running the SSM-iCrop2 model

پارامتر Parameter	واحد 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 موثر 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 متر مربع 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
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
آلبدوی خاک Soil albedo (SALB)	-
عامل زهکشی خاک Soil drainage factor (DRAINF)	-

	عامل زهکشی سطحی	-
	Surface drainage factor (SDRAINF)	
	مقدار آب در خاک پس از خروج آب ثقی	میلی متر در میلی متر
	Soil water after release of gravitational water (DUL)	mm mm ⁻¹
	حداقل مقدار آب در خاک	میلی متر در میلی متر
	Lowest level of soil water (LL)	mm mm ⁻¹
	مقدار آب در زمان اشباع	میلی متر در میلی متر
	Soil water at saturation (SAT)	mm mm ⁻¹
	مقدار آب قابل دسترس خاک	میلی متر در میلی متر
	Volumetric soil water content available for extraction by crop roots (EXTR)	mm mm ⁻¹
	شماره منحنی خاک	-
	Curve number (CN)	
	تاریخ کاشت	روز
	Planting date (PDOY)	day
	تاریخ شروع شبیه سازی آب خاک	روز
	Start of soil water simulation date (SimDoy)	day
	تاریخ شروع به جستجو برای تاریخ کاشت	روز
	Start of searching for planting date (FPDoy)	day
	طول مدت جستجو برای کاشت	روز
	Duration of searching for planting (SearchDur)	day
اطلاعات مدیریت زراعی management operations data	سطح آستانه آبیاری	-
	Irrigation threshold level (IRGLVL)	
	تاریخی که باید گیاه برداشت شده باشد تا آماده سازی زمین برای کشت بعدی امکان پذیر باشد	روز
	Termination of plant growth date (StopDoy)	day
	حداکثر ارتفاع آب	میلی متر
	Minimum water height (mnWH)	mm
	حداقل ارتفاع آب	میلی متر
	Maximum water height (mxWH)	mm
	اولین آب خاک در شروع شبیه سازی	میلی متر
	Initial soil water at start of simulation (ISW)	Mm

مبنای کار مطالعه حاضر، بر اساس مطالعات قبلی (Soltani et al., 2018; Soltani et al., 2019; Soltani et al., 2020a; Soltani et al., 2020b) انجام شده است. در مطالعه ایشان برای پارامتریابی مدل از مقالات متعدد، گزارشات و پایان نامه های دانشجویی و تحقیقاتی محلی استفاده شده است (در مجموع بیش از ۳۰۰ مطالعه) و سپس پارامتریابی برای ۳۲ گیاه اصلی کشاورزی ایران انجام شد (Soltani et al., 2019; Soltani et al., 2020b). مدل SSM-iCrop2 نسخه ساده شده SSM است که برای شبیه سازی تعداد زیادی از گونه های گیاهی در سطح وسیع مناسب است (Soltani et al., 2013). این مدل دارای کد باز بوده و از صفحه گسترده اکسل برای ورودی و خروجی داده ها استفاده می کند، به همین علت کار با آن آسان است. در مطالعه اخیر Soltani و همکاران (Soltani et al., 2020a) مدل SSM-iCrop2 برای بیش از ۳۰ گونه گیاهی (۱۸ گیاه زراعی، ۵ صیفی جات و ۱۳ محصول باغی) پارامتریابی و ارزیابی شده است. نتایج آزمون کارایی مدل برای عملکرد، آب خالص آبیاری، تبخیر تعرق از دقت خوبی برخوردار بود (Soltani et al., 2020b). به طوری که میانگین مربع خطا به عنوان درصدی از میانگین عملکرد مشاهده شده برای محصولات زراعی دانه ای ۱۸ درصد، برای محصولات زراعی غیردانه ای ۱۴ درصد، برای سبزیجات ۱۴ درصد و برای درختان میوه ۲۸ درصد بود. از این مدل برای مطالعات خلأ عملکرد و برآورد پتانسیل محصولات مختلف استفاده شده است که از این بین می توان به محصول پنبه (Kemari et al., 2020)؛ سبب زمینی (Dadrasi et al., 2020)؛ یونجه

(Pourshirazi et al., 2023) گندم (Zand et al., 2019) باقلا (Torabi et al., 2020 Bagheri and Torabi, 2015)؛ سویا (Akbari and Soltani, 2017 Rassam and Soltani, 2007; Nehbandani et al., 2015;)، نخود و عدس دیم (Arabameri et al., 2020) اشاره نمود. این پارامتریابی و ارزیابی برای شرایط آزمایش‌های کشاورزی برای شرایط آبی و دیم با فرض عدم محدودیت عناصر غذایی، آفات، بیماری‌ها و علف‌های هرز صورت گرفته است.

پارامترهای گیاهی متعددی برای شبیه‌سازی در مدل وجود دارد اما با توجه به ماهیت مدل و فیزیولوژی تأثیر این عوامل بر رشد و عملکرد گیاهان، فرض شد این عوامل از طریق کاهش سه پارامتر موجب کاهش رشد و عملکرد گیاهان می‌شوند. این سه پارامتر عبارتند از:

- (۱) حداکثر شاخص سطح برگ قابل دستیابی در شرایط مطلوب رشد LAIMX
- (۲) کارایی استفاده از تشعشع فعال فتوسنتزی و تبدیل آن به ماده خشک IRUE
- (۳) حداکثر شاخص برداشت در شرایط مطلوب رشد HImax

فرض شد اعمال تغییرات در این سه پارامتر، برای کالیبراسیون مدل کافی باشد. بنابراین فقط با استفاده از تغییر دادن این سه پارامتر عملکرد واقعی محصولات برنج و گندم آبی شبیه‌سازی شد. این پارامترها تا حدی تغییر داده شد که خروجی مدل به آمار عملکرد واقعی کشاورزان نزدیک شود. در به‌کارگیری مدل کالیبره شده فرض می‌گردد چون عملکرد واقعی کشاورزان (گزارش و مشاهده شده) با عملکرد واقعی شبیه‌سازی توسط مدل به هم نزدیک هستند، سایر خروجی‌های مدل از جمله تخمین آب مصرفی، میزان تبخیر تعرق، ماده خشک و فنولوژی نیز مقادیری نزدیک (شبیه) به واقعیت خواهند بود و می‌توان از برآوردهای آن‌ها با مدل (که با هزینه بسیار کم‌تر و در زمان فوق العاده کوتاه‌تر صورت می‌گیرد) برای ارزیابی‌های مورد نیاز بعدی استفاده نمود. مبنای این فرض آن است که در مدل SSM-iCrop2 پیش‌بینی تعرق بر اساس پیوستگی بین تعرق و تولید ماده خشک صورت می‌گیرد. بنابراین، کاهش در تولید اثرات خود را بر تعرق و تبخیر تعرق خواهد گذاشت. البته مدل با داده‌های محدود برای حجم آب آبیاری هم ارزی‌گری کردید.

قابلیت مدل برای شبیه‌سازی عملکرد و حجم آب کاربردی در شرایط کشاورزان ارزیابی شد. عملکرد واقعی کشاورزان از نقاط مختلف استان مربوط به سال‌های ۱۳۹۶ تا ۱۳۹۸ و نیز اندازه‌گیری‌های حجم آب کاربردی کشاورزان بر اساس گزارش‌های موجود برای این منظور استفاده گردید. داده‌های واقعی حجم آب آبیاری برای شرایط مزارع در گیاهان گوجه فرنگی (Abbasi et al., 2021)، سویا (Kiani et al., 2022)، زیتون (Abbasi et al., 2020)، سیب‌زمینی (Baghani et al., 2019)، هلو (Akbari et al., 2021) و برنج (Razzaghi et al., 2019) وجود داشت که در شرایط آب و هوایی سال ۱۳۹۷ و ۱۳۹۸ و در شهرهای مختلف استان گلستان (علی‌آباد، کردکوی، گرگان و بندرگز) انجام شده بود، لذا مدل نیز برای همان سال و برای همان مکان‌ها (ایستگاه‌های هواشناسی، خاک و اقلیم) اجرا شد، و سپس با داده‌های واقعی گزارش شده در مطالعات قبلی مقایسه شدند. خروجی

مدل با داده‌های واقعی با استفاده از آماره‌های $nRMSE$ و ضریب همبستگی (r) ارزیابی و صحت‌سنجی شد. این ارزیابی برای عملکرد دانه برنج و گندم (شکل ۱) و حجم آب آبیاری (شکل ۲) انجام شده است.

نسخه پیش انتشار

برای نشان دادن یک نمونه کاربرد، شبیه‌سازی با مدل کالیبره شده در شرایط مزارع کشاورزان برای ایستگاه هاشم آباد گرگان انجام شد. ایستگاه هاشم‌آباد گرگان دارای اقلیم ۶۱۰۲ (دارای درجه روز رشد یا زمان حرارتی با مقادیر ۵۹۵۰ الی ۷۱۱۱، شاخص خشکی ۰/۲۶۹۶ الی ۰/۳۸۹۳ و نوسانات دمای فصلی ۳/۸۳۳ الی ۸/۳۵۵) برای سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۴ و به مدت ۱۵ سال اجرا شده است. این منطقه از گرگان دارای کد خاک HC5 است و مشخصات خاک در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲. ویژگی خاک غالب شهرستان گرگان محدوده ایستگاه هواشناسی هاشم آباد گرگان

Table 2. The dominant soil characteristics of Gorgan township, Hashemabad meteorological station district, Gorgan

نوع خاک Soil code	عمق خاک (mm) SOLDEP	آلیبوی خاک SALB	شماره منحنی خاک CN	ضریب زهکشی عمقی خاک* DRAINF	آب خاک در اشباع SAT	آب خاک در ظرفیت زراعی DUL	آب در نقطه پژمردگی دائم LL
HC5-Clay MF120	1200	0.05	85	0.2	0.458	0.405	0.233

نتایج و بحث

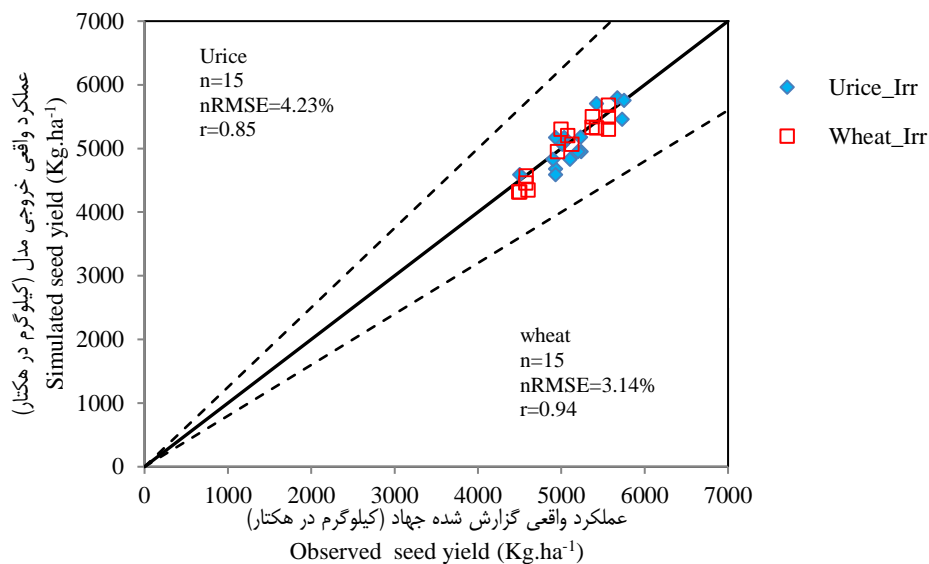
برآورد پارامترهای استفاده شده برای شبیه‌سازی عملکرد گندم آبی و برنج در جدول ۳ ارائه شده است. به‌طور مثال در گیاه زراعی برنج (با عملکرد متوسط و دیررس) مقادیر LAIMX در شرایط پتانسیل ۳/۵ و در برای شرایط کشاورزان ۲/۷۷ کالیبره شد. برای گندم آبی در شرایط پتانسیل ۶/۵ و در شرایط مزارع کشاورزان ۳/۷۷ کالیبره شد. شایان ذکر است که برآورد پارامترها برای شرایط پتانسیل از مطالعات قبلی اخذ شده‌اند ([Soltani et al., 2020b](#); [Zahed et al., 2019](#); [Karamat et al., 2021](#)). کاهش در برآوردها برای شرایط واقعی کشاورز به دلایل مختلف مثل تاریخ کاشت نامناسب، تراکم و عدم مصرف بهینه کود و سموم شیمیایی، کم‌آبایی می‌باشند. شکل ۱ عملکرد واقعی شبیه‌سازی شده با مدل (میانگین ۱۵ ساله شهرستان‌های مختلف استان) را در برابر عملکرد واقعی کشاورزان (میانگین چندساله شهرستان‌های مختلف استان اخذ شده از سازمان جهاد کشاورزی) پس از کالیبراسیون مقایسه می‌کند (شکل ۱). عملکرد واقعی (گزارش جهاد کشاورزی) گندم آبی ۴۴۸۷ و عملکرد واقعی (شبیه‌سازی مدل) برابر با ۴۳۱۸ کیلوگرم در هکتار بود تفاوت مدل با شرایط واقعی ۳/۷۴ درصد معادل ۱۶۸ کیلوگرم در هکتار، و برای شلتوک (رقم دیررس با عملکرد متوسط) عملکرد واقعی گزارش شده و برآورد مدل به ترتیب ۴۸۹۹/۷ و ۴۸۳۳/۲۴ کیلوگرم در هکتار بود و تفاوت بین آن ۱/۲۶ درصد معادل ۶۶ کیلوگرم در هکتار بود. با توجه به برآوردها و پراکنش نقاط مربوط به عملکرد می‌توان نتیجه گرفت که کالیبراسیون مدل به خوبی انجام شده است.

جدول ۳- پارامترهای مورد استفاده برای شبیه‌سازی عملکرد پتانسیل (Y_p) و واقعی (Y_{act}) گیاهان برنج و گندم آبی.

Table 3- Parameters used to simulate potential (Y_p) and actual (Y_{act}) yield of rice and blue wheat plants.

پارامتر	برنج Urice		گندم آبی Wheat Irr	
	پتانسیل Potential	واقعی Actual	عملکرد پتانسیل Potential	عملکرد واقعی Actual
حداکثر شاخص سطح برگ	3.5	2.77	6.5	3.77

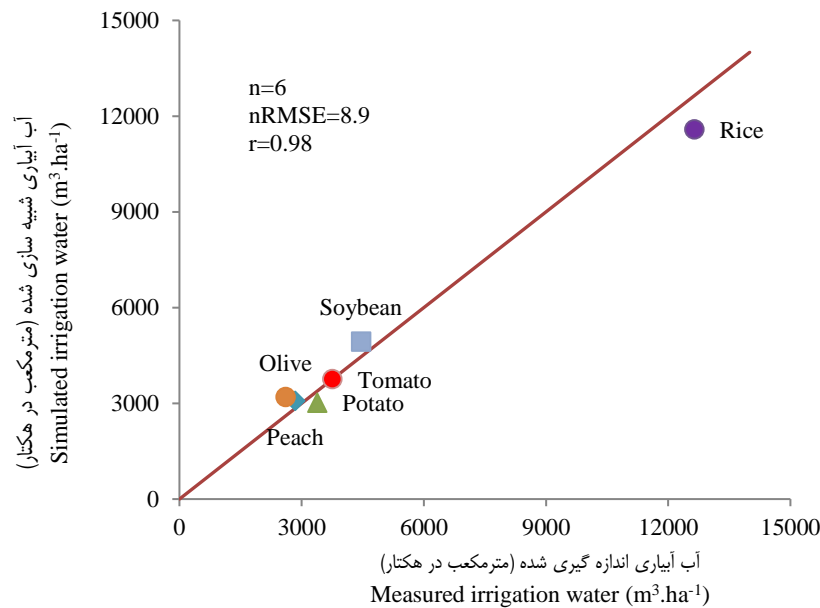
LAIMX				
حداکثر شاخص برداشت				
HI _{max}	0.38	0.31	0.5	0.45
کارایی استفاده از تشعشع				
IRUE	2.2	1.87	2.2	1.83



شکل ۱- میانگین ۱۵ ساله عملکرد واقعی شبیه‌سازی شده با مدل SSM در مقابل عملکرد واقعی گزارش شده (میانگین چندساله براساس داده‌های جهاد کشاورزی) برای برنج (شلتوک) و گندم آبی (کیلوگرم در هکتار) در سطح مزارع شهرستان‌های مختلف استان گلستان.

Fig 1- Actual yield simulated by SSM model versus the reported actual yield (long-term data based on the Agricultural Jihad data) for rice (paddy) and irrigated wheat (kg.ha⁻¹)

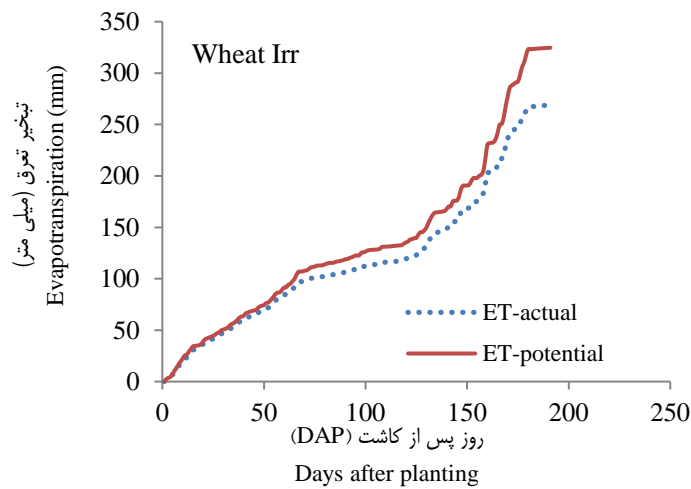
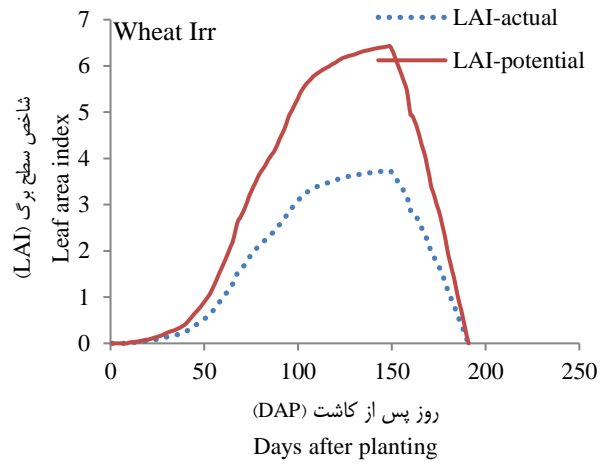
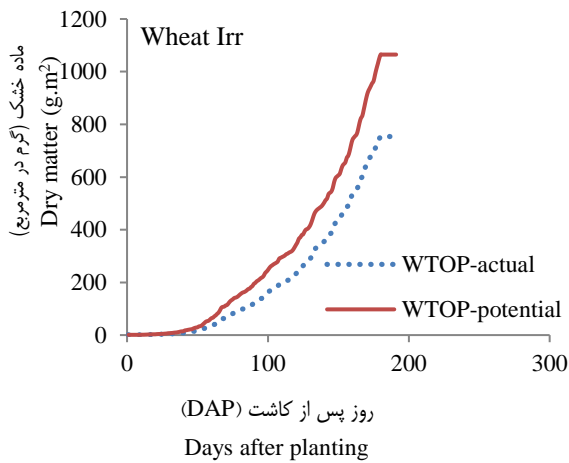
برای ارزیابی و اطمینان از برآوردهای سیستم، خروجی مدل با داده‌های واقعی اندازه‌گیری شده (گزارش شده از مطالعات مراکز تحقیقات کشاورزی در شرایط مزرعه) مقایسه شد. نتایج این مقایسه بیان‌گر تطابق خوب و مناسب مدل با داده‌های واقعی بود (شکل ۲). بنابراین استفاده از این سیستم و مدل کالیبره شده برای شرایط واقعی، برای مطالعات مرتبط با آب در کشاورزی کاربردی و مفید می‌باشد.



شکل ۲- مقایسه برآوردهای سیستم از حجم آب آبیاری (مترمکعب در هکتار) در شرایط کشاورزان در برابر مقادیر اندازه‌گیری شده مربوط به گیاهان گوجه فرنگی (Abbasi et al., 2021)، سویا (Kiani et al., 2022)، زیتون (Abbasi et al., 2020)، سیب‌زمینی (Baghani et al., 2019)، هلو (Akbari et al., 2021) و برنج (Razzaghi et al., 2019).

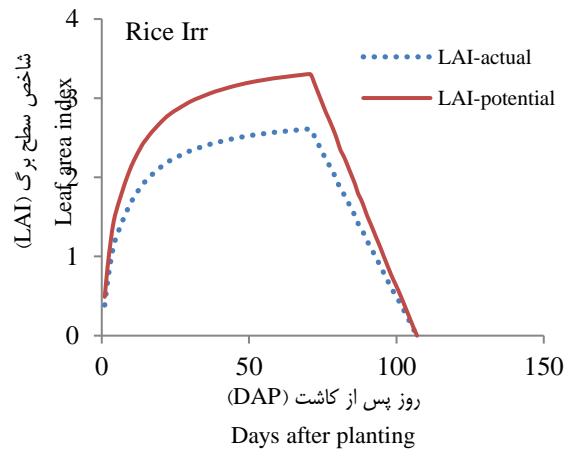
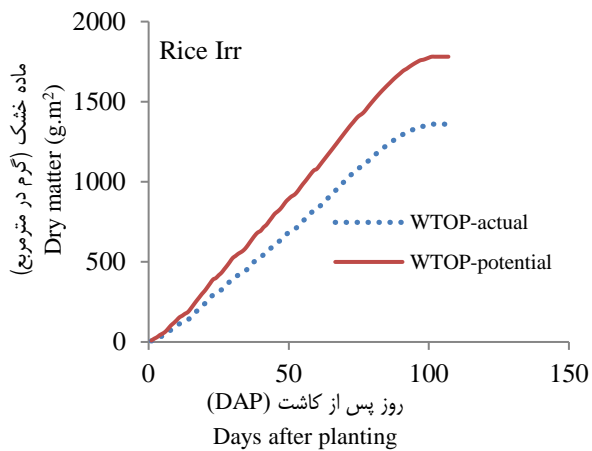
Fig 2 - Comparison of system estimates of the volume of irrigation water (m³.ha⁻¹) in the conditions of farmers against the measured values related to tomato (Abbasi et al., 2021), soybean (Kiani et al., 2022), olive (Abbasi et al., 2020), potato (Baghani et al., 2019), peach (Akbari et al., 2021) and rice (Razzaghi et al., 2019).

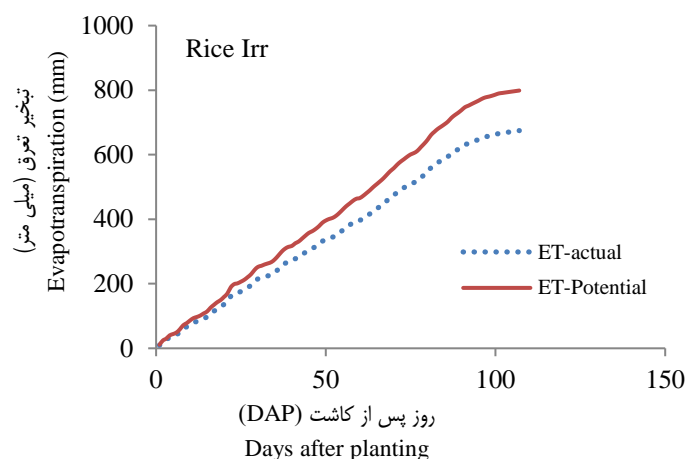
تغییر هر یک از پارامترهای ارائه شده در جدول ۳ باعث تغییراتی در آب مصرفی، عملکرد ماده خشک و تبخیر تعرق می‌شوند که همه این عوامل به تغییرات عملکرد منتهی می‌شود. برای نمونه در شکل‌های ۳ و ۴ مقادیر شبیه‌سازی شده شاخص سطح برگ، ماده خشک و تبخیر تعرق در طی فصل رشد برنج (شلتوک) و گندم آبی در شرایط پتانسیل و مزرعه واقعی کشاورزان (هر دو از خروجی مدل) ارائه شده است. این شکل‌ها (شکل ۳ و ۴) بیان‌گر تغییرات روزانه شاخص سطح برگ، ماده خشک و تبخیر تعرق روزانه محصولات در طول فصل رشد می‌باشند. همان‌طور که مشخص است تغییرات این متغیرها در شرایط مزارع کشاورزان متفاوت از شرایط پتانسیل با فرض عدم تاثیر کمبود عناصر غذایی و آب و محدودیت آفات، بیماری‌ها و علف‌های هرز است.



شکل ۳- شاخص سطح برگ، ماده خشک و تبخیر تعرق شبیه‌سازی شده با مدل برای شرایط پتانسیل (خط ممتد) و واقعی (خط منقطع) گندم آبی

Fig 3- Index of leaf area, dry matter and Evapotranspiration simulated by the model for potential (continuous line) and actual (dashed line) conditions of water wheat.





شکل ۴- شاخص سطح برگ، ماده خشک و تبخیر تعرق شبیه‌سازی شده برای شرایط پتانسیل (خط ممتد) و واقعی (خط منقطع) برنج (شلتوک عملکرد متوسط و دیررس)

Fig 4- Leaf surface index, dry matter and simulated evapotranspiration for potential (continuous line) and actual (dashed line) conditions of rice (medium and late yield paddy)

در این مطالعه مدل با استفاده از سه پارامتر LAIMX, HImax و IRUE و متغیرهای ساده‌ای مانند عملکرد که اندازه‌گیری آن راحت است و اطلاعات واقعی آن در دسترس است، کالیبره شد. پس از کالیبراسیون مدل از آن برای برآورد مؤلفه‌های مهم بیلان آب در مزرعه که اندازه‌گیری آن‌ها به راحتی امکان‌پذیر نیست، استفاده شد (جدول ۴). با استفاده از این برآوردها مدل کالیبره شده می‌توان به اطلاعات مهمی نظیر بهره‌وری آب نیز دست پیدا کرد. به طوری که با برآوردهای مدل می‌توان گزارش کرد برای یک مقدار مشخص از عملکرد چه میزان آب (حجم آبیاری و تعداد آبیاری) صرف می‌شود.

جدول ۴- مؤلفه‌های بیلان آب، بهره‌وری و ردیای آب آبی برآورد شده برای شرایط واقعی و پتانسیل برای گیاهان برنج (شلتوک) و گندم آبی.

Table 4- Water balance components, productivity and water footprint estimated for actual conditions and potential for rice plants and water wheat.

Water Balance Components	برنج تازه (شلتوک)		گندم آبی	
	Rice		Wheat irr	
	پتانسیل Potential	واقعی Actual	پتانسیل Potential	واقعی Actual
آب قابل دسترس خاک در زمان کاشت (mm)				
IPASW	180	180	223	226
آب قابل دسترس خاک در زمان برداشت (mm)				
ATSWSL	79	79	113	108
بارندگی تجمعی (mm)				
CRAIN	92	92	296	296
آب آبیاری تجمعی (mm)				
CIRGW	942	890	138	85
رواناب تجمعی (mm)				
CRUNOF	0	0	2.38	2.48
تبخیر تجمعی (mm)				
CE	195	214	159	159
تعرق تجمعی (mm)				
CTR	569	434	231	164

زه کشی تجمعی (mm)	CDRAIN	195	197	72	74
تبخیر تعرق (mm)	ET	764	648	389	323
بهره وری آب ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	WP	0.80	0.54	4.76	5.08

* بهره وری آب آبیاری (نسبت عملکرد دانه بر حسب کیلوگرم در هکتار بر حجم آب آبیاری بر حسب مترمکعب در هکتار) محاسبه شده است.

از دیگر خروجی‌های مدل صفات مرتبط با فنولوژی و رشد، وضعیت ماده خشک تجمعی و عملکرد دانه می‌باشد که برخی از این اطلاعات در جدول ۵ ارائه شده است. این اطلاعات می‌تواند در محاسبات مربوط به بهره‌وری آب، برنامه ریزی برای انتخاب تاریخ کاشت مناسب، درآمد اقتصادی ناشی از عملکرد مورد استفاده قرار گیرد.

جدول ۵- صفات گیاهی شبیه‌سازی شده در شرایط واقعی و پتانسیل برای گیاهان برنج و گندم آبی
Table 5- Simulated plant traits in actual and potential conditions for rice and blue wheat plants.

صفات گیاهی Plant traits	برنج تازه (شلتوک) Rice		گندم آبی Wheat	
	پتانسیل Potential	واقعی Actual	پتانسیل Potential	واقعی Actual
روز از کاشت تا آغاز پرشدن دانه Days to beginning seed growth	74	74	143	143
روز از کاشت تا رسیدگی برداشت Days to maturity	113	113	181	181
عملکرد ماده خشک ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$) dry matter yield	1756	1340	1184	839
عملکرد دانه ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$) grain yield	656	416	569	374
شاخص برداشت Harvest index	0.37	0.31	0.5	0.45
حداکثر شاخص سطح برگ Maximum harvest index	3.31	2.77	6.4	3.75
عملکرد ($\text{Kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) Yield	7630	4833	6580	4318

در مطالعه‌ای کارایی مدل SSM در شبیه‌سازی رشد و نمو گندم آبی (رقم مهرگان) تحت شرایط تنش آبی، با انجام آزمایشی (۵ تیمار بدون تنش، تنش در مرحله آبستنی، تنش در مرحله گلدهی، تنش در مرحله شیری شدن و تنش در مرحله خمیری) در منطقه ورامین ارزیابی شد (Shiukhy Soqanloo et al., 2023). بین مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده تفاوت قابل توجهی وجود نداشت. مقادیر مشاهده شده برای روز تا پایان پرشدن دانه، در شرایط بدون تنش، تنش در مراحل آبستنی، گلدهی، شیری شدن و خمیری شدن به ترتیب ۲۲۲، ۲۱۹، ۲۱۹، ۲۲۱، ۲۲۱ روز بود که با مقادیر شبیه‌سازی شده (به ترتیب ۲۲۴، ۲۲۱، ۲۲۰، ۲۲۱) اختلاف ناچیزی داشت. همچنین برای عملکرد دانه مشاهده شده در مزرعه به ترتیب برابر با ۵۷۸۳/۶، ۵۴۲۳، ۵۱۶۰، ۵۰۰۶ و ۵۰۰۱ کیلوگرم در هکتار و برای مقادیر شبیه‌سازی شده

به ترتیب ۵۶۳۰/۴، ۵۲۲۰، ۴۶۸۰ و ۴۸۸۰ کیلوگرم در هکتار برآورد شد، نتایج مطالعه ایشان نشان داد مدل از کارایی خوبی برای شبیه‌سازی در شرایط تنش آبی را دارد به طوری که ضریب تغییرات برای شبیه‌سازی عملکرد ۳/۵، ماده خشک ۱/۷، شاخص سطح برگ ۳/۳، وزن هزار دانه ۱/۸، شاخص برداشت ۴/۱ می‌باشد و در مطالعات مشابه قابل استفاده است (Shiukhy Soqanloo et al., 2023).

در مطالعات قبلی نیز بیلان آب با استفاده از مدل‌ها برآورد شده است. به دلیل این که اندازه‌گیری بیلان آب در مزارع وقت گیر و پرهزینه است محققان معتقدند استفاده از مدل‌هایی که بتواند بیلان آب را شبیه‌سازی کند مفید است. اندازه‌گیری بیلان آب و آب استفاده شده توسط گیاه برای مدیریت آب در کشاورزی ضروری است (Dehghan et al., 2011). در مطالعاتی با استفاده از مدل‌های مختلف بیلان آب مزارع بررسی شد. بیلان آب و خاک با استفاده از مدل شبیه‌سازی AquaCrop برای عملکرد گندم (Akbari, 2011) و ذرت (Saeidi et al., 2021) تخمین اجزای بیلان آب با استفاده از مدل شبیه‌سازی SWAP (اگرهیدرولوژیک) برای گندم در منطقه نیشابور استفاده شده است و نشان داد مدل به خوبی می‌تواند جریان آب خاک را شبیه‌سازی کند. بنابراین استفاده از مدل‌ها به عنوان ابزاری مفید بدون هزینه و صرف وقت زیاد برای برآورد اجزای بیلان آب در سطح مزرعه قابل استفاده است (Dehghan et al., 2011). مدل‌های یاد شده بیشتر توسط متخصصین مهندسی آب و برای شرایط مطلوب استفاده شده است در حالی که در این مطالعه با رویکردی جدید و متفاوت و از دیدگاه متخصصین زراعت، کاربرد و توانایی مدل SSM در برآورد اجزای بیلان آب و عملکرد در شرایط واقعی و پتانسیل (برآوردهای شرایط واقعی و پتانسیل با استفاده از مدل SSM انجام شده است) مورد بررسی قرار گرفت با توجه به دقت مدل در برآوردها و تایید نتایج ارزیابی و پارامتریابی مدل، استفاده از این مدل گیاهی محور در مطالعات مشابه (مدیریت آب در کشاورزی، برآورد بیلان آب، بهره‌وری آب، آب مجازی و غیره) قابل استفاده است.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه مدل SSM-iCrop2 برای شبیه‌سازی در شرایط کشاورزان کالیبره شد. کالیبراسیون با کمک مقایسه عملکرد کشاورزان در برابر عملکرد شبیه‌سازی شده توسط مدل و با تغییر پارامترهای کارایی استفاده از تشعشع (IRUE)، حداکثر سطح برگ (LAIMX) و حداکثر شاخص برداشت (HIMAX) صورت گرفت. نشان داده شد که با مدل کالیبره شده برای شرایط کشاورزان می‌توان به اطلاعات دیگری (مثل حجم آب آبیاری) که به راحتی قابل اندازه‌گیری نیستند، دست یافت با این فرض که مدل این اطلاعات را هم مثل عملکرد با دقت قابل قبول برآورد می‌کند. از این مدل می‌توان برای تکمیل آزمایش‌های مزرعه‌ای استفاده نمود به این ترتیب که مدل بر اساس متغیرهایی مانند سطح برگ، عملکرد و شاخص برداشت که اندازه‌گیری آن راحت است کالیبره شود و از اطلاعات برآورد شده مربوط به بیلان آب که اندازه‌گیری آن در مزارع به سادگی امکان‌پذیر نیستند و نیازمند وقت، دقت، امکانات و هزینه بالایی هستند، استفاده نمود. این کاربرد مدل در شرایطی اهمیت پیدا می‌کند که اندازه‌گیری این اطلاعات در شرایط کشاورزان هم پرهزینه و هم زمان‌بر است. در این شرایط برآوردها با مدل کالیبره شده بهتر از دست روی دست گذاشتن است.

Akbari, Sh., and Soltani, A. (2017). Parameterization and evaluation of simple model for simulation of growth and yield of soybean in Tehran climatic condition. *Journal of Crops Improvement*, 19(3): 751-765. (In Persian with English abstract).

Akbari, M. (2011). Soil Water Balance and Crop Yield of Winter Wheat Using AquaCrop Simulation Model. *Food Engineering Research*, 12 (4): 19 – 34. <https://doi.org/10.22092/jaer.2012.100329>.

Akbari, M., Naseri, A., Noorjo, A., Parchami Iraqi, F., Nakhjavani Moghadam, M., Sepehri Sadeghian, S., Alimohammadi Nafchi, R., Eslami, A., Ghasemi, M., Gomrakchi, A., Kamali Pashai, M.A., Kia, A., Guderzi, M., and Behramlu, R. (2021). Determining the usable water of peaches and nectarines in the country. Final report of the research project. *Agricultural Engineering and Technical Research Institute, Agricultural Research Organization of the country*. registration number 59624.

Abbasi, N., Taheri, M., Kiani, A., Yusuf Gomrakchi, A., Dehghanian, S.A., and Shahin Rakhsar, P. (2020). Determining the Consumption of Olive Water in the Country. Final report of the research project. *Technical Research Institute and . Agricultural Engineering, Agricultural Research Organization of the country*. registration number 57724.

Abbasi, F., Jalini, M., Khormian, M., Dehghanian, S.A., Moqbli Doman, A., Nowrozi, M., Yusuf Gomrakchi, A., Taheri, M., Zare Mehrani, A., Kayani, A., Salah, N., Mousavi Fazl, H., Qadoumi Firouzabadi, A., Bayat, P., and Naseri, A. (2021). The Role of Modern Irrigation Systems in the Management of Tomato Juice Consumption in Country. *Engineering research of irrigation and drainage structures*. 22 (82): 43-64.

Arabameri, R., Soltani, A., Zeinali, E., Benjamin Torabi. (2020). The amount and How to distribute of chickpea and lentil yield gap in Iran. *Journal of Crops Improvement*, 23 (2): 221-234.

Baghani, J., Kayani, A. Firouzabadi, A., Shahruxhnia, M. Jalini, M., Khosravi, H., Alimohammadi Nafchi, R., Meiri, M., Behramlu, R., Akhwan, K., Salemi, H., Moqbli, A., Nikanfar, R., Abbasi, M. (2019). Determination of water Consumption of potatoes in the country. Final report of the research project. *Technical and Engineering Research Institute . Agriculture, Agricultural Research Organization of the country*. registration number 57967.

Bregaglio, S., Willocquet, L., Kersebaum, K.Gh., Ferrise, R., Stella, T., Ferreira, T.B., Pavan, W., Asseng, S., Savary, S. (2021). Comparing process-based wheat growth models in their simulation of yield losses caused by plant diseases. *Fild Crops Research*, 1-14.

Bagheri, V. and Torabi, B. (2015). A simple model for simulation of growth, development and yield of faba bean in Golestan province. *Journal of Agricultural Crops Production*, 8(2): 133-152. (In Persian with English abstract).

- 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 Research*, 63: 545-563.
- Dehghan, H., Alizadeh, A., Haghayeghi, S.A. 2011. Water Balance Components Estimating in Farm Scale Using Simulation Model SWAP (Case Study: Neyshabur Region) . *Water and Soil*, 24 (6): 1265-1275. (In Persian with English abstract).
- Diepen, C.V., Wolf, J., Keulen, H.V., and Rappoldt, C. (1989). WOFOST: A simulation model of crop production. *Soil use and management*, 5(1): 16-24.
- Ghanem, M.E., Marrou, H., Biradar, C., and Sinclair, T.R. (2015). Production potential of lentil (*Lens culinaris* Medik.) in East Africa. *Agricultural Systems*, 137: 24-38.
- Guiguitant, J., Marrou, H., Vadez, V., Gupta, P., Kumar, S., Soltani, A., Sinclair, T.R., and Ghanem, M.E. (2017). Relevance of limited-transpiration trait for lentil (*Lens culinaris* Medik.) in South Asia. *Field Crops Research*, 209: 96-107.
- Hearn, A.B. (1994). OZCOT: A simulation model for cotton crop management. *Agricultural Systems*, 44: 257-299.
- International Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer. (1993). The IBSNAT Decade. Department of Agronomy and Soil Science, College of Tropical Agriculture and Human Resources, University of Hawaii, Honolulu, Hawaii.
- Jones, J.W., Hoogenboom, G., Porter, C.H., Boote, K.J., Batchelor, W.D., Hunt, L.A., Wilkens, P.W., Singh, U., Gijsman, A.J. and Ritchie, J.T. (2003). The DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy*, 18: 235-265.
- Kiani, A., Kamali, M.A., and Abbasi, F. (2022). Investigating the Efficiency of Soybean Irrigation Water in Fields of Golestan Province. *Irrigation and drainage of Iran*. 16 (1): 69-82.
- Karamat, S., Torabi, B., Soltani, A., and Zeinli, A. (2020). Evaluation of production potential and rice yield gap in Iran using SSM-iCrop2 model. *Cereal research*. 11 (3): 191-175.
- Kamari, H., Zeinli, A., Soltani, A., and Qadrifar, F. (2019). Parameterization and evaluation of SSM-iCrop2 model for predicting cotton growth and yield in Iran. *Simulation of cotton growth and yield using SSM-iCrop2 model. Iranian cotton researches*, 8 (2): 72-49. (In Persian)
- Messina, C.D., Sinclair, T.R., Hammer, G.L., Curan, D., Thompson, J., Oler, Z., Gho, C., and Cooper, M. (2015). Limited-transpiration trait may increase maize drought tolerance in the US Corn Belt. *Agronomy Journal*, 107 (6): 1978-1986.
- McCown, R.L., Hammer, G.L., Hargreaves, J.N.G., Holzworth, D.P., and Freebairn, D.M. (1996). APSIM: a novel software system for model development, model testing, and simulation in agricultural system research. *Agricultural Systems*, 50: 255-271.
- Manschadi, A.M., Kaul, H.-P., Eitzinger, J., Friedel, J., Pötsch, E., Bodner, G., Neubauer, T. (2019). Farm/IT – Innovative Digital Technologies for Strengthening the Resilience of Austrian Farming Systems to Climate Risks. Presented at the 20. Österreichischer Klimatag, Climate Change Centre Austria (CCCA), 20. KLIMATAG - Facetten der österreichischen Klimaforschung, Vienna, Austria, p. 139.

Manschadi, A.M., Palka, M., Fuchs, W., Neubauer, T., Eitzinger, J., and Oberforster, M. (2022). Performance of the SSM-iCrop model for predicting growth and nitrogen dynamics in winter wheat. *European Journal of Agronomy*, 135: 126 - 487.

<https://doi.org/10.1016/j.eja.2022.126487>.

Nehbandani, A.R., Soltani, A., Zeinali, E., Raeisi, S., Rajabi, R. (2015). Parameterization and evaluation of SSMsoybean model for prediction of growth and yield of soybean in Gorgan. *Journal of Plant Production Research*, 22(2):1–26. (In Persian with English Summary)

Pourshirazi, S., Soltani, A., Zainli, A., and Torabi, B. (2023). Parameterization and Evaluation of a Simple Simulation Model (SSM-iCrop2) for Alfalfa Growth and Yield in Iran. *Agroecology journal*, 15: 169-189. DOI:10.22067/agry.2021.70433.1044. (In Persian with English Summary)

Rassam, G., and Soltani, A. (2007). Optimizing chickpea production management under rainfed conditions using the Computer simulation. In: Proceeding of 2nd National Symposium of Organic Farming, Oct 17–18. University of agriculture Sciences and Natural Resources, Gorgan. Iran (In persian)

Razzaghi, M., Kiani, A., and Abiyar, N. 2019. Cultivation and Drying of Rice, a Technical and Economic Solution for Rice Production in the Conditions of Golestan Province. *Agricultural Water Management*. 7 (1): 33-44.

Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C., and Fereres, E. (2009). AquaCrop Reference Manual. FAO. Land and Water Division, Rome, Italy.

Rahban, S., Torabi, B., Soltani, A., and Zeinali, E. (2021). Using SSM-iCrop Model to Predict Phenology, Yield, and Water Productivity of Canola (*Brassica napus* L.) in Iran Condition. *Agroecology journal*, 13(1): 157-177.

Schoppach, R., Soltani, A., Sinclair, T.R., Sadok, W. (2017). Yield comparison of simulated rainfed wheat and barley across Middle-East. *Agricultural Systems*, 153: 101-108.

Sinclair, T.R., Messina, C.D., Beatty, A., Samples, M. (2010). Assessment across the United States of the benefits of altered soybean drought traits. *Agronomy Journal*, 102 (2): 475-482.

Sinclair, T.R., Soltani, A., Marrou, H., Ghanem, M., Vadez, V. (2020). Geospatial assessment for crop genetic and management improvements. *Crop Science*. <https://doi.org/10.1002/csc2.20106>.

Soltani, A., and Sinclair, T.R. (2011). A simple model for chickpea development, growth and yield. *Field Crop Research*, 124 (2): 252-260.

Soltani, A., and Sinclair, T.R. (2012). Modeling Physiology of Crop Development. Growth and Yield, CABI, Wallingford, UK.

Soltani, A., Maddah, V., and Sinclair, T.R. (2013). SSM-Wheat: a simulation model for wheat development, growth and yield. *International Journal of Plant Production*, 7(4): 711-740.

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 Research*, 175: 37-46.

Soltani, A., Nehbandani, A., Zeinali, A., Torabi, B., Zand, A., Ghasemi, S., Alasti, A., Dadrasi, A., Hossain, R., Alimagham, S.M., Zahed, M., Mohamad Zadeh, Z., Kamari, H., Arabameri, R., Fayazi, H., Rahban, S., Mohammadi, S and Keramat, S. (2018). Providing a gap Atlas for the performance and potential of important crops In the country in present and futureclimates. Gorgan. Sirang Press.

Soltani, A., Nehbandani, A., Aalimaqham, S.A., Dadarsi, A., Torabi, B., Zeinli, A., Zand, A., Ghasemi, S., Barani, H., Alasti , A., Hosseini, R., Zahed, M., Fayazi, H., Kamri, H., Arab Ameri, R., Mohammadzadeh, Z., Rahban, S., Pourshirazi, S., Mohammadi, S., Keramat, S., Sosraei, N., Ashnavar, M., and Ahmadi, M. (2019). Modeling the growth and production of vegetation on a large scale with SSM-iCrop2: crops, vegetables, orchards and pastures. Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, research project report

Soltani, A., Alimagham, S.M., Nehbandani, A., Torabi, B., Zeinali, E., Dadrasi, A., Zand, E., Ghassemi, S., Pourshirazi, S., Alasti, O., Hosseini, R.S., Zahed, M., Arabameri, Mohammadzadeh, Z., Rahban, S., Kamari, H., Fayazi, H., Mohammadia, S., Keramat, V., Vadez, van Ittersum, M.K., and Sinclair, T.R. (2020a). SSMiCrop2: A simple model for diverse crop species over large areas. *Agricultural Systems*, 1-7. doi.org/10.1016/j.agry.2020.102855

Soltani, A., Alimagham, S.M., Nehbandani, A., Torabi, B., Zeinali, E., Dadrasi, A., Zand, E., Ghassemi, S., Pourshirazi, S., Alasti, O., Hosseini, R.S., Zahed, M., Arabameri, R., Mohammadzadeh, Z., Rahban, S., Kamari, H., Fayazi, H., Mohammadi, S., Keramat, S., Vadez, V., van Ittersum, M.K., and Sinclair, T.R. (2020b). SSM-iCrop2: A simple model for diverse crop species over large areas. *Agricultural Systems*, 182: 102855.

Soltani, A., Alimagham, S.M., Nehbandani, A., Torabi, B., Zeinali, E., Zand, E., Ghassemi, S., Vadez, V., Sinclair, T.R., van Ittersum, M.K. (2020c). Modeling plant production at country level as affected by availability and productivity of land and water. *Agricultural Systems*, 183: 102859.

Stockle, C.O., Donatelli, M., and Nelson, R. (2003). CropSyst, a cropping system simulation model. *European Journal of Agronomy*, 18: 289-307.

Shiukhy Soqanloo, S., Mousavi Baygi, M., Torabi, B., and Raeini Sarjaz, M. (2023). Evaluating the SSM model efficiency in simulating the wheat growth under water stress conditions. *Journal of Water and Soil*, 37(3): 353-366. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.2023.80355.1237>

Saeidi, R., Ramezani Etedali, H., Sotoodehnia, A., Nazari, B., Kaviani, A. (2021). Evaluation of AquaCrop model for estimating of changes process of soil moisture, evapotranspiration and yield of maize under salinity and fertility stresses. *Environment Stresses In Crop Sciences*, 14 (1): 195-210.

Torabi, B., Ebrahimi, N., Soltani, A. and Zeinali, E. (2020). Parameterization and Evaluation of SSM_iCrop Model for Prediction of Growth and Development of Faba Bean in Climatic Conditions of Gorgan. *Journal of Crops Improvement*, 22: 531-542. (In Persian with English Summary)

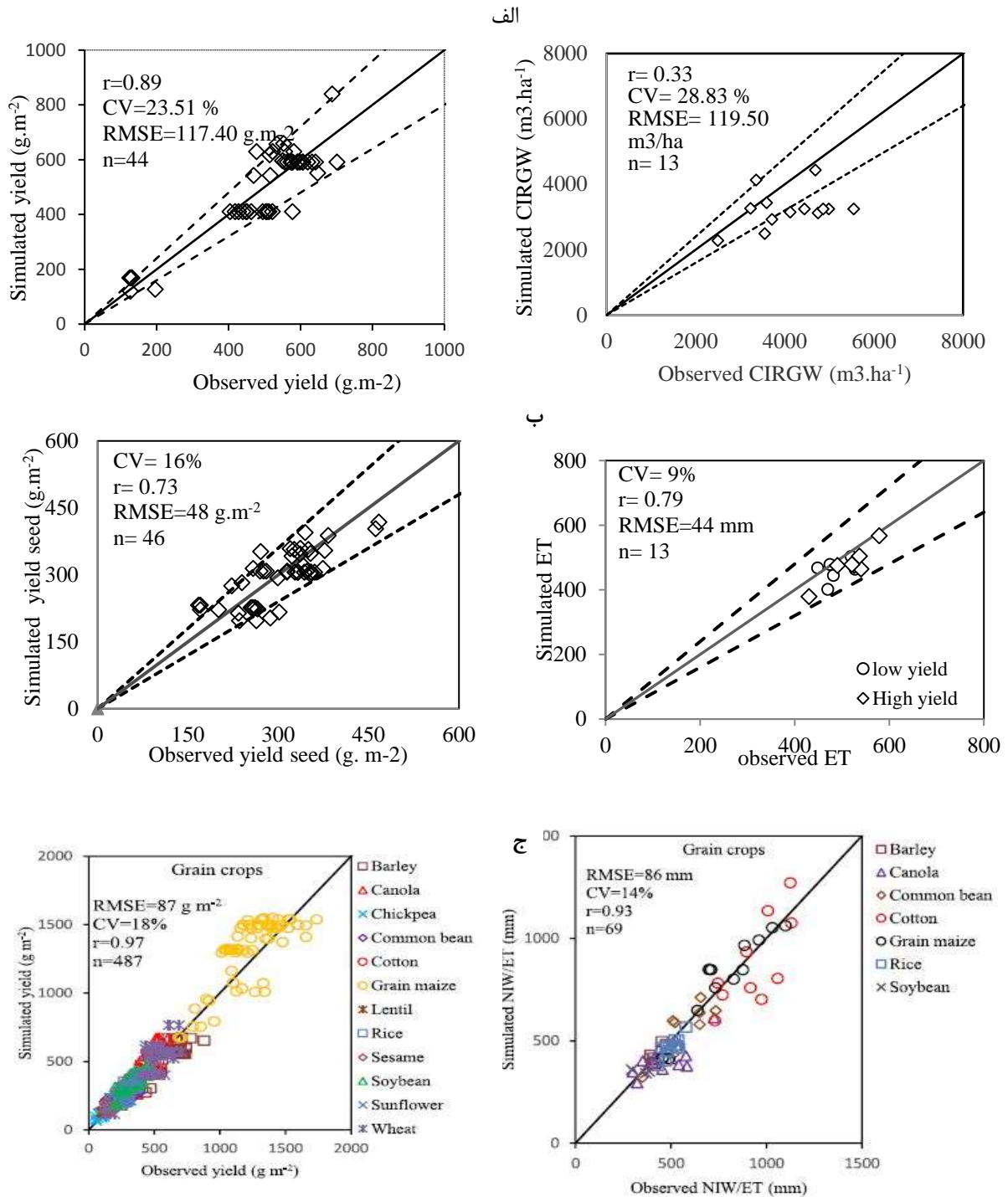
Vadez, V., Halilou, O., Hissene, H.M., Sibiry-Traore, P., Sinclair, T.R., and Soltani, A. (2017). Mapping water stress incidence and intensity, optimal plant populations, and cultivar duration for African groundnut productivity enhancement. *Front. Plant Science*, 8: 432.

Van Evert, F.K., and Campbell, G.S. (1994). CropSyst: A collection of object-oriented simulation models of agricultural system. *Agronomy Journal*, 86: 325-331.

Williams, J.R., Jones, C.A., Kiniry, J.R., Spanel, D.A. (1989). The EPIC crop growth model. *Trans. ASAE*, 32 (2): 497-0511.

Wolfgang Fuchs, D. (2021). Parameterisation and Evaluation of the Crop Growth Model SSM-iCrop for Winter Wheat Grown in Eastern Austria. Doctor rerum naturalium technicarum Universität für Bodenkultur Wien. *Department of Crop Sciences. Institute of Agronomy*. 127p.

Zahed M, Soltani A, Zeinali E, Totabi B, Zand S, Alimaghani S.M. (2019). Modeling of irrigated wheat yield potential and gap in Iran. *Journal of Crop Production*, 12(3): 35-52. (in Persian, abstract in English)



شکل پیوست - آب آبیاری شبیه‌سازی شده در مقابل آب آبیاری مشاهده شده و عملکرد گندم شبیه‌سازی شده با مدل SSM در مقابل عملکرد گندم اندازه گیری شده (الف: منبع زاهد و همکاران، ۱۳۹۸)؛ تبخیر تعرق شبیه‌سازی شده با مدل SSM در مقابل تبخیر تعرق مشاهده شده و عملکرد برنج (شلتوک) شبیه‌سازی شده با مدل SSM در مقابل عملکرد برنج (شلتوک) اندازه‌گیری شده (ب: کرامت و همکاران، ۱۴۰۰)؛ آب خالص آبیاری/تبخیر تعرق شبیه‌سازی شده با مدل در مقابل آب خالص آبیاری/تبخیر تعرق مشاهده شده و عملکرد محصولات دانه‌ای شبیه‌سازی شده با مدل SSM در مقابل عملکرد محصولات اندازه‌گیری شده (ج: Soltani *et al.*, 2020b).

جدول ۱- پارامترهای استفاده شده برای این مطالعه در مدل SSM-iCrop2 برای گندم آبی (رقمی مشابه تجن) و شلتوک (رقم دیررس با عملکرد متوسط)

توصیف	مخفف	گندم آبی	برنج (شلتوک)
مراحل فنولوژی			
دمای پایه برای نمو	TBD	۰	۸
دمای مطلوب تختانی برای نمو	TP1D	۲۵	۳۰
دمای مطلوب فوقانی برای نمو	TP2D	۲۸	۳۷
دمای سقف برای نمو	TCD	۴۰	۴۵
واحد دمایی که جوانه زنی اتفاق می افتد (درجه سانتی گراد روز)	tuEMR	۱۳۲	۲/۲
واحد دمایی که در آن شروع موثر پر شدن دانه اتفاق می افتد (درجه سانتی گراد روز)	tuBSG	۱۶۲۰	۱۴۳۵
واحد دمایی که در آن پایان موثر پر شدن دانه اتفاق می افتد (درجه سانتی گراد روز)	tuTSG	۲۱۷۲	۲۰۹۵
واحد دمایی برای بلوغ فیزیولوژیکی (پایان تجمع ماده خشک) (درجه سانتی گراد)	tuPM	۲۱۷۰	-
واحد دمایی در زمان رسیدگی برداشت (درجه سانتی گراد روز)	tuHAR	۲۴۰۰	۲۲۰۰
سطح برگ			
نقطه ۱ شاخص سطح برگ نسبی در مقابل مرحله نمو نسبی یا نرمالیزه شده**	(X1, Y1)	(۰/۲, ۰/۰۶)	(۰/۰۱, ۰/۱۵)
نقطه ۲ شاخص سطح برگ نسبی در مقابل مرحله نمو نسبی یا نرمالیزه شده**	(X2, Y2)	(۰/۵, ۰/۸۸)	(۰/۷, ۰/۹۵)
شاخص سطح برگ حداکثر	LAIMX	۶/۵	۳/۵
واحد دمایی تا رسیدگی که پیر شدن برگ اتفاق می افتد (درجه سانتی گراد روز)	tuBLS	۱۶۲۰	۱۴۳۵
ضریب سرعت پیر شدن برگ	SRATE	۱	۱
آستانه انجماد برای مرگ برگ / دمای پایین (درجه سانتی گراد)	FrzTh	-۵	۸
مرگ نسبی برگ به ازای هر درجه کاهش دما زیر دمای پایین / آستانه انجماد	FrzLDR	۰/۰۱	۰/۰۱
دمای آستانه گرما برای پیر شدن برگها (درجه سانتی گراد)	HeatTH	۳۰	۳۷
افزایش نسبی سرعت پیری برگ به ازای هر درجه افزایش دما از دمای آستانه گرما	HtLDR	۰/۱	۰/۱
ماده خشک			
دمای پایه برای تولید ماده خشک (درجه سانتی گراد)	TBRUE	۰	۵
دمای مطلوب تختانی برای تولید ماده خشک (درجه سانتی گراد)	TP1RUE	۱۵	۱۵
دمای مطلوب فوقانی برای تولید ماده خشک (درجه سانتی گراد)	TP2RUE	۲۲	۳۵
دمای سقف برای تولید ماده خشک (درجه سانتی گراد)	TCRUE	۳۵	۵۰
ضریب خاموشی برای تشعشع فعال فتوسنتزی	KPAR	۰/۶۵	۰/۶۰
کارایی استفاده از تشعشع در شرایط مطلوب رشد (گرم بر مگاژول)	RUE	۲/۲	۲/۲
ضریب پاسخ RUE به غلظت CO ₂	C3C4	۰/۸	۰/۸
تشکیل عملکرد			
حداکثر شاخص برداشت	HImax	۰/۵	۰/۳۸
کسری از توده خشک قابل جابجایی از بافت رویشی به بذر / میوه در حال رشد (گرم بر گرم)	FRTRL	۰/۲	۰/۲۵
ضریب تبدیل دانه (گرم بر گرم)	GCC	۱	۱
روابط آب			
واحد دمایی برای شروع رشد ریشه (درجه سانتی گراد)	tuBRG	۱۳۲	۰/۰۰۱
واحد دمایی برای پایان رشد ریشه (درجه سانتی گراد)	tuTRG	۱۶۲۰	۰/۶۵

۲۰۰	۲۰۰	iDEPORT	عمق ریشه در زمان سبز شدن (میلی متر)
۲۵۰	۱۰۰۰	MEED	حداکثر عمق مؤثر استخراج آب از خاک توسط ریشه (میلی متر)
۵/۸	۵/۸	TEC	ضریب کارایی تعرق
۰/۶	۰/۳	WSSG	کسر آب قابل دسترس خاک که در کم تر از آن تولید ماده خشک کم می شود
۰/۶	۰/۴	WSSL	کسر آب قابل دسترس خاک که در کم تر از آن گسترش سطح برگ کم می شود
.	۰/۴	WSSD	ضریب حساسیت نمو و پیر شدن به تنش خشکی

** به عنوان حداکثر سطح برگ گندم در شرایط مطلوب (PLAMX: ۱۸۶ سانتی مترمربع در هر بوته) با تراکم گیاه ۳۵۰ گیاه در مترمربع برای شرایط آبیاری) استفاده می شود.

** به عنوان حداکثر سطح برگ برنج در شرایط مطلوب (PLAMX: ۵۰۰ سانتی مترمربع در هر بوته) با تراکم گیاه ۷۰ گیاه در مترمربع برای شرایط آبیاری) استفاده می شود.