



Calibration and Validation of SSM-iCrop2 Model for Simulating the Growth and Yield of Lentil (*Lens culinaris* Medik.)

Z. Amani¹, F. Mondani^{1*}, M. Ghobadi¹

1- Department of Plant Production and Genetics, Razi University, Kermanshah, Iran

(*- Corresponding author's Email: f.mondani@razi.ac.ir)

Received: 16 July 2025

Revised: 25 October 2025

Accepted: 29 October 2025

Available Online: 02 December 2025

How to cite this article:

Amani, Z., Mondani, F., & Ghobadi, M. (2026). Calibration and validation of SSM-iCrop2 model for Simulating the growth and yield of lentil (*Lens culinaris* Medik.). *Iranian Journal of Field Crops Research*, 24(2), 263-280. (In Persian with English abstract)

<https://doi.org/10.22067/jcesc.2025.94482.1417>

Introduction

Lentil is the third most important legume in the cold-season legume family. Legumes, as the second most important food source after cereals, account for about 613000 hectares of the annual cultivated area of crops in Iran. In terms of cultivated area, lentil is in third place among legumes after chickpeas and beans, and the provinces of Hamedan, Lorestan, Kerman, Fars and Bushehr are the main centers of production of this plant. Crop growth simulation models can play an important role in allowing farmers and planners to make decisions about the feasibility of systems (crops and technologies). These useful tools greatly facilitate the optimization of crop production and management strategies. Crop growth models also provide a useful tool in researches to simulate potential growth and yield. The aim of this study was to calibrate and validate the SSM-iCrop2 model for simulation of growth and yield of lentil in order to investigate the effect of sowing date and different irrigation under Kermanshah and Azna regions using the sub models associated with phenology, dry matter production and distribution and the changes in leaf area.

Materials and Methods

This study was conducted at Agricultural and Natural Resources, Razi University and in a leading farmer's farm in the Azna region. The SSM-iCrop2 model was used. This model has been tested and proved for a wide range of crops. This model requires limited and easily available input information. In order to collect the necessary information for model calibration and evaluation, experiments were conducted using a split factorial design with three replications in 2022 and 2023. In this way, one experiment was conducted to extract the parameters required for model calibration under the Kermanshah region in 2022, and then two other experiments were conducted to extract the information required to model validation under the Kermanshah and Azna regions in 2023. Treatments included supplementary irrigation (no irrigation, one irrigation at flowering stage, and two irrigations at flowering and seed filling stages) as the main factor, sowing date (February 17, March 21, March 20 for Kermanshah, March 6, 16, and 24 for Azna), and cultivar (Bile Savar, Kimia, and Gachsaran) as secondary factors. Measured data of phenological development stages and grain yield were used to evaluate the model. Model evaluation indices included linear regression fitting between observed and simulated data and their comparison with the slope of the 1:1 line, root mean square error (RMSE), normalized root mean square error (nRMSE), mean error of approximation (MBE), and Wilmot's agreement index (d).

Results and Discussion



Authors retain the copyright. This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

<https://doi.org/10.22067/jcesc.2025.94482.1417>

The model calibration results indicated appropriate accuracy of the plant parameter values used in the model structure, which led to very accurate prediction of growth and yield characteristics. The evaluation results showed acceptable accuracy of SSM-iCrop2 in simulating the process of changes in developmental stages and grain yield of cultivars in the studied treatments. The RMSE value of the developmental stage from sowing to physiological maturity in Kermanshah for the cultivars Bileh Savar, Kimia and Gachsaran was 2.5, 2.5 and 3.4 days, respectively, and in Azna it was 12.9, 12.5 and 11.8 days, respectively. The RMSE value of grain yield in Kermanshah ranged from 1.4 to 2.15 and from 4 to 7 g m⁻² in Azna. Several studies have been conducted on the evaluation of the SSM-iCrop2 model in simulating grain yield in different crops. Among them is the research on soybean by Nehbandani et al. (2015), who reported satisfactory results regarding the model evaluation. They stated that this model can be used to determine the most suitable sowing and harvesting dates, grain yield, and other phenological stages of soybean.

Conclusion

The results indicated that the SSM-iCrop2 model accurately estimated the phenological development and grain yield of lentil cultivars. Despite variations in sowing dates and irrigation regimes, the model successfully simulated lentil growth and yield using a relatively small number of input parameters. Model evaluation demonstrated that SSM-iCrop2 can accurately simulate the developmental stages and grain yield of lentil in the Kermanshah and Azna regions. Based on these findings, the model is suitable for predicting lentil growth and yield and can be applied to studies assessing lentil performance under diverse climatic conditions and management practices.

Keywords: Grain yield, Parameterization, Phenology, Simulation

مقاله پژوهشی

جلد ۲۴، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۵، ص ۲۸۰-۲۶۳

واسنجی و تعیین اعتبار مدل SSM-iCrop 2 برای پیش‌بینی رشد و عملکرد عدس (*Lens culinaris* Medik.)

زینب امانی^۱، فرزاد مندنی^{۱*}، مختار قبادی^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۰۷

چکیده

پژوهش حاضر به منظور تخمین پارامترهای مدل SSM-iCrop2 و ارزیابی کارایی آن در پیش‌بینی رشد و نمو عدس (*Lens culinaris* Medik.) انجام شد. به منظور جمع‌آوری داده‌های لازم برای واسنجی و ارزیابی مدل، آزمایش‌هایی به صورت اسپلیت فاکتوریل در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در مزرعه تحقیقاتی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه رازی و شهرستان ازنا طی سال‌های زراعی ۱۴۰۰ و ۱۴۰۱ اجرا گردید. تیمارها شامل رژیم آبیاری (بدون آبیاری، یک بار آبیاری در مرحله گل‌دهی و دو بار آبیاری در مراحل گل‌دهی و پر شدن دانه) به عنوان عامل اصلی، تاریخ کشت (۲۷ بهمن، ۹ اسفند، ۲۱ اسفند برای کرمانشاه و ۶ و ۱۶ و ۲۴ اسفند برای ازنا) و رقم (بیله سوار، کیمیا و گچساران) به عنوان فاکتور فرعی بود. نتایج واسنجی مدل حاکی از دقت مناسب مقادیر پارامترهای گیاهی به کاررفته در ساختار مدل بود که منجر به پیش‌بینی بسیار دقیق ویژگی‌های رشد و عملکرد شد. نتایج ارزیابی‌ها نشان از دقت قابل قبول SSM-iCrop2 در شبیه‌سازی روند تغییرات مراحل نمو و عملکرد دانه ارقام در تیمارهای مورد بررسی داشت. مقدار RMSE مرحله نمو روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک در کرمانشاه برای ارقام بیله سوار، کیمیا و گچساران به ترتیب ۵/۲، ۴/۳ و ۵/۲ روز و در ازنا به ترتیب ۱۲/۹، ۱۲/۵ و ۱۱/۸ روز بود. مقدار RMSE عملکرد دانه در کرمانشاه از ۴/۱ تا ۱۵/۲ و ازنا از چهار تا هفت گرم در مترمربع بود. بنابراین می‌توان از مدل SSM-iCrop2 برای بررسی وضعیت مدیریت زراعی و تجزیه و تحلیل رشد و عملکرد عدس در شرایط کرمانشاه و ازنا استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: پارامترسازی، شبیه‌سازی، عملکرد دانه، مراحل نمو

مقدمه

دارد و تقریباً ۴۴ درصد از تولید جهانی را به خود اختصاص داده است و پس از آن هند، استرالیا، ترکیه و ایالات متحده قرار دارند. این پنج کشور ۸۲ درصد از کل تولید جهانی عدس را به خود اختصاص داده‌اند (FAO, 2023). حبوبات به عنوان دومین منبع مهم غذایی بعد از غلات حدود ۶۱۳ هزار هکتار از سطح زیرکشت سالانه محصولات زراعی را در ایران تشکیل می‌دهند. از نظر سطح زیرکشت، عدس بعد از نخود و لوبیا جایگاه سوم را در بین حبوبات داشته و استان‌های همدان، لرستان، کرمان، فارس و بوشهر مراکز اصلی تولید این گیاه هستند (Ministry of Agriculture, 2023). پروتئین دانه عدس در مقایسه با دیگر حبوبات، مانند نخود کیفیت بالاتری دارد (Oduro- Yeboah et al., 2023). کشت عدس به دلیل داشتن مقدار قابل توجهی مواد آلی و توانایی تثبیت نیتروژن از طریق همزیستی، نقش مهمی در حفظ و بهبود حاصلخیزی خاک ایفا می‌کند (Abraham, 2015).

در بین حبوبات، عدس (*Lens culinaris* Medik.) یک گیاه دانه‌ای یکساله است که از ۷۰۰۰ سال قبل از میلاد به عنوان اولین محصول اهلی شده است (Erskine et al., 2016). عدس یک محصول مغذی مهم است که به دلیل محتوای بالای مواد مغذی پرمصرف و کم‌مصرف، از جمله مواد معدنی، در سراسر جهان کشت و مصرف می‌شود (Benayad & Aboussaleh, 2021). این محصول سومین حبوبات مهم فصل سرد پس از نخود (*Cicer arietinum* L) و نخودفرنگی (*Pisum sativum* L.) در سراسر جهان است (Sehgal et al., 2021). کانادا با تولید ۲/۸۷ میلیون تن عدس در رتبه اول قرار

۱- گروه تولیدات گیاهی و ژنتیک، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران
(Email: f.mondani@razi.ac.ir)
* - نویسنده مسئول:
<https://doi.org/10.22067/jcesc.2025.94482.1417>

که شامل تقسیم ماده خشک بین برگ، ساقه، ریشه و اندام زایشی است و زیر مدل عملکرد نهایی^۶ که شامل تبدیل ماده خشک تجمع یافته به دانه یا اندام اقتصادی است (Soltani & Sinclair, 2012).

عملکرد مدل های گیاهی در شبیه سازی پاسخ گیاه به عوامل اقلیمی، خاکی، مدیریتی و ژنتیکی تا حدود زیادی به داده های ورودی و کیفیت پارامتریابی بستگی دارد (Manschadi et al., 2022). مدل های گیاهان زراعی از پارامترهای مختلف گیاهی و محیطی برای شبیه سازی رشد محصول استفاده می کنند و قبل از به کارگیری این مدل ها باید آن ها را پارامتریابی و سپس ارزیابی نمود (Hsiao et al., 2009). پارامتریابی عبارتست از تعیین پارامترها و ضرایب مدل برای منطقه مورد مطالعه به منظور تصحیح مراحل فنولوژی و عملکرد (Soltani & Sinclair, 2012). در تحقیقی که با هدف پارامتریابی و ارزیابی مدل SSM-iCrop2 برای شبیه سازی رشد و عملکرد لوبیای معمولی در ایران انجام گردید، گزارش شد که می توان از این مدل برای بررسی سیستم های زراعی و تفسیر نتایج در شرایط محیطی و مدیریتی متفاوت در جهت بهبود مدیریت مزارع لوبیا (Phaseolus vulgaris L.) با اطمینان استفاده کرد (Mohammadi et al., 2022). در مطالعه ای دیگر که به منظور تخمین پارامترهای SSM-iCrop و ارزیابی کارایی آن در پیش بینی رشد و نمو گیاه باقلا (Vicia faba L.) در گرگان انجام شده بود، نتایج نشان داد که با استفاده از پارامترهای به دست آمده، ارزیابی مدل حاکی از دقت قابل قبول مدل برای پیش بینی فنولوژی، شاخص سطح برگ، عملکرد وزن خشک کل و عملکرد دانه گیاه باقلا است (Torabi et al., 2020). مدل SSM-iCrop به واسطه دارا بودن مزیت هایی مانند تسهیل آزمون، کاربرد و درک تفسیر و نتایج و نیاز به حداقل ورودی ها در تجزیه و تحلیل عملکرد کاربرد بالایی دارد (Rahban et al., 2020). بنابراین پژوهش حاضر با هدف تخمین پارامترهای مدل SSM-iCrop2 برای گیاه عدس (ارقام بیلہ سوار، کیمیا و گچساران) و ارزیابی کارایی آن در پیش بینی رشد و نمو این گیاه در شرایط اقلیمی کرمانشاه و ازنا انجام شد.

مواد و روش ها

به منظور تهیه داده ها و اطلاعات مورد نیاز برای واسنجی و ارزیابی مدل SSM-iCrop2، پژوهش هایی در مزرعه تحقیقاتی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه رازی و شهرستان ازنا در مزرعه یک کشاورز پیشرو طی سال های ۱۴۰۰ و ۱۴۰۱ انجام گرفت. به این صورت که یک آزمایش به منظور استخراج پارامترهای مورد نیاز

برای افزایش بهره وری کشاورزی و سودآوری مزرعه، تعیین کمیت تعاملات بین خاک، رشد گیاه، عوامل محیطی و شیوه های مدیریتی بسیار مهم است. این امر به سیاست گذاران و کشاورزان در تصمیم گیری آگاهانه برای کاهش خطرات مرتبط با بهره وری کشاورزی کمک می کند (Banerjee). مدل سازی رشد گیاه اجازه می دهد تا فرضیه های مختلفی را آزمایش کرده و آزمایش های مجازی در مورد فرآیندهای رشد گیاه انجام شود که در غیر این صورت ممکن است این آزمایش ها به مدت زمان طولانی در شرایط مزرعه نیازمند باشد. انواع مختلفی از مدل های رشد گیاه، با درجات مختلف پیچیدگی، بسته به هدف از کاربرد آن ها وجود دارد (Fourcaud et al., 2008). SSM^۱ به گروهی از مدل های شبیه سازی گیاهی اطلاق می شود که ساخت آن ها به سال ۱۹۸۶ برمی گردد. در این زمان، سینکسر مدلی برای رشد و نمو سویا (*Glycin max* L.) تهیه کرد (Sinclair, 1986). طی ۳۰ سال بعد، ساختار این مدل بهبود یافت و تقریباً برای همه گیاهان زراعی قابل استفاده شد (Soltani et al., 2013). این مدل توانایی شبیه سازی مراحل نمو فیزیولوژیک (سبز شدن، شروع مؤثر پُر شدن دانه، پایان مؤثر پُر شدن دانه، شروع پیر شدن برگ و رسیدگی)، گسترش و پیری برگ، توزیع ماده خشک، تشکیل عملکرد و موازنه آب خاک را دارد. مدل شبیه سازی محصول SSM iCrop2N یک مدل ساده شده از مدل های محصول SSM است که برای شبیه سازی رشد، نمو و عملکرد محصولات مختلف در شرایط محیطی مختلف و برآورد مقیاس بزرگ تولید محصول به ویژه در ارزیابی اثرات اقلیمی مناسب است (Soltani et al., 2020). این مدل دارای کد باز بوده و از محیط اکسل برای ورودی و خروجی استفاده می کند. همچنین این مدل، شبیه سازی را به صورت روزانه انجام می دهد و از اطلاعات قابل دسترس آب و هوا، خاک و مدیریتی استفاده می کند. همچنین این مدل اثر آفات، بیماری ها و علف هرز را بر روی گیاه در نظر نمی گیرد. ساختار کلی مدل SSM به صورت مدل های ماژولار معرفی می شود که شامل چند زیر مدل اصلی است. زیر مدل فنولوژی^۲ که شامل مراحل فنولوژیک در مدل به عنوان تابعی از دما، طول روز و تنش کمبود آب است. زیر مدل توسعه سطح برگ^۳ که تعیین کننده گسترش سطح برگ و شاخص سطح برگ است. گسترش و پیری برگ ها تابعی از دما، مواد فتوسنتزی فراهم برای رشد برگ، تراکم بوته و انتقال مجدد نیتروژن است. زیرمدل تولید ماده خشک^۴ که در آن تولید ماده خشک به عنوان تابعی از تابش دریافت شده و دما تخمین زده می شود. زیرمدل تخصیص ماده خشک^۵

- 1- Simple Simulation Models
- 2- Phenology sub-model
- 3- Leaf Area Development
- 4- Dry Matter Production
- 5- Partitioning/Allocation

محل آزمایش مشخص گردید (جدول ۱). شهرستان کرمانشاه از نظر اقلیمی به‌عنوان اقلیم معتدل و نیمه‌خشک (مدیترانه‌ای) با میانگین دمای ۱۳/۴ درجه سانتی‌گراد محسوب می‌شود. شهرستان ازنا نیز با طول جغرافیایی ۴۹ درجه و ۴۵ دقیقه شرقی، عرض جغرافیایی ۳۳ درجه و ۴۵ دقیقه شمالی و ارتفاع از سطح دریا ۱۸۷۰ متر است. اطلاعات هواشناسی مناطق مورد بررسی در شکل ۱ نشان داده شده است.

برای واسنجی مدل تحت شرایط اقلیمی کرمانشاه در سال ۱۴۰۰ و سپس دو آزمایش دیگر جهت استخراج اطلاعات مورد نیاز برای تعیین اعتبار مدل تحت شرایط اقلیمی کرمانشاه و ازنا در سال ۱۴۰۱ اجرا گردید. موقعیت منطقه مورد مطالعه در این پژوهش، شهرستان کرمانشاه با طول جغرافیایی ۴۵ درجه و ۲۴ دقیقه شرقی، عرض جغرافیایی ۳۳ درجه و ۳۶ دقیقه شمالی و ارتفاع از سطح دریا ۱۳۲۰ متر بود. آنالیز خاک قبل از کاشت در دو عمق صفر تا ۳۰ و ۳۰ تا ۶۰ انجام شد و در نهایت خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک در هر دو

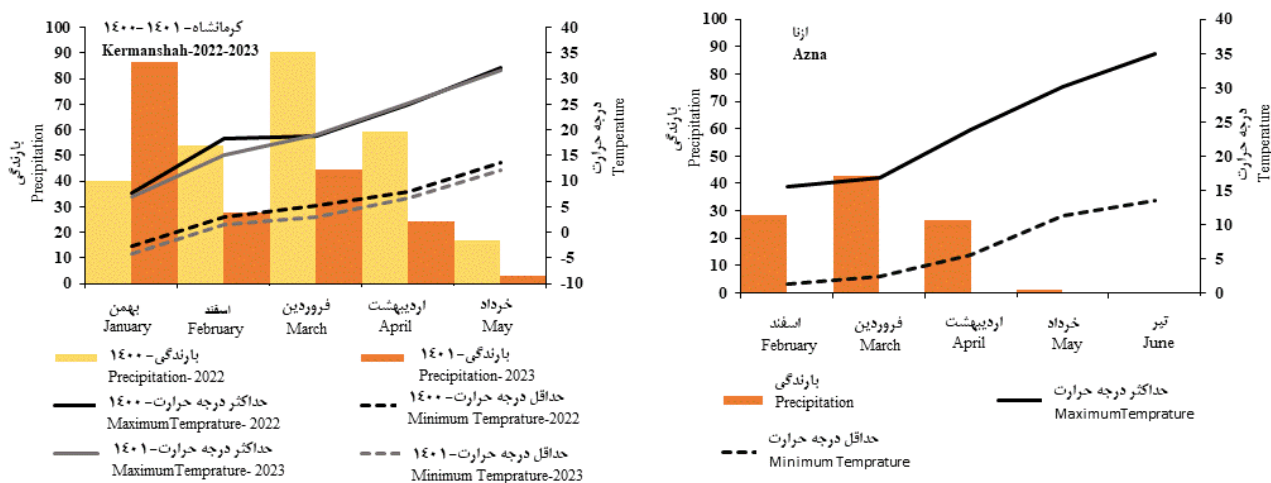
جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در محل اجرای آزمایش

Table 1- Soil physical and chemical traits in the region of experiment

منطقه Region	عمق Depth	کربن آلی Organic C (%)	شیب Slope	حد ظرفیت زراعی DUL (m)	مقدار آب در زمان اشباع SAT (m)	شماره منحنی خاک CN	نقطه پژمردگی LL (m)	زهکشی DRAINF
کرمانشاه Kermanshah	30	1.50	10	0.32	0.49	79	0.22	0.55
	60	1.10	10	0.32	0.49	79	0.22	0.55
ازنا Azna	30	1.8	10	0.35	0.45	79	0.23	0.55
	60	1.2	10	0.35	0.45	79	0.23	0.55

DUL: محتوای حجمی آب خاک در حد بالایی زهکشی‌شده، SAT: محتوای حجمی آب خاک در حالت اشباع، CN: شماره منحنی، LL: محتوای آب خاک در لایه L خاک در حد پایینی گیاه و DRAINF: ضریب زهکشی

DUL: volumetric soil water content at drained upper limit, SAT: volumetric soil water content at saturation, CN: curve number, LL: soil water content in soil layer L at lower limit of plant and DRAINF: drainage factor



شکل ۱- میانگین حداقل و حداکثر دماهای ماهانه و بارندگی تجمعی در طول فصل رشد عدس در کرمانشاه و ازنا

Figure 1- Average of minimum and maximum monthly temperatures and cumulative precipitation during the lentil growing season in Kermanshah and Azna

غلاف‌دهی) به‌عنوان عامل اصلی و تاریخ کشت و رقم به‌عنوان عامل فرعی در نظر گرفته شد. ارقام مورد مطالعه شامل سه رقم بیل‌سوار (ILL6037)، کیمیا (FLIP 92-12L) و گچساران بودند. ارقام در جدول ۲ معرفی شده‌اند.

آزمایش‌ها به‌صورت اسپلیت فاکتوریل در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. تیمارهای آزمایش شامل آبیاری تکمیلی (بدون آبیاری)، یک بار آبیاری تکمیلی در مرحله گل‌دهی و دو بار آبیاری تکمیلی در مراحل گل‌دهی و شروع

جدول ۲- خصوصیات ارقام مورد بررسی

Table 2- Characteristics of the studied cultivars

رقم Cultivar	طول دوره رشد Growth period (Day)	پتانسیل عملکرد Yield potential (kg ha ⁻¹)	وزن ۱۰۰ دانه 100-seed weight (g)
کیمیا Kimiya	90-110	1263	5
بیلہ سوار Bilehsavar	90-110	1196	5.7
گچساران Gachsaran	90-110	1200	5

مورد نظر، کشت بذر ضد عفونی شده (مانکوزب با غلظت دو در هزار) عدس به صورت دستی در عمق سه سانتی متری کشت گردید. مهیار علف های هرز به صورت وجین دستی انجام گرفت. کود اوره به میزان ۴۰ کیلوگرم در هکتار در دو نوبت (شش برگچه ای و قبل از گل دهی) تقسیم گردید. آبیاری تکمیلی توسط لوله پلی اتیلن و نوار تیپ و به صورت قطره ای در مراحل نمو گل دهی و پر شدن دانه انجام گرفت. حجم آب ورودی به هر کرت توسط کنتور اندازه گیری شد (جدول ۳).

کشت به صورت بهار انجام گرفت. تاریخ کشت در منطقه کرمانشاه بر مبنای بارندگی مؤثر (اولین بارندگی کافی برای جوانه زنی و استقرار گیاه) در تاریخ های ۲۷ بهمن، ۹ اسفند و ۲۱ اسفند و در منطقه ازنا بر مبنای بارندگی مؤثر شامل ۶ اسفند، ۱۶ اسفند و ۲۴ اسفند بود. آماده سازی و تسطیح زمین قبل از کشت با توجه به تاریخ کشت با استفاده از گاواهن قلمی انجام گرفت. ابعاد هر کرت فرعی ۲/۲۵ در سه متر، فاصله روی ردیف ۲/۵ سانتی متر، فاصله بین ردیف ۲۵ سانتی متر و فاصله بین رژیم های آبیاری سه متر در نظر گرفته شد. هر کرت فرعی شامل چهار ردیف کشت بود. سپس در تاریخ های

جدول ۳- میزان آب آبیاری و زمان مصرف آب آبیاری تکمیلی برای مناطق کرمانشاه و ازنا

Table 3- Irrigation water amount and time of supplementary irrigation consumed for Kermanshah and Azna regions

منطقه Region	تاریخ کشت Sowing date	زمان اعمال تیمار آبیاری (روز پس از کاشت) Irrigation timing (day after planting)		حجم آبیاری Irrigation volume (mm)	
		یک بار آبیاری Single-irrigation	دو بار آبیاری Double-irrigation	یک بار آبیاری Single-irrigation	دو بار آبیاری Double-irrigation
کرمانشاه Kermanshah	۲۷ بهمن February 16	75	80	46.4	62.2
	۹ اسفند February 28	79	85	46.7	64
	۲۱ اسفند March 12	64	72	44.6	66.7
	۶ اسفند February 25	80	93	35	57.6
ازنا Azna	۱۶ اسفند March 6	81	91	37	59.3
	۲۴ اسفند March 14	68	81	41	59.3

روزانه ET، مجموع آن در طول هر مرحله رشدی (مرحله گل دهی و مرحله پر شدن غلاف) به عنوان نیاز آبی گیاه در آن مرحله در نظر گرفته شد. مقدار ضریب Kc برای کرمانشاه برای دوره گل دهی و پر شدن بذر به ترتیب برابر با ۰/۷ و ۱/۰۸ (Saremi et al., 2015) بود و برای ازنا برای دوره گل دهی و پر شدن بذر به ترتیب برابر با ۰/۸۹ و ۱/۱۹ (Allen et al., 1998) بود.

پس از سبز شدن (مرحله شش برگچه ای) تا زمان رسیدگی

برآورد نیاز آبی گیاه با استفاده از تشتک تبخیر از رابطه (۱) محاسبه گردید.

$$ET = Kc \times Kpan \times ETpan \quad (1)$$

که در آن، ET: تبخیر و تعرق گیاه (میلی متر در روز)، ETpan: تبخیر و تعرق از تشتک (میلی متر در روز)، kpan: ضریب تشت (برای کرمانشاه ۰/۷ و برای ازنا ۰/۸) و Kc: ضریب گیاهی براساس مرحله رشد گیاه است (Ghamarnia et al., 2023). پس از محاسبه مقدار

فرایندهای مختلف نمو فنولوژیک، تغییرات سطح برگ، تولید ماده خشک، تشکیل عملکرد و روابط آب و گیاه و اطلاعات مربوط به خاک منطقه مورد نظر از جمله عمق خاک، ضریب الییدو، فاکتور زهکشی، شماره خاک برای محاسبه رواناب، مقدار آب در زمان اشباع (برحسب میلی‌متر)، مقدار آب در زمان ظرفیت زراعی (برحسب میلی‌متر) و مقدار آب قابل دسترس (برحسب میلی‌متر) است. اطلاعات خاک‌شناسی از نتایج آزمون خاک محل اجرای تحقیق استخراج شد (جدول ۱).

واسنجی پارامترهای مدل SSM-iCrop2

برای واسنجی مدل، پارامترهای مورد نیاز از اطلاعات آزمایش اجرا شده تحت شرایط اقلیمی کرمانشاه در سال ۱۴۰۰ استخراج شد (جدول ۴). به‌منظور واسنجی مدل اطلاعات ورودی شامل جزئیات مدیریت زراعی (سال و تاریخ کاشت، زمان و مقدار آبیاری) و ویژگی‌های خاک و پارامترهای مورد نظر برای منطقه اجرای آزمایش که از نمونه‌برداری خاک مندرج در جدول ۱ استخراج گردید، استفاده شد. داده‌های هواشناسی روزانه (حداقل و حداکثر دما، ساعات آفتابی و میزان بارش) برای منطقه مورد نظر از سازمان هواشناسی کشور تهیه گردید. با استفاده از برنامه Srad-Calc (Soltani & Sinclair, 2012) میزان تشعشع خورشیدی براساس ساعت آفتابی و روز از سال محاسبه شد. براساس منابع مربوط به مدل SSMiCrop2، پارامترهای گیاهی زیادی در شبیه‌سازی مدل به کار می‌روند. اما با توجه به ماهیت مدل و نقش فنولوژیکی این عوامل در رشد و عملکرد گیاه، اثر آن‌ها در نهایت از طریق کاهش سه پارامتر اصلی اعمال شده و باعث افت رشد و عملکرد گیاه می‌شود. این سه پارامتر عبارت از حداکثر شاخص سطح برگ (LAIMX)، حداکثر شاخص برداشت (HLMX) و واحد دمای کاشت تا برداشت (tu HAR) است (Soltani et al., 2020). ابتدا روز از کاشت تا رسیدگی فنولوژیک (زمانی که دانه‌ها کاملاً شکل گرفته و غلاف‌های یک سوم پایینی گیاه به رنگ قهوه‌ای است و غلاف‌ها هنگام تکان دادن صدا می‌دهند) در مزرعه برای هر رقم و تیمار ثبت شد (Erskin et al., 1990) و سپس مقدار میانگین درجه روز رشد طبق فرمول (رابطه ۲) محاسبه شد و به‌عنوان پارامتری برای tu HAR وارد مدل شد تا روز از کاشت تا رسیدگی فنولوژیک با مزرعه منطبق شود. برای انطباق میزان وزن خشک کل نیز باید حداکثر شاخص سطح برگ در مدل برای هر رقم و تیمار وارد شود. در نهایت میزان عملکرد دانه از طریق حداکثر شاخص برداشت تعیین گردد.

$$GDD = T_{base} - \frac{T_{min} + T_{max}}{2} \quad (2)$$

فیزیولوژیک، در مراحل مختلف نمو، از هر کرت به‌صورت تصادفی سه بوته برداشت شد. بعد از رسیدگی فنولوژیک (قهوه‌ای رنگ شدن غلاف‌ها) و انتهای فصل رشد، جهت برداشت نهایی، دو ردیف از هر کرت به‌صورت کف‌بر برداشت شد. سپس جهت تعیین وزن خشک کل، ابتدا نمونه‌ها به مدت زمان ۴۸ ساعت در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد در آون قرار داده شدند و سپس توسط ترازو توزین گردید. جهت تعیین عملکرد دانه، غلاف‌ها جدا شده و سپس کاه و کلش آن تمیز گردید و توزین شد. برای جلوگیری از ریزش و پوک شدن غلاف‌ها زمانی که رطوبت دانه حدود ۱۵ تا ۱۶ درصد بود، برداشت انجام شد. سطح برگ با استفاده از نرم‌افزار Microvision ز محاسبه گردید. مساحت برگ‌های هر بوته با تصویربرداری از آن‌ها محاسبه و شاخص سطح برگ در هر تیمار با تعمیم این مقدار در واحد مترمربع محاسبه شد. در پایان با استفاده از داده‌های حاصل، پارامترهای گیاهی مدل تخمین زده شدند.

توصیف مدل

مدل SSM-iCrop2 یک مدل شبیه‌سازی گیاه زراعی و نسخه ساده‌شده‌ای از مدل اصلی SSM است (Soltani et al., 2013). این مدل توانایی شبیه‌سازی مراحل نمو فنولوژیک (سبز شدن، شروع مؤثر پُر شدن دانه، پایان مؤثر پُر شدن دانه، شروع پیر شدن برگ و رسیدگی)، گسترش و پیری برگ، توزیع ماده خشک، تشکیل عملکرد و موازنه آب خاک را دارد. این مدل دارای کد باز بوده و از محیط اکسل برای ورودی و خروجی استفاده می‌شود. در این مدل، شبیه‌سازی‌ها به‌صورت روزانه انجام می‌گیرد. این مدل اثر آفات، بیماری‌ها و علف‌هرز را بر رشد و نمو گیاه شبیه‌سازی نمی‌کند. مراحل نمو فنولوژیک در مدل به‌عنوان تابعی از دما، طول روز و تنش کمبود آب است. گسترش و پیری برگ‌ها تابعی از دما، مواد فتوسنتزی فراهم برای رشد برگ، تراکم بوته و انتقال مجدد نیتروژن است (Soltani et al., 2013). تولید ماده خشک به‌عنوان تابعی از تابش دریافت‌شده و دما تخمین زده می‌شود. در مدل SSM به‌دلیل استفاده از روش‌ها و الگوریتم متفاوت و جدید در ساختار مدل برای بیان گسترش و پیری برگ‌ها و همچنین توزیع ماده خشک، شبیه‌سازی نمو فنولوژیک و تولید ماده خشک نیاز به پارامترهای ورودی کمتری نسبت به سایر مدل‌ها دارد (Soltani et al., 2020).

ورودی‌های مدل شامل اطلاعات روزانه آب‌وهوا (دمای حداکثر و حداقل برحسب (درجه سانتی‌گراد)، تشعشع (برحسب مگاژول در مترمربع) و بارندگی (بر حسب میلی‌متر)، اطلاعات مربوط به منطقه مورد مطالعه (عرض جغرافیایی، کمبود فشار بخار، غلظت دی‌اکسید کربن و تغییرات دما و بارندگی)، پارامترهای گیاهی مرتبط با

جدول ۴- پارامترهای مورد استفاده برای واسنجی مدل

Table 4- Attributes used in model calibration

تاریخ کاشت Sowing date	آبیاری Irrigation	حداکثر شاخص سطح برگ Maximum leaf area index (LAIMX)			حداکثر شاخص برداشت Maximum harvest index (HLMX)			واحد دمایی کاشت تا برداشت Thermal units from planting to harvest (tuHAR)		
		کیمیا Kimiya	بيله سوار Belehsavar	گچساران Gachsaran	کیمیا Kimiya	بيله سوار Belehsavar	گچساران Gachsaran	کیمیا Kimiya	بيله سوار Belehsavar	گچساران Gachsaran
۲۷ بهمن February 16th	بدون آبیاری No irrigation	2.2	2.5	2.3	0.28	0.28	0.27	1417	1405	1444
	یک بار آبیاری One irrigation	2.4	2.6	2.5	0.29	0.29	0.28	1417	1405	1444
	دو بار آبیاری Two irrigations	2.6	2.7	2.6	0.29	0.29	0.28	1417	1405	1444
۶ اسفند February 28th	بدون آبیاری No irrigation	2.2	2.3	2.1	0.28	0.28	0.27	1470	1459	1495
	یک بار آبیاری One irrigation	2.3	2.4	2.2	0.29	0.29	0.28	1470	1459	1495
	دو بار آبیاری Two irrigations	2.4	2.5	2.2	0.29	0.29	0.28	1470	1459	1495
۲۱ اسفند March 12th	بدون آبیاری No irrigation	2.1	2.2	2	0.28	0.28	0.27	1502	1490	1526
	یک بار آبیاری One irrigation	2.2	2.3	2.1	0.29	0.28	0.28	1502	1490	1526
	دو بار آبیاری Two irrigations	2.3	2.3	2.2	0.29	0.28	0.28	1502	1490	1526

تعیین اعتبار مدل

شاخص‌های ارزیابی مورد استفاده شامل برازش رگرسیون خطی بین داده‌های مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده و مقایسه آن‌ها با شیب خط ۱:۱، جذر میانگین مربعات خطا^۱ (RMSE)، جذر میانگین مربعات خطا نرمال‌شده^۲ (nRMSE)، میانگین خطای تقریبی^۳ (MBE) و شاخص توافق ویلموت^۴ (d) بود که از طریق روابط (۳) تا (۶) محاسبه شدند. برای ارزیابی مدل از داده‌های اندازه‌گیری شده مراحل نمو فنولوژیک (گل‌دهی و رسیدگی فیزیولوژیک) و عملکرد دانه در

آزمایش‌های اجراشده تحت شرایط اقلیمی کرمانشاه و ازنا در سال

۱۴۰۱ استفاده شد.

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=0}^n \frac{(s_1 - o_i)^2}{n}} \quad (3)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=0}^n (s_i - o_i)^2}{\sum_{i=0}^n (|s_i - \bar{o}| + |o_i - \bar{o}|)^2} \quad (4)$$

$$nRMSE(\%) = \sqrt{\sum_{i=0}^n \frac{(s_1 - o_i)^2}{n}} \times \frac{100}{\bar{o}} \quad (5)$$

$$MBE = \sum_{i=0}^n \frac{(s_1 - o_i)}{n} \quad (6)$$

که در آن‌ها، n: تعداد مشاهدات، O_i: مقادیر مشاهده‌شده، S_i:

مقادیر شبیه‌سازی‌شده و O: میانگین مقدار مشاهده‌شده برای مشاهده

i ام است (Willmott, 1982). مقادیر شاخص ویلموت می‌توانند بین ۰ و

۱ متغیر باشد، مقدار ۱ نشانگر توافق کامل بین داده‌های شبیه-

1- Root mean square error

2- Normalized root mean squared error

3- Mean bias error

4- Willmott indrx of Agreement

دانه رقم کیمیا بین ۸ تا ۹۳ کیلوگرم در هکتار، رقم بیلہ سوار بین ۱۹ تا ۱۳۸ کیلوگرم در هکتار و رقم گچساران بین ۱۳ تا ۹۰ کیلوگرم در هکتار متغیر بود. مقدار جذر میانگین مربعات خطا، جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده و میانگین خطای تقریبی برای عملکرد دانه رقم کیمیا به‌ترتیب ۷/۸ کیلوگرم در هکتار، ۷/۴ درصد میانگین مشاهدات و ۷۸/۸، برای رقم بیلہ سوار به‌ترتیب ۶۸ کیلوگرم در هکتار، ۸/۲ درصد میانگین مشاهدات و ۱۱۵/۱ و برای رقم گچساران به‌ترتیب ۷/۲ کیلوگرم در هکتار، ۶/۸ درصد میانگین مشاهدات و ۱۰۵ بود (شکل ۲). همچنین نتایج برازش رگرسیون خطی بین داده‌های مشاهده‌شده و شبیه‌سازی شده و مقایسه آن با شیب خط ۱:۱ نیز نشان داد که مدل قادر است بیش از ۹۵ درصد تغییرات مشاهده‌شده عملکرد دانه را پیش‌بینی کند (شکل ۲). مقدار جذر میانگین مربعات خطا، جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده و میانگین خطای تقریبی برای وزن خشک کل در رقم کیمیا به‌ترتیب ۳۰ کیلوگرم در هکتار، ۲۹/۳ درصد میانگین مشاهدات و ۴۷۹، برای رقم بیلہ سوار به‌ترتیب ۸/۶ کیلوگرم در هکتار، ۴/۹ درصد میانگین مشاهدات و ۱۶۱ و برای رقم گچساران به‌ترتیب ۴ کیلوگرم در هکتار، ۳/۸ درصد میانگین مشاهدات و ۲۲۶ بود (شکل ۲).

همچنین نتایج برازش رگرسیون خطی بین داده‌های مشاهده‌شده و شبیه‌سازی شده و مقایسه آن با شیب خط ۱:۱ نیز نشان داد که مدل قادر است بیش از ۹۷ درصد تغییرات مشاهده‌شده عملکرد دانه را پیش‌بینی کند (شکل ۲). مقدار جذر میانگین مربعات خطا، جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده و میانگین خطای تقریبی برای شاخص سطح برگ در رقم کیمیا به‌ترتیب ۱.۵، ۱/۴ درصد میانگین مشاهدات و ۰/۰۱، برای رقم بیلہ سوار و گچساران به‌ترتیب برابر با صفر بود (شکل ۲). همچنین نتایج برازش رگرسیون خطی بین داده‌های مشاهده‌شده و شبیه‌سازی شده و مقایسه آن با شیب خط ۱:۱ نیز نشان داد که مدل قادر است بیش از ۹۹ درصد تغییرات مشاهده‌شده سطح برگ را پیش‌بینی کند (شکل ۲).

به‌طور کلی، نتایج شاخص‌های آماری نشان داد که دقت پارامترهای گیاهی انتخاب‌شده در فرآیند واسنجی مدل SSM-iCrop2 قابل قبول بود. مطالعات متعدد نتایج مشابهی از واسنجی مدل SSM-iCrop2 را گزارش کرده‌اند. در تحقیقی دیگر گزارش شد که پارامترهای به‌کاررفته در مدل SSM-iCrop2 از دقت قابل قبولی برخوردار است (اگر مقدار جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) کمتر از ۱۰ درصد باشد در سطح عالی، بین ۱۰ تا ۲۰ درصد خوب، بین ۲۰ تا ۳۰ درصد قابل قبول و در صورتی که بیش از ۳۰ درصد باشد در سطح ضعیف ارزیابی می‌شود)، به‌گونه‌ای که مقدار جذر میانگین مربعات خطای روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک سویا ۱۲ روز گزارش شد که حاکی از دقت نسبتاً خوب بود (Nehbandani et al., 2020). در مطالعه‌ای دیگر که با هدف پارامتریابی و ارزیابی مدل

سازی شده و مشاهده‌شده است. جذر میانگین مربعات خطا نیز اطلاعاتی در مورد انحراف کلی بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده‌شده ارائه می‌دهد. میانگین مربعات خطای نرمال شده (%) تفاوت نسبی داده‌های شبیه‌سازی شده در مقابل مشاهده‌شده را نشان می‌دهد و با نزدیک شدن به صفر دقت شبیه‌سازی مدل افزایش می‌یابد. مقادیر مثبت میانگین خطای تقریبی نشان‌دهنده این است که مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل بیش‌تر از مقادیر واقعی و مقادیر منفی آن بیانگر این است که مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل کم‌تر از مقادیر واقعی است. علاوه بر این، تطابق خط ۱:۱ نشان می‌دهد که مدل توانسته صفت مورد نظر را با دقت بالایی پیش‌بینی کند.

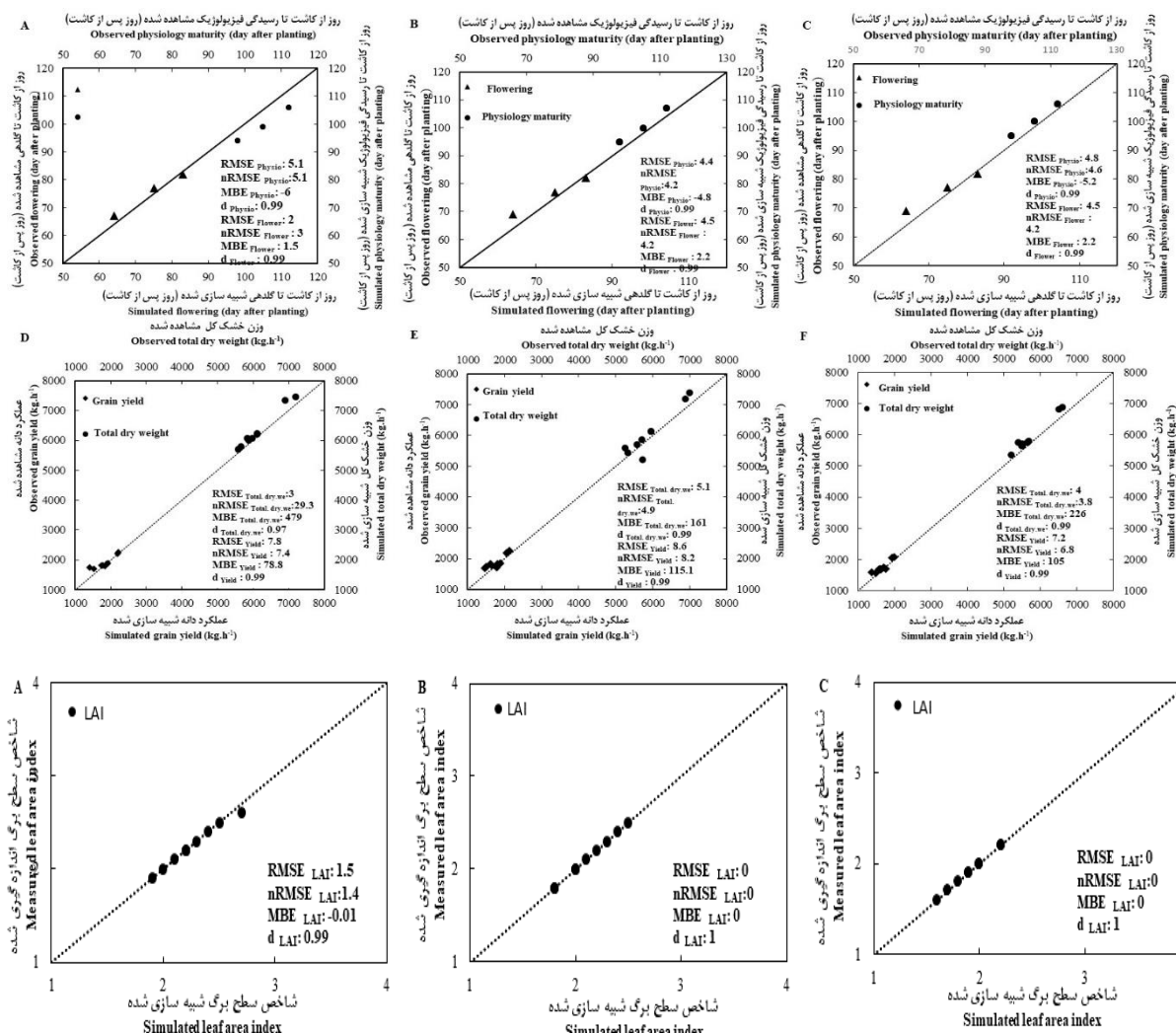
نتایج و بحث

واسنجی مدل

مراحل فنولوژی نقش بسزایی در سیستم مدیریت کشت دارند و به همین دلیل، تعیین دقیق پارامترهای مرتبط با فنولوژی اهمیت زیادی در کارهای شبیه‌سازی دارند (Nehbandani & Soltani, 2015). نتایج واسنجی مدل SSM-iCrop2 نشان داد که پارامترهای تخمین زده‌شده (جدول ۴) در ساختار مدل از دقت قابل قبولی برای شبیه‌سازی مراحل نمو فنولوژیک و عملکرد دانه ارقام عدس مورد بررسی در تیمارهای آزمایش برخوردار است (شکل ۲). مقدار جذر میانگین مربعات خطا، جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده و میانگین خطای تقریبی برای مراحل نمو از کاشت تا گل‌دهی رقم کیمیا به‌ترتیب برابر با ۲ روز، ۳ درصد میانگین مشاهدات و ۱/۵، رقم بیلہ سوار به‌ترتیب برابر با ۴/۵ روز، ۴/۲ درصد میانگین مشاهدات و ۲/۲ و رقم گچساران به‌ترتیب برابر با ۴/۵ روز، ۴/۲ درصد میانگین مشاهدات و ۲/۲ بود. در هر سه رقم و شرایط تیمارهای آبیاری، شاخص ویلموت (d) برابر با ۰/۹۹ بود. مقدار جذر میانگین مربعات خطا، جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده و میانگین خطای تقریبی برای مراحل نمو روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک برای رقم کیمیا به‌ترتیب برابر با ۵/۱ روز، ۵/۱ درصد میانگین مشاهدات و ۶-، برای رقم بیلہ سوار به‌ترتیب برابر با ۴/۴ روز، ۴/۲ درصد میانگین مشاهدات و ۴/۸ - و رقم گچساران به‌ترتیب برابر با ۴/۸ روز، ۴/۶ درصد میانگین مشاهدات و ۵/۲- بود. شاخص ویلموت (d) برای مراحل نمو روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک ارقام مورد بررسی در شرایط تیمارهای آزمایش برابر با ۰/۹۹ بود. نتایج برازش رگرسیون خطی بین داده‌های مشاهده‌شده و شبیه‌سازی شده و مقایسه آن با شیب خط ۱:۱ نیز نشان داد که مدل قادر است بیش از ۹۰ درصد تغییرات مشاهده‌شده مراحل نمو روز از کاشت تا گل‌دهی و روز از کاشت تا گل‌دهی و رسیدگی فیزیولوژیک را پیش‌بینی کند (شکل ۲). اختلاف بین داده‌های اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده عملکرد

اظهار داشتند که می‌توان از مدل SSM-iCrop2 برای بررسی سیستم‌های زراعی و تفسیر نتایج در شرایط محیطی و مدیریتی متفاوت در جهت بهبود مزارع لوبیا با اطمینان استفاده کرد.

SSM-iCrop2 برای شبیه‌سازی رشد و عملکرد لوبیای معمولی انجام شده بود، نتایج نشان داد که جذر میانگین مربعات خطای عملکرد دانه برابر با ۶۲ گرم در مترمربع بود (Mohammadi et al., 2022). آن‌ها



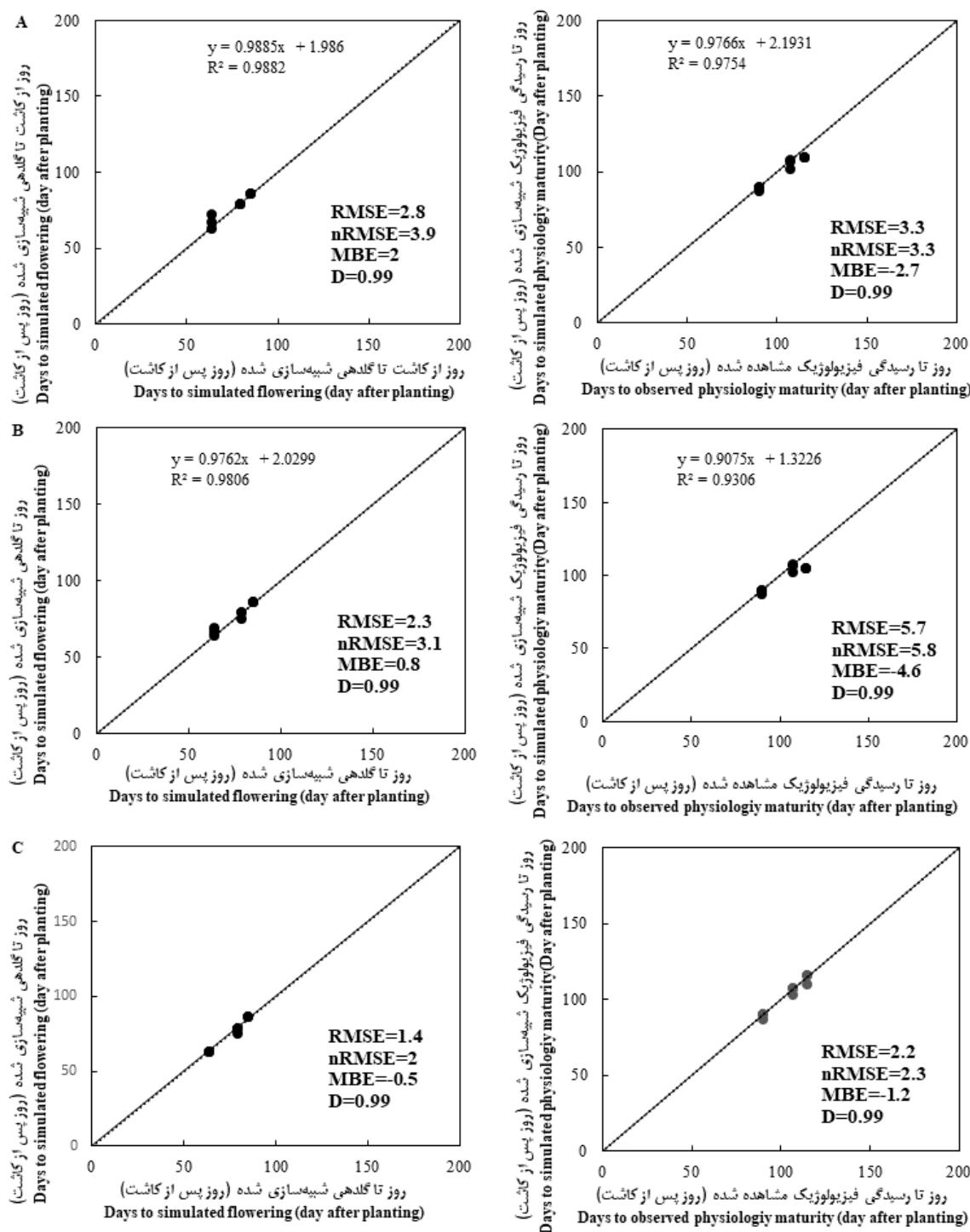
شکل ۲- نتایج واسنجی: مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه گیری شده مراحل نمو روز از کاشت تا گل‌دهی و رسیدگی فیزیولوژیک (شکل A: رقم کیمیا، شکل B: رقم بیل‌سوار، شکل C: رقم گچساران)، عملکرد دانه و وزن خشک کل ارقام عدس (شکل D: رقم کیمیا، شکل E: رقم بیل‌سوار، شکل F: رقم گچساران) در شرایط تیمارهای آبیاری و تاریخ‌های مختلف کاشت

Figure 2- The results of calibration: comparison of simulated and measured values of number of days from sowing to anthesis date and to physiological maturity (A: Kimiya, B: Bilehsavar, C: Gachsaran), grain yield and total dry weight of lentil cultivars (D: Kimiya, E: Bilehsavar, F: Gachsaran) in different sowing dates and different irrigation

مشاهده‌شده به‌ترتیب مربوط به تاریخ کشت ۲۷ بهمن در هر سه تیمار آبیاری و تاریخ کشت ۲۱ اسفند در هر سه تیمار آبیاری بود. بیش‌ترین طول دوره نمو روز از کاشت تا گل‌دهی شبیه‌سازی شده به‌میزان ۸۶ روز نیز مربوط به تاریخ کشت ۲۷ بهمن، در هر سه رقم و هر سه تیمار آبیاری و کمترین آن مربوط به تاریخ کشت ۲۱ اسفند، رقم گچساران و در هر سه تیمار آبیاری به‌میزان ۶۳ روز بود (شکل ۳).

ارزیابی مدل نمو فنولوژیک

برای ارزیابی مدل از داده‌های مزرعه‌ای در سال دوم کرمانشاه و ازنا استفاده شد. در شرایط اقلیمی کرمانشاه بیش‌ترین (۸۵ روز) و کم‌ترین (۶۴ روز) طول دوره نمو روز از کاشت تا گل‌دهی



شکل ۳- آنالیز رگرسیون بین مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده مراحل نمو روز از کاشت تا گل‌دهی و روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک و همچنین نتایج شاخص‌های ارزیابی مدل SSM-iCrop2 در تاریخ کاشت‌ها و تیمارهای مختلف آبیاری تحت شرایط اقلیمی کرمانشاه.

A: رقم کیمیا B: رقم بیل‌سوار و C: رقم گچساران

Figure 3- Regression analysis between simulated and measured values of phenological stages (days from planting to flowering and days from planting to physiological maturity), as well as the evaluation results of the SSM-iCrop2 model indices under different planting dates and irrigation treatments in the climatic conditions of Kermanshah. A: Kimiya cultivar, B: Bilihsavar cultivar and C: Gachsaran cultivar.

خطای نرمال شده به ترتیب ۱۰/۷، ۱۰/۹ و ۱۰/۹ درصد مشاهدات بود (شکل ۴).

میزان جذر میانگین مربعات خطای مرحله نمو روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک ارقام مورد بررسی از ۱۱/۸ تا ۱۲/۹ روز و جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده از ۱۰ تا ۱۱ درصد میانگین مشاهدات متغیر بود. میانگین خطای تقریبی نیز برای مرحله نمو روز از کاشت تا گل دهی مثبت و برای مرحله نمو روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک منفی بود. ضریب توافق ویلموت (d) برای صفات روز از کاشت تا گل دهی و روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک بیش از ۰/۹ بود که حاکی از دقت بسیار بالای مدل SSM-iCrop2 در شبیه سازی مراحل نمو فنولوژیک ارقام عدس مورد بررسی در شرایط اقلیمی ازنا است. نتایج برازش رگرسیون خطی بین داده های مشاهده شده و شبیه سازی شده و مقایسه آن با شیب خط ۱:۱ نیز نشان داد که مدل توانست بیش از ۹۰ درصد تغییرات مشاهده شده مراحل نمو روز از کاشت تا گل دهی و روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک را پیش بینی کند (شکل ۴). برای شبیه سازی با کیفیت بالا به داده های ورودی با کیفیت (آب و هوا، خاک، مدیریت)، آمارها (سطح زیرکشت، منابع آب و زمین)، روش دقیق مقیاس بندی و یک مدل زراعی که دقیق پارامتریابی شده باشد، نیاز است. یکی از دلایل دقت بالای مدل SSM-iCrop2 در شبیه سازی مراحل نمو فنولوژیک عدس در این مطالعه را می توان دقت در ثبت مراحل مختلف فنولوژیکی برای برآورد پارامترها و ارزیابی مدل ذکر کرد. پیش بینی نمو فنولوژیک گیاه اهمیت زیادی دارد، چون تولید و توزیع ماده خشک در مدل های شبیه سازی گیاهان زراعی تحت تأثیر زمان وقوع مراحل فنولوژیک است (Soltani et al., 2006).

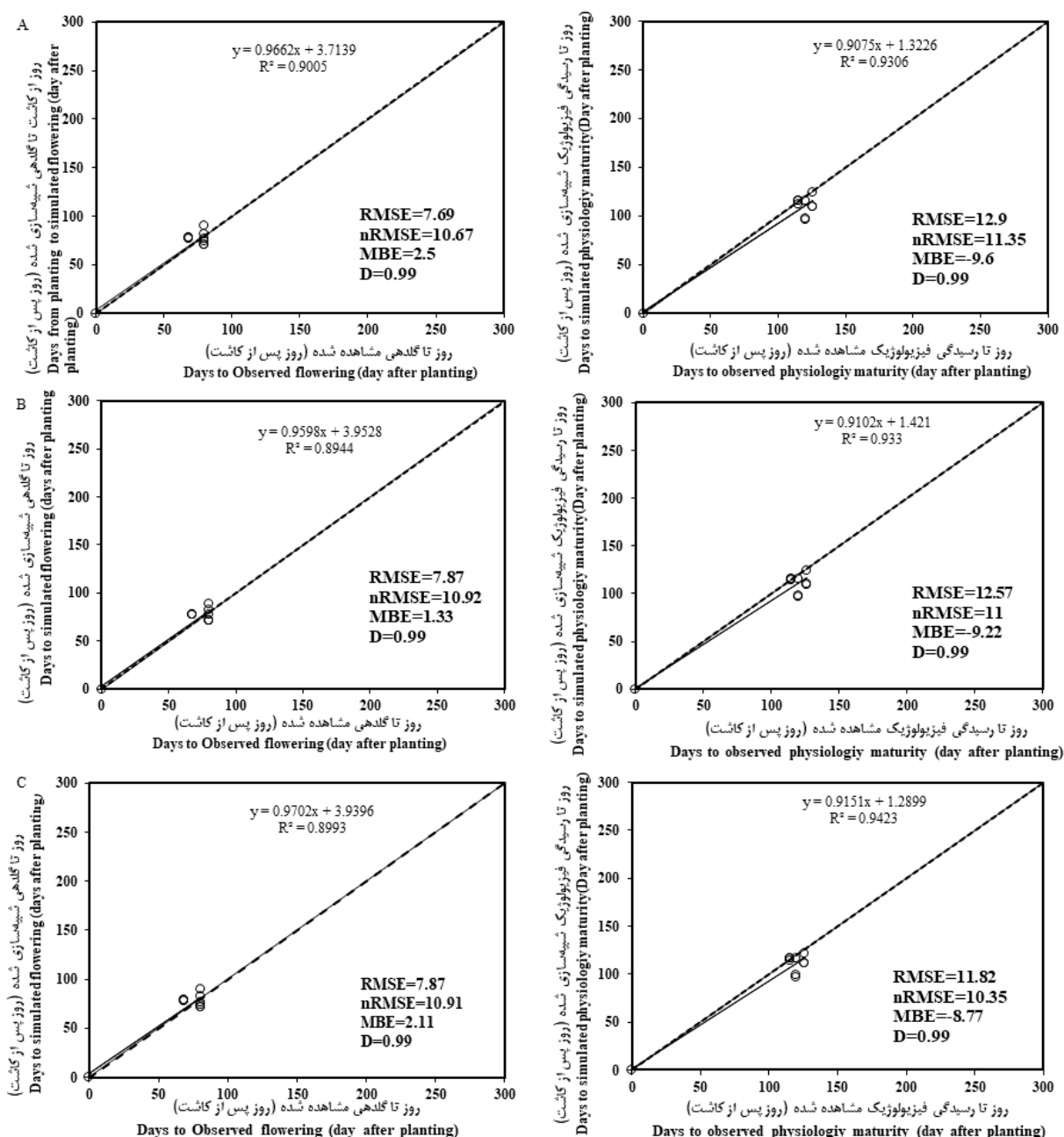
نتایج حاصل از شبیه سازی تعیین اعتبار مراحل نمو فنولوژیک گیاه باقلا نشان داد که مدل SSM-iCrop2 با دقت زیادی مراحل روز از کاشت تا گل دهی و رسیدگی فیزیولوژیک را پیش بینی کرده است، به گونه ای که مقدار جذر میانگین مربعات خطا برای روز از کاشت تا گل دهی ۳/۸ روز و برای روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک ۱۱/۹ روز بود (Torabi et al., 2020). حاجی شعبانی و همکاران (Hajishabani et al., 2020) میزان جذر میانگین مربعات خطا برای مرحله نمو روز از کاشت تا گل دهی و روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک نخود را نیز با استفاده از مدل CROPGRO-Chickpea به ترتیب ۲/۹ و ۲/۷ روز گزارش کردند (Hajishabani et al., 2020). در مطالعه ای دیگر، نسبت مقدار جذر میانگین مربعات خطای روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک سویا در شرایط آب و هوایی گرگان با استفاده از مدل SSM-iCrop2 برابر با ۸/۷ روز به دست آمد (Nehbandani & Soltani, 2016). این محققان اظهار داشتند که مدل SSM-iCrop2 توانست با دقت بالایی مراحل نمو فنولوژیک

در شرایط مزرعه، بیشترین طول دوره نمو روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک مربوط به تاریخ کشت ۲۷ بهمن به میزان ۱۱۵ روز برای هر سه رقم و هر سه تیمار آبیاری و کمترین آن مربوط به تاریخ کشت ۹ اسفند برای هر سه رقم و هر سه تیمار آبیاری به میزان ۹۰ روز بود. در شرایط شبیه سازی نیز بیشترین طول دوره نمو روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک (۱۱۶ روز) برای رقم گچساران در تیمارهای یک بار و دو بار آبیاری و کمترین آن (۸۷ روز) برای دیگر ارقام و در شرایط تیمار بدون آبیاری بود (شکل ۳).

نتایج شاخص های ارزیابی مدل SSM-iCrop2 نشان داد که تحت شرایط اقلیمی کرمانشاه، میزان جذر میانگین مربعات خطای روز از کاشت تا گل دهی برای ارقام بیله سوار، کیمیا و گچساران به ترتیب برابر با ۵/۷، ۳/۳ و ۲/۲ روز و جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده نیز به ترتیب ۵/۸، ۳/۳ و ۲/۳ درصد مشاهدات بود (شکل ۳). میانگین خطای تقریبی نیز برای مرحله نمو روز از کاشت تا گل دهی تنها در رقم گچساران منفی و برای مرحله نمو روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک در تمام ارقام منفی بود. ضریب توافق ویلموت (d) برای مرحله نمو روز از کاشت تا گل دهی و روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک بیش از ۰/۹ بود که حاکی از دقت بسیار بالای مدل SSM-iCrop2 در شبیه سازی مراحل نمو ارقام عدس تحت شرایط اقلیمی کرمانشاه است. نتایج برازش رگرسیون خطی بین داده های مشاهده شده و شبیه سازی شده و مقایسه آن با شیب خط ۱:۱ نیز نشان داد که مدل قادر است بیش از ۹۰ درصد تغییرات مشاهده شده مراحل نمو روز از کاشت تا گل دهی و روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک را تحت شرایط اقلیمی کرمانشاه پیش بینی کند (شکل ۳). نتایج همچنین نشان داد که در شرایط اقلیمی ازنا، بیشترین و کمترین طول دوره نمو روز از کاشت تا گل دهی اندازه گیری شده برای هر سه رقم مورد مطالعه در تاریخ کاشت های ۶ و ۲۴ اسفند به ترتیب معادل ۸۰ و ۶۸ روز مشاهده شد. بیشترین و کمترین طول دوره نمو روز از کاشت تا گل دهی شبیه سازی شده نیز مربوط به تاریخ کاشت های ۶ و ۲۴ اسفند به ترتیب معادل ۹۰ روز و ۷۷ روز برای رقم بیله سوار بود (شکل ۴). در شرایط مزرعه، بیشترین طول دوره نمو روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک مربوط به تاریخ ۶ اسفند برای هر کدام از ارقام مورد بررسی به میزان ۱۲۶ روز و کمترین آن مربوط به تاریخ کشت ۲۴ اسفند به میزان ۱۱۵ روز بود. بیشترین طول دوره نمو روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک شبیه سازی شده نیز مربوط به تاریخ ۶ اسفند به میزان ۱۲۴ روز برای ارقام بیله سوار و کیمیا و کمترین آن مربوط به تاریخ کشت ۲۴ اسفند و رقم بیله سوار معادل ۹۶ روز بود (شکل ۴). جذر میانگین مربعات خطای مرحله نمو روز از کاشت تا گل دهی برای ارقام بیله سوار، کیمیا و گچساران به ترتیب ۷/۷، ۷/۹ و ۷/۹ روز بود و جذر میانگین مربعات

پیش‌بینی عملکرد، این مدل در اقلیم‌های متفاوت به‌عنوان یک ابزار مفید برای مدیریت مزرعه محسوب می‌شود.

را پیش‌بینی کند و با توجه به نقش کلیدی مراحل فنولوژی در مدل‌سازی رشد، عملکرد و پاسخ گیاهان به شرایط محیطی و بهبود



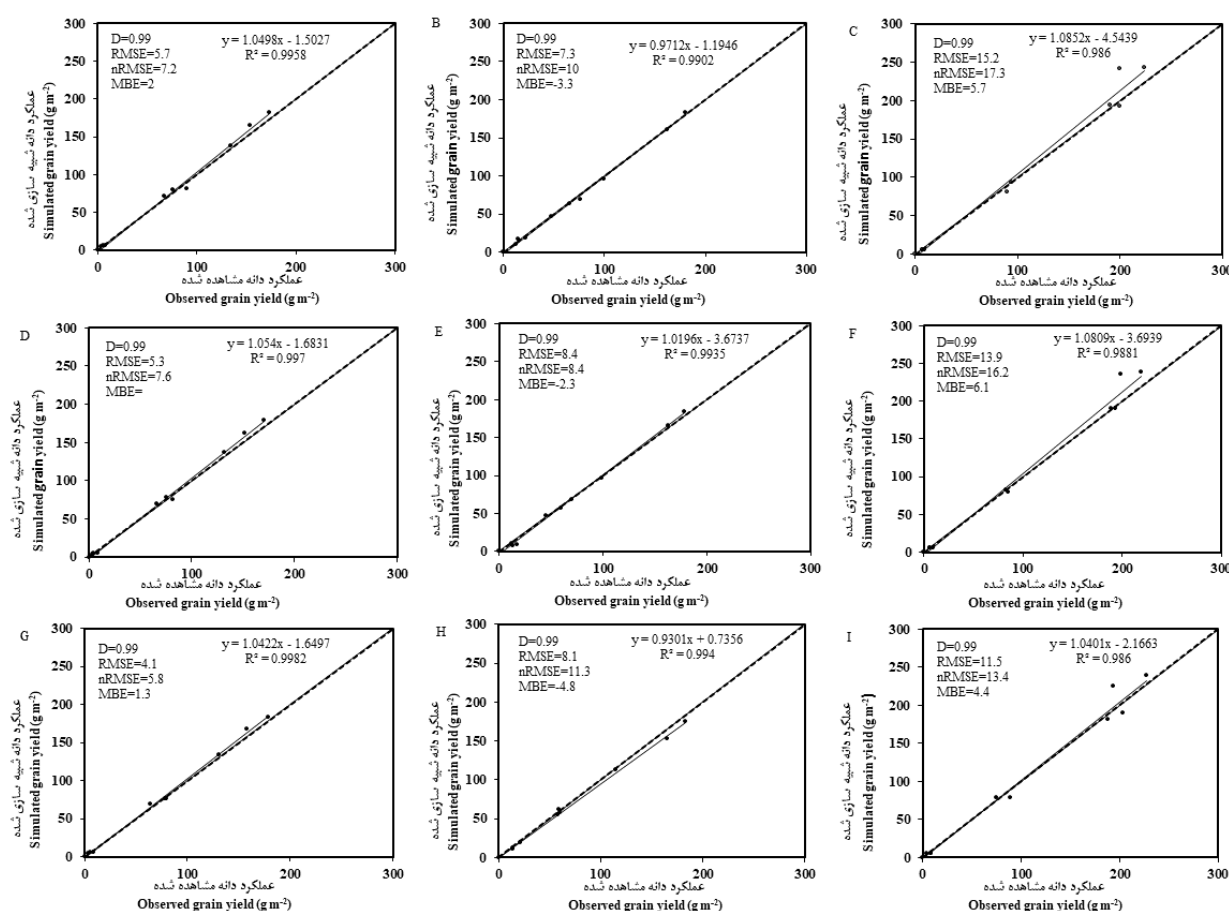
شکل ۴- آنالیز رگرسیون بین مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده مراحل نمو روز از کاشت تا گل‌دهی و روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک و همچنین نتایج شاخص‌های ارزیابی مدل SSM-iCrop2 در تاریخ کاشت‌ها و تیمارهای مختلف آبیاری تحت شرایط اقلیمی ازنا. A: Belehshavar cultivar، B: Kimiya cultivar و C: Gachsaran cultivar

Figure 4- Regression analysis between simulated and measured values of phenological stages (days from planting to flowering and days from planting to physiological maturity), as well as the evaluation results of the SSM-iCrop2 model indices under different planting dates and irrigation treatments in the climatic conditions of Azna. A: Belehshavar cultivar, B: Kimiya cultivar and C: Gachsaran cultivar

عملکرد دانه

میانگین مشاهدات به دست آمد. میانگین خطای تقریبی برای عملکرد دانه تحت شرایط اقلیمی کرمانشاه مثبت بود، به گونه‌ای که بالاترین و پایین‌ترین میانگین خطای تقریبی به ترتیب در تیمار بدون آبیاری و تیمار دو بار آبیاری تکمیلی مشاهده شد (شکل ۴). ضریب توافق ویلموت (d) برای عملکرد دانه ارقام کشت شده حدود ۰/۹۹ بود که نشان‌دهنده توانایی بسیار بالای مدل SSM-iCrop2 در شبیه‌سازی عملکرد دانه در تیمارهای مختلف بود. همچنین نتایج برآزش رگرسیون خطی بین داده‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده و مقایسه آن با خط ۱:۱ نیز نشان داد که مدل SSM-iCrop2 در تیمارهای مورد بررسی قادر بود که بیش از ۹۹ درصد از تغییرات عملکرد دانه مشاهده شده را پیش‌بینی کند که نشان از دقت بسیار بالای این مدل در شبیه‌سازی عملکرد دانه داشت (شکل ۵).

نتایج شبیه‌سازی‌ها با داده‌های مشاهده شده عملکرد دانه ارقام عدس در شرایط مزرعه هم‌خوانی بسیار بالایی داشت. در هر دو شرایط مزرعه و شبیه‌سازی تأخیر در کاشت منجر به کاهش عملکرد دانه شد و کاربرد آبیاری تکمیلی تأثیر مثبتی بر عملکرد دانه داشت. در شرایط اقلیمی کرمانشاه، میزان جذر میانگین مربعات خطای عملکرد دانه در تیمارهای بدون آبیاری از ۴/۱ تا ۵/۶ گرم در مترمربع، یک بار آبیاری تکمیلی از ۷/۳ تا ۸/۴ گرم در مترمربع و دو بار آبیاری تکمیلی از ۱۱/۵ تا ۱۵/۲ گرم در مترمربع مشاهده شد (شکل ۵). جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده در تیمار بدون آبیاری از ۵/۸ تا ۷/۹ درصد میانگین مشاهدات، تیمار یک بار آبیاری از ۸/۴ تا ۱۱/۳ درصد میانگین مشاهدات و تیمار دو بار آبیاری از ۱۳/۴ تا ۱۷/۳ درصد

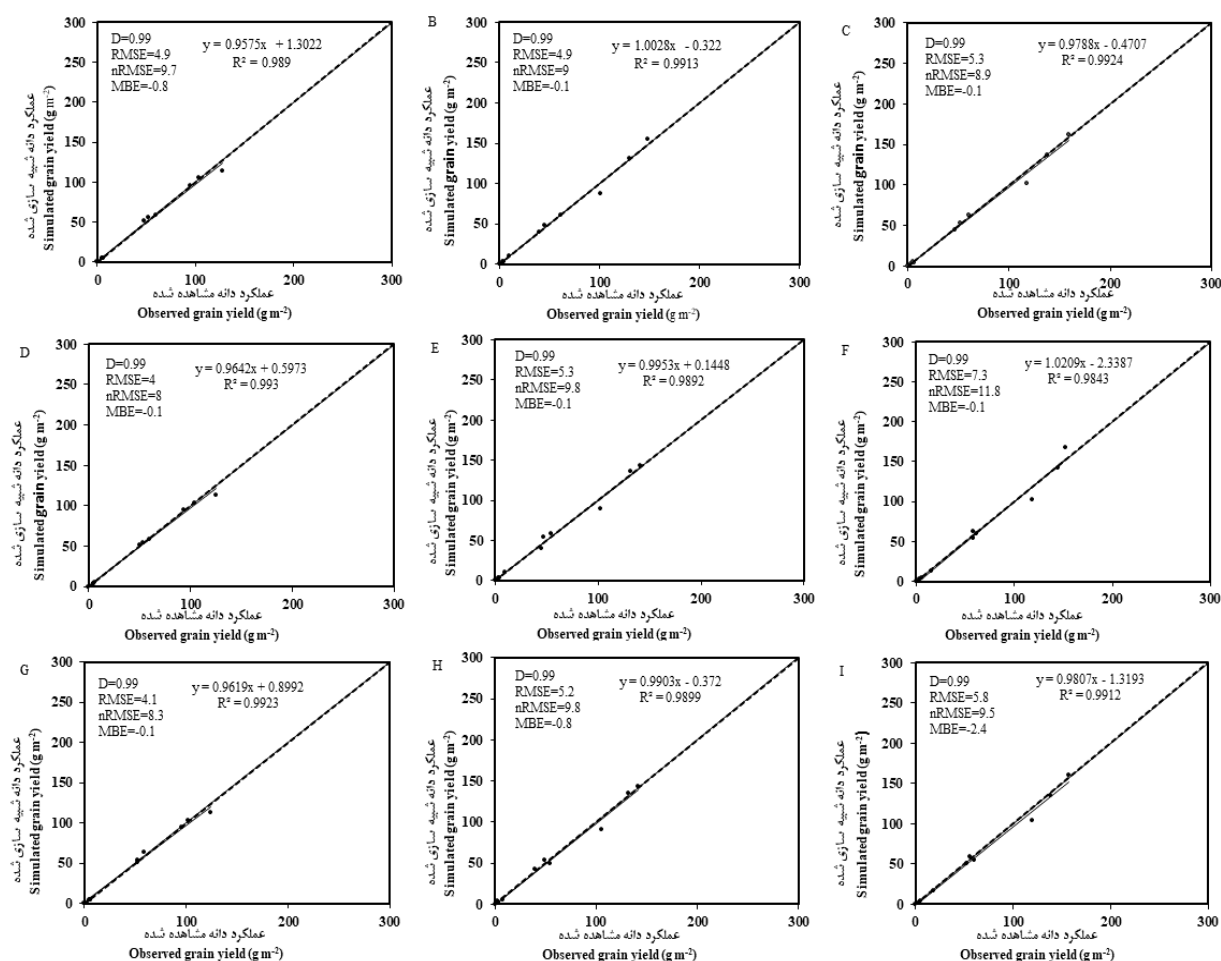


شکل ۵- آنالیز رگرسیون بین مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده عملکرد دانه عدس و نتایج شاخص‌های ارزیابی مدل SSM iCrop2 در شرایط اقلیمی کرمانشاه. A, B و C: رقم بیل سوار در شرایط تیمارهای آبیاری و تاریخ کاشت‌های مختلف. D, E و F: رقم کیمیا در شرایط تیمارهای آبیاری و تاریخ کاشت‌های مختلف. G, H و I: رقم گچساران در شرایط تیمارهای آبیاری و تاریخ کاشت‌های مختلف

Figure 5- Regression analysis between simulated and measured values of lentil grain yield and the results of SSM iCrop2 model evaluation indices in Kermanshah climatic conditions. A, B and C: Behlsavar under different irrigation treatment conditions and sowing dates. D, E and F: Kimiya cultivar under different irrigation treatment conditions and sowing dates. G, H and I: Gachsaran cultivar under different irrigation treatment conditions and sowing dates

ضریب توافق ویلموت (d) برای عملکرد دانه ارقام کشت‌شده تحت شرایط اقلیمی ازنا حدود ۰/۹۹ بود که نشان‌دهنده توانایی بسیار بالای مدل SSM-iCrop2 در شبیه‌سازی عملکرد دانه بود. همچنین نتایج برازش رگرسیون خطی بین داده‌های مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده و مقایسه آن با خط ۱:۱ نیز نشان داد که مدل SSM-iCrop2 قادر بود بیش از ۹۹ درصد از تغییرات عملکرد دانه مشاهده‌شده را پیش‌بینی کند که نشان از قدرت بسیار بالای این مدل در شبیه‌سازی عملکرد دانه در تاریخ کشت‌ها و تیمارهای آبیاری مورد بررسی داشت (شکل ۶).

تحت شرایط اقلیمی ازنا، میزان جذر میانگین مربعات خطای عملکرد دانه ارقام مختلف عدس در شرایط تیمارهای آزمایش از ۴/۰ تا ۷/۳ گرم در مترمربع متغیر بود (شکل ۶). جذر میانگین مربعات خطای نرمال‌شده در تیمارهای بدون آبیاری از ۸/۰ تا ۹/۷ درصد میانگین مشاهدات، یک بار آبیاری تکمیلی از ۹/۰ تا ۹/۸ درصد میانگین مشاهدات و تیمار دو بار آبیاری تکمیلی از ۸/۹ تا ۱۱/۸ درصد میانگین مشاهدات بود. میانگین خطای تقریبی در تیمار بدون آبیاری و تیمار یک بار آبیاری تکمیلی بین ۰/۱- تا ۰/۸- و در تیمار دو بار آبیاری تکمیلی بین ۰/۱- تا ۲/۴- مشاهده شد (شکل ۶).



شکل ۶- آنالیز رگرسیون بین مقادیر شبیه‌سازی‌شده و اندازه‌گیری‌شده عملکرد دانه عدس و نتایج شاخص‌های ارزیابی مدل SSM iCrop2 در شرایط اقلیمی ازنا. A, B و C: رقم بیل‌سوار در شرایط تیمارهای آبیاری و تاریخ کاشت‌های مختلف. D, E و F: رقم کیمیا در شرایط تیمارهای آبیاری و تاریخ کاشت‌های مختلف. G, H و I: رقم گچساران در شرایط تیمارهای آبیاری و تاریخ کاشت‌های مختلف

Figure 6- Regression analysis between simulated and measured values of lentil grain yield and the results of SSM iCrop2 model evaluation indices in Azna climatic conditions. A, B and C: Behlshavar cultivar under different irrigation treatment conditions and sowing dates. D, E and F: Kimiya cultivar under different irrigation treatment conditions and sowing dates. G, H and I: Gachsaran cultivar under different irrigation treatment conditions and sowing dates

استفاده شده است. در مطالعه‌ای دیگر نشان داده شده است که مدل SSM-Legumes عملکرد دانه گیاه لوبیا در جنوب غربی فرانسه را با RMSE برابر با ۴۱ گرم در مترمربع برآورد کرد (Marrou et al., 2014). مقدار جذر میانگین مربعات خطا و جذر میانگین مربعات خطا نرمال شده در شبیه‌سازی عملکرد دانه لوبیا چشم بلبلی توسط مدل DSSAT به ترتیب ۹۲ و ۱۲/۶ درصد گزارش شده است (Baradaran-Hazaveh et al., 2022). همچنین مقدار جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده در شبیه‌سازی عملکرد دانه نخود توسط مدل CROPGRO-chickpea بین ۱۰/۳ تا ۱۶/۶ درصد میانگین مشاهدات گزارش شده است (Hajishabani et al., 2020).

نتیجه گیری

در این مطالعه، پارامترهای مربوط به فنولوژی و عملکرد دانه ارقام عدس با استفاده از مدل SSM-iCrop2 با دقت بالایی برآورد شد. مدل توانست رشد و عملکرد عدس را با وجود تاریخ کاشت و آبیاری متفاوت، با تعداد پارامترهای کم و در دسترس با موفقیت شبیه‌سازی کند. نتایج ارزیابی مدل SSM-iCrop2 که با استفاده از شاخص‌های آماری انجام گرفت، نشان داد که این مدل می‌تواند زمان رسیدگی و عملکرد دانه عدس را در تاریخ‌های مختلف کاشت در شرایط اقلیمی کرمانشاه و ازنا با دقت زیادی شبیه‌سازی کند. بنابراین با توجه به این نتایج ارزیابی‌ها می‌توان از مدل SSM-iCrop2 برای پیش‌بینی رشد و عملکرد عدس بهره برد. این مدل می‌تواند در مطالعات شبیه‌سازی عملکرد عدس در آب‌وهوای مناطق مختلف و تحت شرایط مدیریتی متفاوت استفاده شود.

سپاسگزاری

بدینوسیله از حمایت کادر محترم مزرعه آموزش و تحقیقاتی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه رازی برای انجام این پژوهش تقدیر می‌گردد.

به‌طور کلی، نتایج ارزیابی مدل SSM-iCrop2 در شرایط تیمارهای تاریخ کاشت و آبیاری تکمیلی نشان داد که این مدل قادر است با دقت بالایی تغییرات عملکرد دانه ارقام مورد بررسی عدس را برای شرایط اقلیمی کرمانشاه و ازنا شبیه‌سازی کند. با این وجود مدل SSM-iCrop2 در تیمار دو بار آبیاری تکمیلی، مقدار عملکرد دانه ارقام بیله سوار و کیمیا را تحت شرایط اقلیمی کرمانشاه بیشتر از شرایط مزرعه پیش‌بینی نمود. ولی در شرایط اقلیمی ازنا، برآیند شاخص‌های ارزیابی مورد استفاده نشان از نزدیکی داده‌های شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده عملکرد دانه در تیمارهای آزمایش داشت. به‌طور قطع مدل‌های شبیه‌سازی، ابزار قدرتمندی برای پیش‌بینی رفتار سیستم‌های طبیعی می‌باشند، اما این بدان معنی نیست که این مدل‌ها دقیقاً رفتار سیستم‌های طبیعی را پیش‌بینی کنند و در نهایت، ملاک برای قابل قبول بودن دقت مدل شاخص‌های آماری می‌باشد که در زمان ارزیابی مدل مورد استفاده قرار می‌گیرد. علی‌رغم اینکه در برخی از تیمارها، این مدل عملکرد دانه را بیش‌تر یا کم‌تر از شرایط مزرعه شبیه‌سازی کرده است، اما نتایج تمام شاخص‌های آماری تاییدکننده دقت قابل قبول این مدل می‌باشد. ارزیابی موفقیت‌آمیز یک مدل شبیه‌سازی محصول به تخمین صحیح عملکرد و شاخص سطح برگ بستگی دارد (Amiri et al., 2016). با توجه به آنکه صحت و دقت پارامترهای مشاهده‌شده نقش مهمی در ارزیابی عملکرد مدل دارد، می‌توان دقت بالای نتایج این مطالعه را تا حد زیادی به دقت داده‌های مشاهده‌شده مرتبط دانست. نتایج مطالعات دیگر نیز نشان داد که مدل SSM-iCrop2 نه تنها می‌تواند مراحل نمو فنولوژیک از جمله گل‌دهی و رسیدگی فیزیولوژیک را با دقت بالایی شبیه‌سازی کند، بلکه عملکرد دانه را نیز تحت شرایط مختلف اقلیمی، خاکی و مدیریتی با قابلیت قابل توجهی پیش‌بینی می‌کند (Ghanem et al., 2015). مقدار RMSE برای عملکرد دانه نخود توسط مدل SSM-Chickpea ۲۶ گرم در مترمربع گزارش شده است (Soltani & Sinclair, 2012). همچنین از مدل SSM-iCrop2 برای شبیه‌سازی رشد و عملکرد نخود (Hajarpour et al., 2013)، سویا (Akbari & Soltani, 2017) و باقلا (Torabi et al., 2020)

References

1. Abraham, R. (2015). Lentil (*Lens culinaris* Medikus) current status and future prospect of production in Ethiopia. *Advance in Plant and Agriculture Resresearch*, 2(2)00040.
2. Akbari, S., & Soltani, E. (2017). Parameterization and evaluation of simple model for simulation of growth and yield of soybean in Tehran climatic condition. *Journal of Crops Improvement*, 19, 751–764. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/jci.2017.60477>
3. Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). FAO Irrigation and drainage paper No. 56. *Rome: food and agriculture organization of the United Nations*, 56(97), e156.
4. Amiri, S. R., Deihimfard, R., & Soltani, A. (2016). A single supplementary irrigation can boost chickpea grain yield and water use efficiency in arid and semiarid conditions: A modeling study. *Agronomy Journal*, 108(6), 2406–2416. <https://doi.org/10.2134/agronj2016.02.0087>.

5. Baradaran-Hazaveh, F., Babazadeh, H., Amiri, E., & Ebrahimi, H. (2022). Evaluation of DSSAT model in estimating cowpea water productivity and yield at different levels of applied water. *Journal of Water Research in Agriculture (Soil and Water Science)*, 35(4), 323-336. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22092/jwra.2022.355847.890>.
6. Benayad, A., & Aboussaleh, Y. (2021). Mineral composition of lentils: Physiological functions, antinutritional effects, and bioavailability enhancement. *Journal of Food Quality*, 2021(1), 5515654. <https://doi.org/10.1155/2021/5515654>.
7. Erskine, W., Muehlbauer, F. J., & Short, R. W. (1990). Stages of development in lentil. *Experimental Agriculture*, 26(3), 297-302. <https://doi.org/10.1017/S0014479700018457>
8. Erskine, W., Sarker, A., & Kumar, S. (2011). Crops that feed the world 3. Investing in lentil improvement toward a food secure world. *Food Security*, 3, 127-139. <https://doi.org/10.1007/s12571-011-0124-5>.
9. FAO, Climate-smart Agriculture Sourcebook, Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome, Italy, 2023. <https://doi.org/10.4060/cc8166en>.
10. Fourcaud, T., Zhang, X., Stokes, A., Lambers, H., & Korner, C. (2008). Plant growth modelling and application: The increasing importance of plant architecture in growth models. *Annals of Botany*, 101(8), 1053-1063. <https://doi.org/10.1093/aob/mcn050>.
11. Ghamarnia, H., Palash, M., & Ghamarnia, H. (2023). Estimation and introduction of the best coefficients of monthly evaporation pan for calculations of water requirement) Case study Kermanshah province). *Water and Irrigation Management*, 12(4), 747-761. <http://doi.org/10.22059/jwim.2022.344535.1001>
12. Ghanem, M. E., Marrou, H., Biradar, C., & Sinclair, T. R. (2015). Production potential of lentil (*Lens culinaris* Medik.) in East Africa. *Agricultural Systems*, 137, 24–38. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2015.03.005>.
13. Hajarpour, A., Soltani, A., Zeinali, E., & Sayyedi, F. (2013). Simulating the impact of climate change on production of chickpea in rainfed and irrigated condition of Kermanshah. *Journal of Plant Production*, 20(2), 235-252. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23222050.1392.20.2.12.7>.
14. Hajishabani, H., Mondani, F., & Bagheri, A. (2020). Simulation Effects of Sowing Date on Growth and Yield of Rainfed Chickpea (*Cicer arietinum* L.) by CROPGRO- CHICKPEA MODEL. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 18(2), 197-212. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/gsc.v18i2.82684>.
15. Hsiao, T. C., Heng, L., Steduto, P., Rojas-Lara, B., Raes, D., & Fereres, E. (2009). AquaCrop—the FAO crop model to simulate yield response to water: III. Parameterization and testing for maize. *Agronomy Journal*, 101(3), 448-459. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0218s>
16. Manschadi, A. M., Palka, M., Fuchs, W., Neubauer, T., Eitzinger, J., Oberforster, M., & Soltani, A. (2022). Performance of the SSM-iCrop model for predicting growth and nitrogen dynamics in winter wheat. *European Journal of Agronomy*, 135, 126487. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2022.126487>
17. Marrou, H., Sinclair, T. R., & Metral, R. (2014). Assessment of irrigation scenarios to improve performances of Lingot bean (*Phaseolus vulgaris*) in southwest France. *European Journal of Agronomy*, 59, 22-28. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2014.05.006>.
18. Ministry of Agriculture of Iran. (2023). (in Persian). Retrieved from <https://www.maj.ir/>.
19. Mohammadi, S., Zeinali, E., Soltani, A., & Torabi, B. (2022). Parameterization and evaluation of SSM_iCrop2 model to simulate the growth and yield of bean (*Phaseolus vulgaris* L.) in Iran. *Iranian Journal of Pulses Research*, 13(1), 37-54. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/ijpr.v13i1.2103-1004>.
20. Nehbandani, A., & Soltani, A. (2016). Simulate the effect of climate change on development, irrigation requirements and soybean yield in Gorgan. *Journal of Water and Soil*, 30(1), 77-87. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.v30i1.37529>.
21. Nehbandani, A., Soltani, A., Nourbakhsh, F., & Dadras, A. (2020). Estimating crop model parameters for simulating soybean production in Iran conditions. *Oilseeds & Fats Crop and Lipids*, 27, 58. <https://doi.org/10.1051/ocl/2020057>.
22. Oduro-Yeboah, C., Sulaiman, R., Uebersax, M. A., & Dolan, K. D. (2023). A review of lentil (*Lens culinaris* Medik.) value chain: Postharvest handling, processing, and processed products. *Legume Science*, 5(2), e171. <https://doi.org/10.1002/leg3.171>
23. Rahban, S., Torabi, B., Soltani, A., & Zeinali, E. (2022). Determining yield gap and potential for improved production of irrigated canola in Iran. *Journal of Crops Improvement*, 24(2), 393-406. (in Persian with English abstract).
24. Saremi, M., Farhadi, B., Maleki, A., & Farasati, M. (2015). Determination the crop coefficient and water requirement of lentil, using water balance method (case study: Khorram Abad). *Iranian Journal Pulses Research*, 6(2), 87-97. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/ijpr.v1394i2.38241>
25. Sehgal, A., Sita, K., Rehman, A., Farooq, M., Kumar, S., Yadav, R., Nayyar, H., Singh, S., & Siddique, K. H. (2021). Lentil. In *Crop Physiology Case Histories for Major Crops*, 408-428. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819194-1.00013-X>.

26. Sinclair, T. R. (1986). Water and nitrogen limitations in soybean grain production I. model development. *Field Crop Research*, 15(2), 125–141. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(86\)90082-1](https://doi.org/10.1016/0378-4290(86)90082-1).
27. Soltani, A., Alimagham, S. M., Nehbandani, A., Torabi, B., Zeinali, E., Dadrasi, A., & Sinclair, T. R. (2020). SSM-iCrop2: A simple model for diverse crop species over large areas. *Agricultural Systems*, 182, 102855. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.102855>
28. Soltani, A., Hammer, G. L., Torabi, B., Robertson, M. J., & Zeinali, E. (2006). Modeling chickpea growth and development: phenological development. *Field Crops Research*, 99(1), 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2006.02.004>
29. Soltani, A., Maddah, V., & Sinclair, T. R. (2013). SSM-Wheat: A simulation model for wheat development, growth and yield. *International Journal of Plant Production*, 7(4), 711-740. <https://doi.org/10.22069/ijpp.2013.1266>.
30. Soltani, A., & Sinclair, T. R. (2012). A simple model for chickpea development, growth and yield. *Field Crops Research*, 124(2), 252-260. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.06.021>.
31. Torabi, B., Ebrahimi, N., Soltani, A., & 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(4), 531-542. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/jci.2020.273742.2148>.
32. Willmott, C. J. (1982). Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 63(11), 1309-1313. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1982\)063%3C1309:SCOTEO%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1982)063%3C1309:SCOTEO%3E2.0.CO;2).