



Research Article

Vol. 23, No. 4, Winter 2025, p. 399-415

Parameterization and Evaluation of the SSM-iCrop Model for Predicting Growth, Phenological Development, and Yield of Grain Maize (*Zea mays* L.) in Iran

N. Bayatian^{1*}, A. Soltani^{1*}, E. Zeinali¹

1- Department of Agronomy, Faculty of Plant Production, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

(*- Corresponding author's Email: afshin.soltani@gmail.com, Naeimeh.Bayatian@gmail.com)

Received: 26 November 2024
Revised: 06 May 2025
Accepted: 14 May 2025
Available Online: 14 May 2025

How to cite this article:

Bayatian, N., Soltani, A., & Zeinali, E. (2025). Parameterization and Evaluation of the SSM-iCrop Model for Predicting Growth, Phenological Development, and Yield of Grain Maize (*Zea mays* L.) in Iran. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 23(4), 399-415. (In Persian with English abstract)
<https://doi.org/10.22067/jcesc.2025.90531.1362>

Introduction

The nation's substantial maize (*Zea mays* L.) requirements are currently met through imports. Given the scarcity of arable land and water resources, enhancing yield per unit area is the only viable solution to augment domestic production. Significant progress can be made toward this goal by optimizing production management to narrow the yield gap. Utilizing a reliable simulation model can play a pivotal role in reducing the yield gap and achieving optimal yields through evaluating various management practices. Effective management strategies are essential to optimize maize production and ensure food security. While field experiments can provide valuable insights, they can be resource-intensive, time-consuming, and even impractical due to complex interactions between environmental and management factors. Crop simulation models offer a powerful alternative, enabling the exploration of various scenarios and the identification of optimal management practices. These models simulate plant growth and development in response to climate variables, soil conditions, management inputs, and genetic traits, providing valuable information for decision-making. Accurate parameterization is crucial for reliable crop model predictions. This study aims to parameterize and evaluate the SSM-iCrop model for predicting grain maize yield and nitrogen dynamics in Iran.

Materials and Methods

Simple Simulation Models (SSM), were initially developed for soybean yield prediction in 1986. The model has since been refined to simulate various crops, including maize. SSM-iCrop simulates daily plant growth and development processes, such as phenology, leaf area development, dry matter production, yield formation, and water and nitrogen dynamics. The model has been successfully used in various studies for different plants. Moreover, comparisons of this model with other crop models have shown its effectiveness in simulating yield. The SSM-iCrop model requires input data on weather parameters (minimum and maximum temperature, precipitation, and solar radiation), soil properties, cultivar-specific parameters, and management practices (planting date, plant density, irrigation, and nitrogen fertilization). The SSM-iCrop model was parameterized and calibrated in this study using data from various studies conducted in Iran between 2001 and 2022. The calibration process involved adjusting plant parameters within a reasonable range, as determined by scientific literature, to minimize the difference between simulated and observed data. The parameters that yielded the best fit were selected as the final estimates. Lastly, the model was evaluated using different studies.



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.2025.90531.1362>

Results and Discussion

The SSM-iCrop model accurately simulated key maize growth stages, including emergence, tasseling, silking, and physiological maturity (RMSE = 13.22, CV = 17.4, $r = 0.97$). The model also accurately predicted leaf area index (RMSE = 0.4, CV = 6.2, $r = 0.98$), biological yield (RMSE = 431.3, CV = 23.9, $r = 0.66$), and grain yield (RMSE = 161.9, CV = 16.9, $r = 0.81$). Compared to previous studies, such as Zeinali *et al.* (2016), the current study demonstrated superior performance in grain yield prediction. While Zeinali *et al.* (2016) did not explicitly simulate nitrogen dynamics, the current study considered nitrogen processes. Manschadi *et al.* (2021) reported high accuracy in simulating grain maize yield in Austrian conditions. The difference in accuracy between the two studies may be attributed to the quality of the observed data, as accurate parameterization is crucial for model performance. Although this study incorporated nitrogen fertilization treatments and examined the impact of nitrogen-related parameters on yield, dry matter production, and leaf area, specific nitrogen-related traits were not evaluated. This is because existing research has primarily focused on the overall effects of nitrogen fertilization on yield and yield components, often neglecting the measurement of nitrogen content in critical plant tissues such as leaves and grains.

Conclusion

The performance of the SSM-iCrop model for simulating key maize growth stages, leaf area index, and biological and grain yield was suitable. This model is a valuable tool for simulating maize yield and optimizing management practices in Iran. By simulating the impact of different environmental factors and management strategies, the model can help farmers and policymakers make informed decisions to improve maize production and ensure food security.

Keywords: Grain yield, Plant modeling, Simulation

پارامتریابی و ارزیابی مدل SSM-iCrop برای پیش‌بینی رشد، نمو فنولوژیک و عملکرد ذرت (*Zea mays* L.) دانه‌ای در ایران

نعیمه بیاتیان^{۱*}، افشین سلطانی^{۱*}، ابراهیم زینلی^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۲۴

چکیده

بخش عمده نیاز کشور به ذرت (*Zea mays* L.) از طریق واردات تأمین می‌شود. با توجه به کمبود اراضی قابل کشت و محدودیت منابع آب قابل دسترس، افزایش عملکرد در واحد سطح تنها راهحل موجود برای افزایش تولید است. کاهش خلأ عملکرد از طریق بهینه‌سازی مدیریت تولید، رویکردی مؤثر برای حصول این هدف است. استفاده از یک مدل شبیه‌سازی قابل اعتماد می‌تواند با ارزیابی شیوه‌های مدیریتی، نقش قابل توجهی در کاهش خلأ عملکرد و دستیابی به عملکرد بهینه ایفا نماید. یکی از منابع عدم قطعیت در پیش‌بینی مدل‌های گیاهی، تخمین مقادیر پارامترهای ورودی مدل است. این مطالعه با هدف پارامتریابی و ارزیابی مدل SSM-iCrop برای ذرت دانه‌ای در ایران انجام شد. به این منظور، ابتدا پارامترهای گیاهی مدل با استفاده از نتایج مطالعاتی که در بازه سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۱ در کشور انجام گرفته بود، تخمین زده شد، به‌طوری‌که اختلاف بین نتایج مشاهده‌شده در آزمایشات مزرعه‌ای و نتایج پیش‌بینی‌شده توسط مدل به حداقل رسید. سپس مدل با استفاده از بخش دیگری از مطالعات ارزیابی گردید. براساس نتایج، مدل به‌خوبی توانست مراحل نمو فنولوژیک شامل روز بیولوژیک تا سبز شدن، تاسل‌دهی، ابریشم‌دهی و رسیدگی فیزیولوژیک ($RMSE = 13.22$, $CV = 17.4$, $r = 0.97$)، شاخص سطح برگ ($RMSE = 0.4$, $CV = 6.2$, $r = 0.98$)، عملکرد بیولوژیک ($RMSE = 431.3$, $CV = 23.9$, $r = 0.66$) و عملکرد دانه ($RMSE = 161.9$, $CV = 16.9$, $r = 0.81$) را پیش‌بینی نماید. براساس نتایج به‌دست‌آمده، مدل SSM-iCrop می‌تواند به‌عنوان یک ابزار قابل اعتماد در ارزیابی و بهینه‌سازی شیوه‌های مدیریت تولید ذرت در شرایط کشور مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: شبیه‌سازی، عملکرد دانه، مدل‌سازی گیاهی

مقدمه

ذرت (*Zea mays* L.) یکی از غلات مهم و اصلی مناطق گرمسیر و معتدل جهان است که در تأمین غذای بیش از ۹۰ درصد جمعیت جهان به‌طور مستقیم و غیرمستقیم نقش دارد (Ochieng', 2021). این غله همواره نقش فزاینده و متنوعی در سیستم‌های کشاورزی و غذایی جهانی ایفا کرده است. به‌دلیل افزایش تقاضای طی چند دهه گذشته سطح زیرکشت و تولید جهانی ذرت افزایش یافته و به بیش از یک میلیارد تن در سال رسیده است (García-Lara & Serna-Saldivar, 2019). در حال حاضر، ذرت از نظر سطح زیرکشت پس از گندم (*Triticum aestivum* L.) در جایگاه دوم

جهانی و از نظر حجم تولید در ردیف اول قرار دارد (FAOSTAT, 2021). براساس آمارنامه جهاد کشاورزی (۱۴۰۲)، در حال حاضر سطح زیرکشت ذرت دانه‌ای در کشور حدود ۱۶۰ هزار هکتار، عملکرد دانه ۷۱۲۹ کیلوگرم در هکتار و میزان تولید حدود ۱۱۳۶۰۰۰ تن برآورد شده است (Unknown, 2023). حدود ۸۵ درصد از ذرت دانه‌ای کشور در استان‌های خوزستان (۲۶ درصد)، کرمان (۲۳ درصد)، کرمانشاه (۲۰ درصد) و فارس (۱۵ درصد) تولید می‌شود (شکل ۱). بررسی پتانسیل عملکرد، شناسایی عوامل محدودکننده عملکرد و بهینه‌سازی سیستم مدیریت کشت برای دستیابی به عملکرد مطلوب ضروری می‌باشد (Ochieng' et al., 2021). سالانه پژوهش‌های متعددی برای بهینه‌سازی مدیریت کشت ذرت (شامل انتخاب تاریخ و تراکم کاشت، زمان مناسب آبیاری، میزان و زمان مصرف کودهای شیمیایی به‌ویژه کود نیتروژن) در کشور انجام می‌شود (Madadzadeh Amiri, Kambouzia, & Soufizadeh, 2023; Madadzadeh, Kambouzia, & Soufizadeh, 2017). اما شناسایی سیستم مدیریت بهینه کشت با استفاده از آزمایش‌های مزرعه‌ای، به‌دلیل اثرات متقابل محیط و اقدامات مدیریتی پرهزینه،

۱- گروه زراعت، دانشکده تولید گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی

گرگان، گرگان، ایران

(*) نویسنده مسئول:

Email: afshin.soltani@gmail.com,

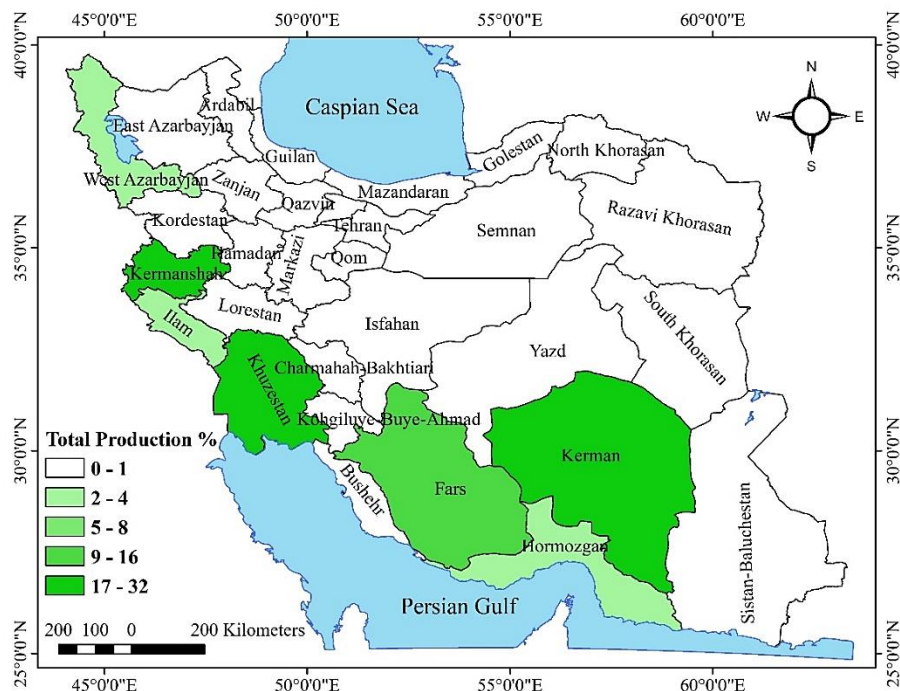
Naeimeh.Bayatian@gmail.com

<https://doi.org/10.22067/jcsc.2025.90531.1362>

زمان بر و گاهی در عمل غیرممکن است (Hammer Messina, Wu, & Cooper, 2019).

مدل‌های گیاهی، ابزار مهم و قدرتمندی برای شبیه‌سازی تعاملات بین ژنوتیپ، عوامل محیطی و شیوه‌های مدیریتی محسوب می‌شوند (Guiguitant et al., 2017; Hammer et al., 2019; Jing et al., 2024; Soltani & Hoogenboom, 2007). این مدل‌ها رشدونمو گیاه را در پاسخ به متغیرهای آب‌وهوایی، شرایط خاک، عوامل مدیریتی و ویژگی‌های ژنتیکی رقم برای سال‌های متمادی در مکان‌های متعدد شبیه‌سازی می‌کنند (Manschadi et al., 2021). مدل‌های شبیه‌سازی گیاهی در مطالعات مختلفی همچون بهینه‌سازی مصرف کودها (Tang et al., 2018)، بهینه‌سازی تاریخ و تراکم کاشت (Ali et al., 2022; Saddique et al., 2019; Shen, Xu, Zhao, Xing, & Ma, 2020)، الگوی آبیاری (Rugira, Ma, Zheng, Wu, & Liu, 2021)، صفات مطلوب گیاهی برای افزایش عملکرد محصول (Abidi, Soltani, & Zeinali, 2024; Haghshenas, Soltani, Ghanbari Malidarreh, Ajam Norouzi, & Dastan, 2020; Messina et al., 2015)، پیش‌بینی رشد و عملکرد (Bahraman, 2023) و ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر رشد و عملکرد (Chisanga, Moombe, & Elijah, 2022; Kafaie Ghaeini, 2023) استفاده قرار گرفته‌اند.

عملکرد مدل‌های گیاهی در شبیه‌سازی پاسخ گیاه به عوامل اقلیمی، خاکی، ژنتیکی و مدیریتی تا حد زیادی به داده‌های ورودی و کیفیت پارامتریابی بستگی دارد (Manschadi et al., 2021). بنابراین پارامتریابی دقیق مدل به‌منظور تخمین مناسب پارامترهای حاکم بر فنولوژی و فرآیندهای رشد محصول، برای کاهش عدم قطعیت و بهبود دقت شبیه‌سازی مدل ضروری است (Salo et al., 2016). منشادی و همکاران (Manschadi et al., 2021)، تأثیر کیفیت پارامتریابی بر دقت نتایج شبیه‌سازی دو مدل APSIM و SSM-iCrop را مقایسه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که اگرچه کیفیت پارامتریابی عملکرد مدل ساده SSM-iCrop را بیشتر تحت تأثیر قرار می‌دهد، اما پارامتریابی کامل مدل، کارایی هر دو مدل را بهبود می‌بخشد. در این حالت، عملکرد مدل ساده SSM-iCrop برابر و یا حتی بیش‌تر از مدل APSIM برآورد شد. با توجه به سادگی آزمون، کاربرد و تفسیر نتایج مدل SSM-iCrop در مقایسه با سایر مدل‌های پیچیده (Soltani & Sinclair, 2015) و تأیید نتایج ارزیابی مدل در مطالعات مختلف (Manschadi et al., 2021)، هدف از مطالعه حاضر پارامتریابی و ارزیابی مدل SSM-iCrop برای پیش‌بینی رشد و عملکرد ذرت دانه‌ای در کشور بود.



شکل ۱- میزان تولید ذرت دانه‌ای در استان‌های مختلف کشور

Figure 1- Grain maize production share in different provinces of Iran

شامل سبز شدن (EMR)، پایان تولید آغازی برگ (EJU)، آغاز تاسل‌دهی (TSI)، ظهور تاسل (TSE)، ابریشم‌دهی (SIL)، شروع رشد دانه (BSG)، پایان رشد دانه (TSG)، رسیدگی فیزیولوژیک (PM) و رسیدگی برداشت (HM) را شبیه‌سازی می‌کند. مراحل نمو فنولوژیکی با استفاده از مفهوم روز بیولوژیک و براساس سرعت نسبی نمو در دما و طول روز نسبت به شرایط مطلوب محاسبه می‌گردد. نمو از EJU تا TSI به دما و دوره نوری حساس است، درحالی‌که سایر مراحل تنها تحت تأثیر دما قرار دارند (Soltani & Sinclair, 2012). واکنش سرعت نسبی نمو به دمای روزانه با یک تابع دندان‌مانند با پارامترهای دمای پایه، دمای مطلوب تحتانی و فوقانی و دمای سقف توصیف می‌شود. واکنش به فتوپریود نیز با یک تابع دو تکه‌ای شامل فتوپریود بحرانی (۱۲/۵ ساعت) و ضریب حساسیت به فتوپریود کمی‌سازی می‌گردد. در فتوپریودهای کمتر یا مساوی فتوپریود بحرانی، مقدار تابع فتوپریود برابر با یک در نظر گرفته می‌شود (Soltani et al., 2013; Soltani & Sinclair, 2012). مقادیر

عددی پارامترهای فنولوژی در جدول ۱ ارائه شده است.

گسترش و زوال سطح برگ: مدل SSM-iCrop گسترش سطح برگ را در دو مرحله شبیه‌سازی می‌کند. ابتدا تعداد گره‌های ساقه اصلی براساس تجمع دما محاسبه شده و با معکوس کردن سرعت ظهور برگ، مقدار فیلوکرون به دست می‌آید. در این مرحله، تعداد برگ‌ها به‌طور خطی با افزایش واحد دمایی افزایش می‌یابد تا زمانی که به حداکثر تعداد برگ در ساقه اصلی (TLM) برسد. سپس سطح برگ بالقوه روزانه به‌عنوان تابعی از تعداد گره‌ها یا برگ‌های موجود محاسبه می‌شود (Soltani et al., 2013; Soltani & Sinclair, 2012). در مرحله بعد، از TLM تا رسیدن به حداکثر شاخص سطح برگ، افزایش شاخص سطح برگ براساس میزان ماده خشک تخصیص‌یافته به برگ (GLF) برحسب گرم در مترمربع در روز) و سطح برگ (SLA) بر حسب مترمربع در گرم) محاسبه می‌گردد. با شروع پر شدن دانه (BSG)، تولید برگ متوقف و فرآیند زوال برگ آغاز می‌شود. کاهش روزانه سطح برگ (DLAI) براساس سرعت کاهش نیتروژن برگ‌ها (XNLF) برحسب گرم در مترمربع در روز) و نیتروژن ویژه برگ در برگ‌های سبز (SLNG) برحسب گرم نیتروژن در مترمربع) و برگ‌های زرد (SLNS) برحسب گرم نیتروژن در مترمربع) تعیین می‌شود. در نهایت، شاخص سطح برگ (LAI) با تلفیق افزایش (GLAI) و کاهش (DLAI) روزانه طبق رابطه‌های (۱) و (۲) محاسبه می‌شود.

$$DLAI = XNLF / (SLNG - SLNS) \quad (۱)$$

$$LAI_t = LAI_{t-1} + GLAI - \quad (۲)$$

تولید ماده خشک: تولید ماده خشک روزانه (DBP) براساس تشعشع فعال فتوسنتزی (IPAR) مگاژول در مترمربع بر روز، کسری

اگرچه مدل SSM-iCrop پیش از این برای ذرت مورد ارزیابی قرار گرفته، اما در مطالعه زینلی و همکاران (Zeinali, Soltani, & Khadempir, 2016) این مدل در شرایط گرگان و صرفاً براساس داده‌های هواشناسی سال ۲۰۱۵ پارامتریابی و ارزیابی شده است. به‌علاوه در مطالعه آنها فرض بر عدم محدودیت نیتروژن بوده و پویایی این عنصر در خاک و گیاه بررسی نشده است. حال آن‌که مطالعه حاضر با بررسی دقیق پژوهش‌های انجام‌شده در نقاط مختلف کشور، حال آن‌که مطالعه‌حاضر با بررسی دقیق پژوهش‌های انجام‌شده در نقاط مختلف کشور، شبیه‌سازی را در سال‌ها و مکان‌های متعدد و با در نظر گرفتن پویایی نیتروژن در خاک و گیاه انجام داده است. به همین سبب، پارامترهای برآوردشده در این مطالعه، دقت شبیه‌سازی مدل را افزایش داد.

مواد و روش‌ها

مدل ساده SSM-Maize، در سال ۱۹۹۰ توسط Muchow و همکاران در ابتدا با هدف ارزیابی اثر تابش خورشیدی و دما بر عملکرد پتانسیل ذرت در نقاط مختلف طراحی شد (Muchow, Sinclair, & Bennett, 1990). این مدل در سال‌های آتی، نخست برای شبیه‌سازی اثرات کمبود آب بر پتانسیل عملکرد (Muchow & Sinclair, 1991) و سپس شبیه‌سازی اثر نیتروژن بر پتانسیل عملکرد ذرت توسعه یافت (Sinclair & Muchow, 1995) و در نهایت با افزودن جزئیات بیشتر سیستم کشت، از جمله مدل لایه‌ای خاک تکمیل گردید (Soltani, Maddah, & Sinclair, 2013).

مدل SSM-iCrop با استفاده از داده‌های حداقل و حداکثر دما، بارش و تابش خورشیدی، پارامترهای خاک، پارامترهای ژنتیکی ویژه رقم و اطلاعات مدیریتی (شامل تاریخ کاشت، تراکم، آبیاری، میزان و الگوی مصرف کود نیتروژن)، قادر به شبیه‌سازی روزانه مراحل فنولوژی، گسترش و پیری برگ، تولید و توزیع ماده خشک، تشکیل عملکرد، موازنه آب و نیتروژن در گیاه و خاک است. لازم به ذکر است که این مدل محدودیت‌های ناشی از آفات، بیماری‌ها و علف‌های هرز را در نظر نمی‌گیرد.

مدل SSM-iCrop برای شبیه‌سازی رشد و عملکرد ذرت، به ۵۳ پارامتر نیاز دارد که در هفت گروه دسته‌بندی می‌شوند: فنولوژی (۱۱) پارامتر، توسعه و زوال سطح برگ (هشت پارامتر)، تجمع و توزیع ماده خشک (شش پارامتر برای هر کدام)، تشکیل عملکرد (سه پارامتر)، روابط آبی (نُه پارامتر) و موازنه نیتروژن در گیاه (۱۰ پارامتر). پارامترهای مورد بررسی در فرآیند پارامتریابی و ارزیابی مدل در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

فنولوژی: مدل فرعی فنولوژی در SSM-iCrop براساس رویکرد کینیری (Kiniry, 1991) است و مراحل کلیدی نمو ذرت

(RUE) با استفاده از RUE در شرایط مطلوب (IRUE) و یک ضریب تعدیل دما (TCFRUE) مطابق رابطه (۴) تعیین می‌گردد. مقدار IRUE برای ذرت ۳/۵ گرم بر مگاژول در نظر گرفته شده و با توجه به دمای روزانه تعدیل می‌شود. کل ماده خشک تولیدی با جمع مقادیر روزانه محاسبه می‌گردد (Soltani & Sinclair, 2012; Soltani *et al.*, 2013).

$$RUE = IRUE \times TCFRUE \quad (4)$$

از تشعشع دریافتی که صرف تولید ماده خشک در گیاه می‌شود (FINT)، کارایی مصرف نور (RUE گرم بر مگاژول) و ضریب اصلاحی تنش خشکی برای رشد مطابق رابطه (۳) محاسبه می‌شود (Soltani & Sinclair, 2012; Soltani *et al.*, 2013).

$$DBP = IPAR \times FINT \times RUE \times WSFG \quad (3)$$

مقدار KPAR برای تمام فصل رشد ثابت و برابر ۰/۶۵ در نظر گرفته می‌شود. مقدار ماده خشک تولیدشده در هر روز از حاصل ضرب PAR دریافت‌شده در RUE به دست می‌آید. کارایی مصرف نور

جدول ۱- پارامترهای گیاهی ذرت در مدل SSM-iCrop
Table 1- Plants parameters for maize in SSM-iCrop

نماد Symbol	پارامتر Parameters	واحد Unit	مقدار Value	منبع References
فنولوژی Phenology				
TBD	دمای پایه Base temperature for development	°C	8	Soltani & Sinclair 2012
TP1D	دمای مطلوب تحتانی Optimum temperature for development	°C	34	Soltani & Sinclair 2012
TP2D	دمای مطلوب فوقانی Optimum temperature for development	°C	37	Soltani & Sinclair 2012
TCD	دمای سقف Ceiling temperature for development	°C	45	Soltani & Sinclair 2012
CPp	فتوپریود بحرانی Critical photoperiod	h	12.5	Soltani & Sinclair 2012
Ppsen	ضریب حساسیت به دوره نوری Photoperiod sensitivity coefficient	-	0.52	Soltani & Sinclair 2012
bdSOWEMR	روز بیولوژیک از کاشت تا سبز شدن Biological days from sowing to emergence	bd	3	Soltani & Sinclair 2012
bdEMREJU	روزبیولوژیک از سبز شدن تا پایان تولید آغازی‌های برگ Biological days from emergence to juvenile	bd	9	Current study مطالعه حاضر
bdSILPM	روزبیولوژیک از ابریشم‌دهی تا رسیدگی فیزیولوژیک Biological days from silking to physiological maturity	bd	34.2	Current study مطالعه حاضر
گسترش و پیری سطح برگ Leaf area development and senescence				
Phyl	فیلوکرون Phyllochron, the accumulated thermal time required for the successive leaves' appearance in the main stem	°C leaf ⁻¹	38.9	مطالعه حاضر Current study
PLACON	ضریب ثابت معادله برای محاسبه سطح برگ A coefficient (constant) in the power relationship between plant leaf area and mainstem node number	-	1	Soltani & Sinclair 2012
PLAPOW	توان رابطه بین سطح برگ و تعداد گره A coefficient (exponent) in the power relationship between plant leaf area and main stem node number (For 300 plants m ⁻²)	-	2.78	Current study مطالعه حاضر
a_plapow_d	ضریب ثابت در رابطه بین PLAPOW و تراکم گیاه A coefficient (constant) in the relationship between PLAPOW and plant density	-	1.0378	Soltani & Sinclair 2012
b_plapow_d	ضریب ثابت در رابطه بین PLAPOW و تراکم گیاه A coefficient (constant) in the relationship between PLAPOW and plant density	-	0.0047	Soltani & Sinclair 2012
SLA	سطح برگ ویژه Specific leaf area	m ² g ⁻¹	0.022	Soltani & Sinclair 2012

FrzTh	دمای بحرانی یخندان برگ Low temperature/freezing threshold for leaf death	°C	8	Soltani & Sinclair 2012
FrzLDR	ضریب تخریب برگ در دماهای پایین‌تر از دمای بحرانی یخندان Fraction leaf destruction below the critical by each degree centigrade	$m^2 m^{-2}$	0.01	Soltani & Sinclair 2012
HeatTH	دمای بحرانی تنش دمای بالا Heat threshold temperature for leaf senescence	°C	37	Soltani & Sinclair 2012
HtLDR	ضریب تخریب برگ در دماهای بالاتر از دمای بحرانی Relative increase in leaf senescence rate per each degree above heat threshold	$m^2 m^{-2}$	0.1	Soltani & Sinclair 2012
تجمع ماده خشک Dry mass accumulation				
TBRUE	دمای پایه برای تولید ماده خشک Base temperature for dry matter production	°C	6.2	Soltani & Sinclair 2012
TP1RUE	دمای مطلوب تحتانی برای تولید ماده خشک Lower optimum temperature for dry matter production	°C	16.5	Soltani & Sinclair 2012
TP2RUE	دمای مطلوب فوقانی برای تولید ماده خشک Upper optimum temperature for dry matter production	°C	33	Soltani & Sinclair 2012
TCRUE	دمای سقف برای تولید ماده خشک Ceiling temperature for dry matter production	°C	44	Soltani & Sinclair 2012
KPAR	ضریب خاموشی نور Extinction coefficient for photosynthetically active radiation	–	0.6	Soltani & Sinclair 2012
IRUE	کارایی استفاده از تشعشع Radiation use efficiency under optimal growth conditions	$g MJ^{-1}$	3.5	Soltani & Sinclair 2012
CO2RES	ضریب حساسیت RUE به دی‌اکسیدکربن A coefficient that describes RUE response to CO ₂ in a curvilinear response.	–	0.35	Soltani & Sinclair 2012
توزیع ماده خشک Dry mass partitioning				
FLF1A	ضریب تخصیص ماده خشک به برگ در سطوح پایین ماده خشک بخش هوایی Partitioning coefficient to leaves during the main phase of leaf area development at lower levels of total crop mass	$g g^{-1}$	0.8	Current study مطالعه حاضر
FLF1B	ضریب تخصیص ماده خشک به برگ در سطوح بالاتر ماده خشک بخش هوایی Total crop mass ($g g^{-1}$) FLF1A 0.6 0.6 Partitioning coefficient to leaves during the main phase of leaf area development at higher levels of total crop mass	$g g^{-1}$	0.15	Current study مطالعه حاضر
WTOPL	ماده خشک بخش هوایی Total crop mass when leaf partitioning coefficient turns from FLF1A to FLF1B	$g g^{-1}$	210	Soltani & Sinclair 2012
FLF2	ضریب تخصیص ماده خشک به برگ از مرحله پایان تولید برگ تا آغاز پر شدن دانه Partitioning coefficient to leaves from termination leaf growth on mainstem to beginning seed growth	$g g^{-1}$	0.05	Soltani & Sinclair 2012
تشکیل عملکرد Yield formation				
FRTRL	کسر ماده خشک تاج قابل انتقال مجدد در شروع رشد دانه Fraction crop mass at the beginning of seed growth which is translocatable to grains	$g g^{-1}$	0.22	Soltani & Sinclair 2012
GCF	ضریب تبدیل دانه Grain conversion coefficient	$g g^{-1}$	1	Soltani & Sinclair 2012
PDHI	حداکثر مقدار شیب افزایش شاخص برداشت The rate of linear increase in harvest index during effective grain filling period	$g g^{-1} d^{-1}$	0.014	Soltani & Sinclair 2012
WDHI1	مقدار بحرانی ماده خشک در آغاز پر شدن دانه A turning point in relationship between PDHI and crop dry mass at beginning grain filling	$g m^{-2}$	0	Soltani & Sinclair 2012
WDHI2	مقدار بحرانی ماده خشک در آغاز پر شدن دانه A turning point in relationship between PDHI and crop dry mass at beginning grain filling	$g m^{-2}$	0	Soltani & Sinclair 2012

WDHI3	مقدار بحرانی ماده خشک در آغاز پر شدن دانه A turning point in relationship between PDHI and crop dry mass at beginning grain filling	g m^{-2}	9999	Soltani & Sinclair 2012
WDHI4	مقدار بحرانی ماده خشک در آغاز پر شدن دانه A turning point in relationship between PDHI and crop dry mass at beginning grain filling	g m^{-2}	9999	Soltani & Sinclair 2012
روابط آب Water relations				
iDEPORT	عمق ریشه در زمان سبز شدن Initial depth of roots at emergence or beginning leaf growth	mm	150	Soltani & Sinclair 2012
MEED	حداکثر عمق مؤثر ریشه Maximum effective depth of water extraction from soil	mm	1100	Soltani & Sinclair 2012
GRTDP	حداکثر سرعت افزایش عمق ریشه در شرایط مطلوب Potential daily increase (growth) in root depth	mm d^{-1}	33	Soltani & Sinclair 2012
TEC	ضریب کارایی تعرق Transpiration efficiency coefficient	Pa	9	Soltani & Sinclair 2012
WSSG	مقدار آستانه کسر آب قابل تعرق برای کاهش تولید ماده خشک FTSW* threshold when dry matter production starts to decline	-	0.25	Soltani & Sinclair 2012
WSSL	مقدار آستانه کسر آب قابل تعرق برای کاهش توسعه سطح برگ FTSW threshold when leaf area development starts to decline	-	0.35	Soltani & Sinclair 2012
WSSD	مقدار آستانه کسر آب قابل تعرق برای تاخیر در مراحل فنولوژیک A coefficient that specifies acceleration or retardation in development in response to water deficit	-	0	Soltani & Sinclair 2012
FLDKL	تعداد تلفات سیل متوالی Killing number of consecutive flooding	day	50	Soltani & Sinclair 2012
بودجه نیتروژن در گیاه Plant nitrogen budget				
SLNG	محتوای نیتروژن در برگ‌های سبز Specific leaf nitrogen in green leaves (target)	g N m^{-2}	1.95	Current study مطالعه حاضر
SLNS	محتوای نیتروژن در برگ‌های پیر (زرد) Specific leaf nitrogen in senesced leaves (minimum)	g N m^{-2}	0.4	Current study مطالعه حاضر
SNCG	محتوای نیتروژن در ساقه سبز Stem nitrogen concentration in green stems (target)	g g^{-1}	0.033	Current study مطالعه حاضر
SNCS1	حداقل محتوای نیتروژن در ساقه زرد Stem nitrogen concentration in senesced stems before beginning of seed growth (minimum)	g g^{-1}	0.005	Current study مطالعه حاضر
SNCS2	حداکثر محتوای نیتروژن در ساقه زرد Stem nitrogen concentration in senesced stems after beginning of seed growth (minimum)	g g^{-1}	0.0025	Current study مطالعه حاضر
GNC min	حداقل محتوای نیتروژن دانه Grain nitrogen concentration (minimum)	g g^{-1}	0.009	Current study مطالعه حاضر
GNC max	حداکثر محتوای نیتروژن دانه Grain nitrogen concentration (maximum)	g g^{-1}	0.025	Current study مطالعه حاضر
MXNUP	حداکثر سرعت جذب روزانه نیتروژن Maximum rate of nitrogen uptake	$\text{g N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$	0.45	Current study مطالعه حاضر

(FLF1A). در مراحل بعدی و با افزایش وزن خشک و در شرایط مطلوب رشد رویشی، سهم تخصیص به ساقه افزایش می‌یابد (۰/۱۵ = FLF1B و ۰/۰۵ = FLF2). تخصیص ماده خشک به برگ برای روزهای بیولوژیک قبل از سبز شدن و بعد از پایان رشد برگ صفر و مقدار ماده خشک تجمعی (WTOPL) ۲۱۰ گرم در مترمربع در نظر

توزیع ماده خشک: توزیع ماده خشک تولیدشده روزانه به اندام‌های مختلف گیاه با استفاده از ضرایب تخصیص ماده خشک صورت می‌گیرد. تخصیص ماده خشک بین برگ و ساقه با یک الگوی دو قسمتی توصیف می‌شود. در مراحل اولیه رشد و در مقادیر کم وزن خشک کل، بخش عمده ماده خشک به برگ اختصاص می‌یابد (۰/۸ =

سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۱ در سطح کشور روی ذرت رقم سینگل کراس ۷۰۴ انجام شده بود، بهره گرفته شد. این آزمایش‌ها به بررسی تأثیر عوامل مختلف زراعی شامل تراکم بوته، زمان و میزان مصرف کود نیتروژن و الگوی آبیاری بر عملکرد و اجزای عملکرد ذرت پرداخته بودند. برای انجام پارامتریابی، اطلاعات ورودی مورد نیاز مدل شامل جزئیات مدیریت زراعی (سال و تاریخ کاشت، تراکم، زمان و مقدار آبیاری و کود نیتروژن) و ویژگی‌های خاک منطقه اجرای هر آزمایش از مقالات علمی مندرج در **جدول ۲** استخراج گردید. داده‌های هواشناسی روزانه (حداقل و حداکثر دما، ساعات آفتابی و میزان بارش) برای سال‌های اجرای آزمایش‌ها از سازمان هواشناسی کشور تهیه شد. به‌منظور تکمیل داده‌های هواشناسی، داده‌های گم‌شده با استفاده از افزونه Weatherman در مدل زراعی DSSAT برآورد گردید (Pickering et al., 1994). همچنین میزان تشعشع خورشیدی روزانه با استفاده از رابطه آنگستروم و براساس ساعات آفتابی محاسبه شد.

پارامترهای خاک مورد نیاز مدل، با استناد به اطلاعات موجود در مقالات و با استفاده از داده‌های بانک اطلاعات خاک HC27 تکمیل گردید (Koo & Dimes, 2013). لازم به ذکر است که اعتبار این بانک اطلاعات خاک پیش‌تر در شرایط اقلیمی ایران مورد ارزیابی و تأیید قرار گرفته بود (Nehbandani, Soltani, Nourbakhsh, & Dadrasi, 2020). در نهایت، مدل برای سناریوهای مختلف آزمایش اجرا شد. جزئیات منابع مورد استفاده، تیمارهای آزمایش، سال و مکان اجرای آن‌ها در **جدول ۲** ارائه شده است.

با توجه به سوابق پارامتریابی و ارزیابی مدل SSM-iCrop برای ذرت (Manschadi et al., 2021; Zeinali et al., 2016)، فرآیند برآورد پارامترهای گیاهی به‌صورت مرحله‌ای انجام شد. در گام نخست، پارامترهای مرتبط با فنولوژی کالیبره شدند. پس از تعیین این پارامترها، تنظیم پارامترهای مربوط به توسعه سطح برگ صورت گرفت. در مرحله پایانی، پارامترهای شبیه‌سازی جذب و تخصیص نیتروژن، تولید ماده خشک و عملکرد مورد برآورد قرار گرفتند. در این مطالعه، پارامتریابی مدل با استفاده از روش کالیبراسیون دستی انجام شد. به این منظور، مقادیر پارامترهای گیاهی مؤثر در معادلات مدل، در محدوده‌های منطقی استخراج‌شده از مطالعات پیشین و گزارش‌های معتبر تغییر داده شدند و خروجی مدل با داده‌های واقعی مقایسه گردید. مقادیری از پارامترها که منجر به حداقل اختلاف بین داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهده‌شده گردید، به‌عنوان مقادیر نهایی پارامترها انتخاب شدند.

ارزیابی مدل: ارزیابی عملکرد مدل با استفاده از شاخص‌های آماری جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب تغییرات (CV) و ضریب همبستگی (r) انجام شد. علاوه بر این، برای ارزیابی میزان

گرفته می‌شود (Soltani et al., 2013; Soltani & Sinclair, 2012).

تشکیل عملکرد: تشکیل عملکرد در مدل با توجه به کل ماده خشک تولیدشده در دوره پر شدن دانه و ضریب تخصیص ماده خشک به دانه شبیه‌سازی می‌شود. مدل‌سازی سرعت رشد دانه و تشکیل عملکرد بر مبنای مفهوم افزایش خطی شاخص برداشت صورت می‌گیرد (Soltani & Sinclair, 2012). سرعت رشد واقعی دانه به تولید روزانه ماده خشک و ماده خشک حاصل از انتقال مجدد محدود می‌شود. مقدار ماده خشک قابل انتقال به دانه از حاصل ضرب کسر قابل انتقال ماده خشک تاج‌پوشش در شروع رشد دانه در مقدار ماده خشک تاج‌پوشش در شروع رشد دانه حاصل می‌شود. تفاضل سرعت رشد دانه و مقدار ماده خشک تولیدی روزانه، سهم انتقال مجدد روزانه را طی دوره پر شدن دانه تعیین می‌نماید.

موازنه آب: موازنه آب با در نظر گرفتن میزان بارندگی و آبیاری تا ۱۰ لایه از خاک شبیه‌سازی می‌شود و اثرات کمبود یا بیش‌بود آب بر رشدونمو گیاه ارزیابی می‌گردد. تعرق روزانه گیاه (TR) با استفاده از تولید ماده خشک روزانه (DDMP)، کمبود فشار بخار (VPD) و ضریب کارایی تعرق (TEC) محاسبه می‌گردد (Soltani & Sinclair, 2012).

$$TR = (DDMP \times VPD) / TEC \quad (5)$$

جذب و تخصیص نیتروژن: تقاضای روزانه نیتروژن قبل از رشد دانه براساس افزایش روزانه شاخص سطح برگ سبز (GLAI)، افزایش روزانه ماده خشک ساقه (GST)، غلظت نیتروژن در واحد سطح برگ سبز (SLNG) و غلظت نیتروژن ساقه سبز (SNCG) تعیین می‌شود. در صورت کمبود نیتروژن جذب‌شده، ابتدا غلظت نیتروژن ساقه کاهش یافته و در مراحل شدیدتر، نیتروژن از برگ به ساقه منتقل می‌شود.

پس از شروع رشد دانه، تقاضای روزانه نیتروژن دانه از حاصل ضرب سرعت رشد دانه در غلظت نیتروژن دانه محاسبه می‌گردد. در صورت محدودیت جذب نیتروژن، نیاز دانه از انتقال نیتروژن برگ و ساقه تأمین می‌شود. میزان نیتروژن قابل انتقال روزانه از برگ و ساقه براساس شاخص سطح برگ، وزن خشک ساقه و اختلاف غلظت نیتروژن در اندام‌های سبز و زرد تعیین می‌شود. بخشی از نیتروژن موجود در برگ و ساقه به‌عنوان نیتروژن ساختاری و غیرقابل انتقال در نظر گرفته می‌شود. میزان انتقال نیتروژن از برگ به نسبت نیتروژن قابل انتقال در برگ به کل نیتروژن قابل انتقال بستگی دارد (Soltani et al., 2013; Soltani & Sinclair, 2012).

پارامتریابی مدل: به‌منظور پارامتریابی مدل SSM-iCrop، از داده‌های حاصل از آزمایش‌های مزرعه‌ای متعددی که در بازه

تولید و توزیع ماده خشک در مدل‌های شبیه‌سازی گیاهی تا حدود زیادی تحت تأثیر زمان وقوع مراحل فنولوژی قرار می‌گیرد. به علاوه مراحل فنولوژی نقش بسزایی در سیستم مدیریت کشت دارند. به همین دلیل، تعیین دقیق پارامترهای مرتبط با فنولوژی اهمیت زیادی در کارایی مدل شبیه‌سازی دارد (Nehbandani, Soltani, Zeinali, 2015; Raeisi, & Najafi, 2015). مقادیر مشاهده‌شده برای مراحل فنولوژیک به ترتیب، روز تا سبز شدن ۴ تا ۹، برای روز تا تاسل‌دهی ۵۰ تا ۸۴، روز تا ابریشم‌دهی ۵۲ تا ۸۶ و روز تا رسیدگی فیزیولوژیک بین ۹۷ و ۱۳۷ روز متغیر بود. نتایج ارزیابی نشان داد که مدل SSM-iCrop با دقت خوبی مراحل رشد فنولوژیک شامل روز تا سبز شدن، روز تا تاسل‌دهی، روز تا ابریشم‌دهی و روز تا رسیدگی فیزیولوژیک را شبیه‌سازی کرده است. براساس نتایج، مقدار جذر میانگین مربعات خطا برای پیش‌بینی مراحل رشد فنولوژیکی ۱۳/۲۲ روز و ضریب تغییرات بین مقادیر مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده ۱۷/۴ درصد برآورد شد. همچنین همبستگی بالای نتایج مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده ($r = 0.97$) نشان‌دهنده دقت بالای مدل در شبیه‌سازی مراحل رشد فنولوژی ذرت است (شکل ۲ الف).

انحراف مقادیر شبیه‌سازی‌شده از مقادیر مشاهده‌شده، از نمودار پراکنش با خط ۱:۱ و حاشیه ۲۰ درصد استفاده گردید. رابطه‌های مورد استفاده برای محاسبه شاخص‌های آماری به شرح زیر است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2} \quad (6)$$

$$CV = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}}}{\sum_{i=1}^n x_i} \quad (7)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (8)$$

که در آن‌ها، X_i : مقادیر مشاهده‌شده، Y_i : مقادیر شبیه‌سازی‌شده، n : تعداد کل مشاهدات، $\bar{X}$: میانگین مقادیر مشاهده‌شده و $\bar{Y}$: میانگین مقادیر شبیه‌سازی‌شده است.

نتایج

در این مطالعه، دو پارامتر مرتبط با مراحل نمو فنولوژیک (bdEMREJU و bdSILPM)، دو پارامتر مرتبط با گسترش سطح برگ (فیلوکرون و PLAPOW)، دو پارامتر مرتبط با تجمع ماده خشک (ضرایب تخصیص ماده خشک به برگ) و همه پارامترهای مرتبط با تخصیص نیتروژن در گیاه تغییر یافت. پارامترهای تغییر یافته و مقدار اولیه آن‌ها در مدل در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۲- آزمایش‌های استفاده‌شده جهت برآورد پارامتر وارزیابی مدل SSM-iCrop برای ذرت دانه‌ای رقم سینگل کراس ۷۰۴

Table 2- Experiments used for parameterization and evaluation of SSM-iCrop model for Maize (SC704)

سال، مکان اجرای آزمایش Experiment location, season and year	تیمارها Treatments	منبع Reference
Shiraz (Fars), 1999	تراکم و سطوح نیتروژن Plant density, nitrogen rates	(Sadeghi & Bahrani, 2001)
Shiraz (Fars), 1999	سطوح نیتروژن و رطوبت Nitrogen levels, water regime	(Ghadiri & Majidian, 2003)
Khuzestan, 2003- 2004	تراکم، سطوح نیتروژن و رطوبت Plant density, nitrogen levels, water regime	(Lak, Naderi, Siyadat, Ayeneband, & Nourmohammadi, 2006)
Saveh (Markazi), 2006	سطوح نیتروژن Nitrogen Levels	(Eradatmand Asli, Farrokhi, & Usefi Rad, 2009)
Shiraz (Fars), 2007- 2008	آرایش کاشت، تراکم و سطوح نیتروژن Planting pattern, density, nitrogen levels	(Izadi & Emam, 2009)
Karaj (Alborz), 2007	سطوح نیتروژن Nitrogen Levels	(Karimi, Mazaheri, Peyghambari, & Mirabzadeh Ardakani, 2011)
Gorgan (Golestan), 2012	تاریخ کاشت و تراکم Planting date, plant density	(Zeinali et al., 2016)
Kerman, 2013- 2014	سطوح نیتروژن Nitrogen Levels	(Madadzadeh, Kambouzia, Soufizadeh, & Panahi, 2017)
Kermanshah, 2014- 2015	آبیاری و سطوح نیتروژن Irrigation level, nitrogen levels	(Ghobadi et al., 2017)
Kerman, 2014	سطوح نیتروژن Nitrogen levels	(Madadzadeh & Amiri, 2022)

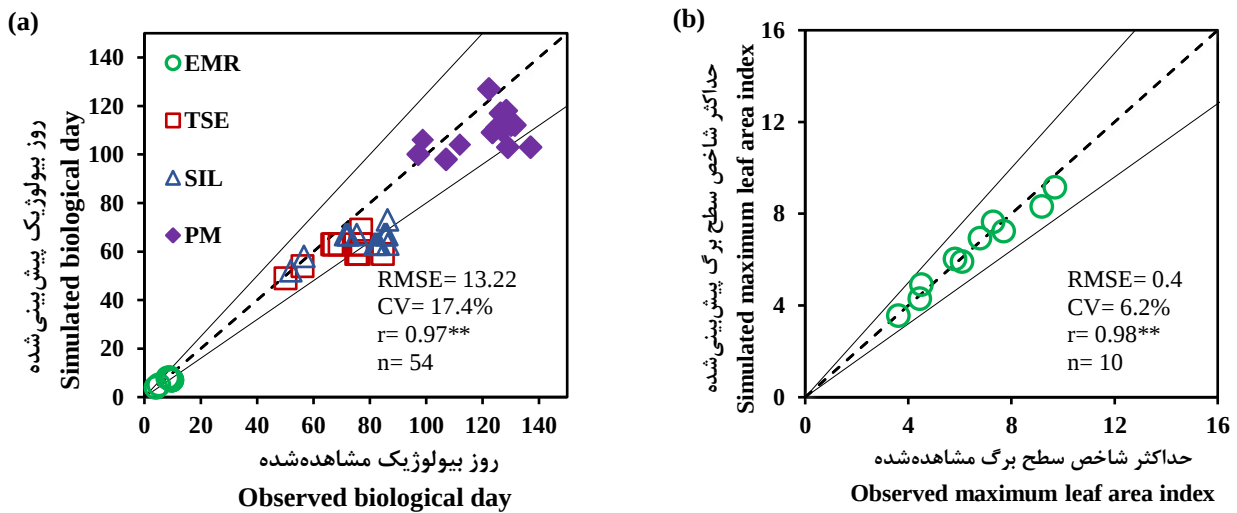
جدول ۳- پارامترهای گیاهی تغییر یافته در مدل SSM-iCrop برای ذرت رقم ۷۰۴
Table 3- Cultivar-specific modified input parameters used for SSM-iCrop for maize (SC704)

علامت اختصاری Acronym	پارامتر Parameter	واحد Unit	اولیه Default	تغییر یافته Modified
bdEMREJU	روز بیولوژیک از سبز شدن تا پایان رشد آغازی‌های برگی Biological day from emergence to end of juvenile	bd	8.5	8
bdSILPM	روز بیولوژیک از ابریشم‌دهی تا رسیدگی فیزیولوژیک Biological day from silking/end of leaf growth on main-stem to physiological maturity	bd	33.8	33
Phyl	فیلوکرون Phyllochron	°C leaf ⁻¹	33.9	38.9
PLAPOW8	توان رابطه بین سطح برگ و تعداد گره Coefficients in power relationship between plant leaf area and main-stem node number	g g ⁻¹	2.9	2.78
FLF1A	ضریب تخصیص ماده خشک به برگ در مرحله اصلی توسعه برگ Partitioning coefficient to leaves during main phase of leaf area development at lower levels of total crop mass	g g ⁻¹	0.7	0.6
FLF1B	ضریب تخصیص ماده خشک به برگ در مرحله دوم توسعه برگ Partitioning coefficient to leaves during main phase of leaf area development at higher levels of total crop mass	g g ⁻¹	0.15	0.14
SLNG	مقدار نیتروژن در واحد سطح برگ در برگ‌های سبز (جوان) Specific leaf nitrogen in green leaves (target)	g m ⁻²	1.35	1.9
SLNS	مقدار نیتروژن در برگ‌های زرد (پیر) Specific leaf nitrogen in senesced leaves (minimum)	g m ⁻²	0.4	0.25
SNCG	غلظت نیتروژن در ساقه سبز Stem nitrogen concentration in green stems (target)	g g ⁻¹	0.0106	0.04
SNCS1	غلظت نیتروژن در ساقه از سبز شدن تا شروع پر شدن دانه Stem nitrogen concentration in senesced stems from emergence to begin seed growth	g g ⁻¹	0.0025	0.005
SNCS2	غلظت نیتروژن در ساقه از شروع پر شدن دانه تا رسیدگی فیزیولوژیک Stem nitrogen concentration in senesced stems from BSG to PM	g g ⁻¹	0.0025	0.0025
GNC (min)	حداقل غلظت نیتروژن دانه Grain nitrogen concentration minimum	g g ⁻¹	0.011	0.009
GNC (max)	حداکثر غلظت نیتروژن دانه Grain nitrogen concentration maximum	g g ⁻¹	0.011	0.0025
MXNUP	حداکثر سرعت جذب روزانه نیتروژن Maximum uptake rate of nitrogen	g m ⁻² . d ⁻¹	0.6	0.62

گرم بر مترمربع گزارش شده بود. براساس نتایج حاصل از ارزیابی مدل، جذر میانگین مربعات خطا برای عملکرد بیولوژیک ۴۳۱ گرم بر مترمربع و برای عملکرد دانه ۱۶۱ گرم بر مترمربع برآورد شد. ضریب تغییرات بین نتایج مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده در عملکرد بیولوژیک ۲۳/۹ درصد و در عملکرد دانه ۱۶/۹ درصد محاسبه شد. ضریب همبستگی بین نتایج مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده در عملکرد بیولوژیک و عملکرد دانه به‌ترتیب ۰/۸۱ و ۰/۶۶ برآورد گردید. در شکل ۳ که رابطه خطی برازش‌یافته بین مقادیر عملکرد بیولوژیک و عملکرد دانه مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده را نشان می‌دهد، اکثر نقاط بین خطوط ± 20 درصد قرار گرفته‌اند. این امر، برآورد صحیح پارامترهای ذرت و کارایی مدل در تخمین مقدار عملکرد را تأیید می‌نماید.

در آزمایش‌های استفاده‌شده برای ارزیابی مدل (جدول ۲)، مقدار شاخص برگ مشاهده‌شده بین ۳/۵ تا ۹/۶ متغیر بود. نتایج شبیه‌سازی حداکثر شاخص سطح برگ در شکل ۲ نشان داده شده است. براساس نتایج، جذر میانگین مربعات خطا برای حداکثر شاخص سطح برگ ۰/۴، ضریب تغییرات و ضریب همبستگی بین مقادیر مشاهده‌شده و پیش‌بینی‌شده به‌ترتیب ۶/۲ درصد ۰/۹۸ برآورد گردید. براساس نتایج ارزیابی، مدل دقت بالایی در پیش‌بینی حداکثر شاخص سطح برگ داشت (شکل ۲- ب).

مقدار عملکرد بیولوژیک مشاهده‌شده در آزمایشات مختلف (جدول ۲)، از ۱۰۴۹ تا ۲۷۰۵/۷ گرم بر مترمربع متغیر بود. همچنین دامنه تغییرات داده‌های مشاهده‌شده برای عملکرد دانه بین ۵۱۹/۸ و ۱۶۹۱

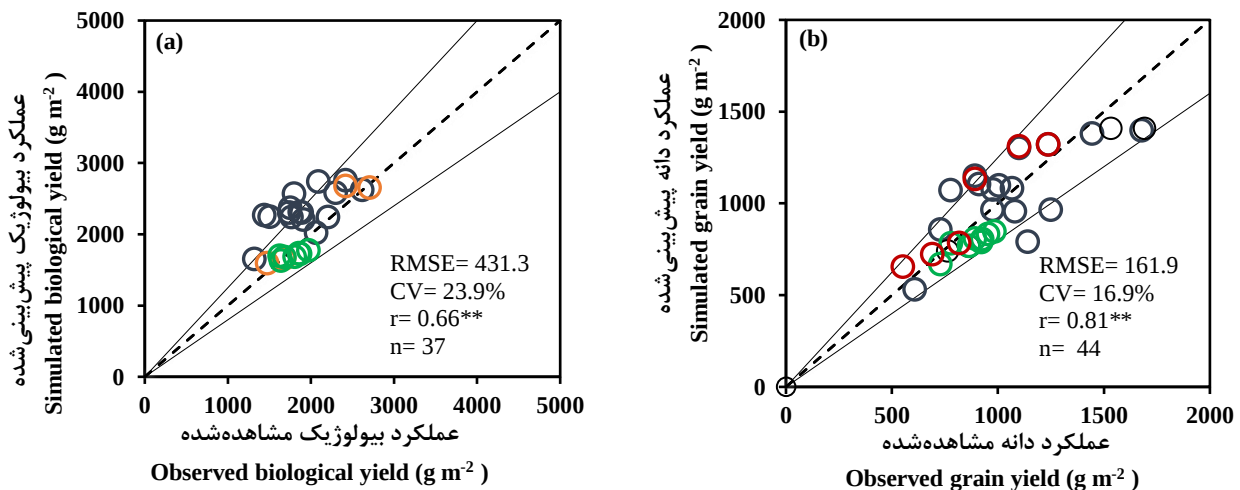


شکل ۲- (الف). مقادیر مشاهده شده و شبیه سازی شده روز تا مراحل مختلف فنولوژی (از سبز شدن تا رسیدگی فیزیولوژیک) و (ب) حداکثر شاخص سطح برگ شبیه سازی شده نسبت به مشاهده شده

Figure 2- Simulated versus observed (a) days to phenological stages, from germination to physiological maturity, and (b) maximum leaf area index

دامنه ۲۰ درصد اختلاف بین داده های شبیه سازی و مشاهده شده با خطوط ممتد و خط ۱:۱ به صورت با خط نقطه چین نشان داده شده است. همچنین ** نشان دهنده معنی داری در سطح یک درصد است.

The solid lines represent the 20% range of discrepancy between simulated and observed values; the dashed line indicates the 1:1 line. Asterisks (**) indicate significance at $\alpha = 0.01$.



شکل ۳- عملکرد بیولوژیک (a) و عملکرد دانه (b) شبیه سازی شده در مقابل مشاهده شده

Figure 3- Simulated versus observed biological yields (a) and grain yield (b)

دامنه ۲۰ درصد اختلاف بین داده های شبیه سازی و مشاهده شده با خطوط ممتد و خط ۱:۱ به صورت با خط نقطه چین نشان داده شده است. همچنین ** نشان دهنده معنی داری در سطح یک درصد است.

The solid lines represent the 20% range of discrepancy between simulated and observed values; the dashed line indicates the 1:1 line. Asterisks (**) indicate significance at $\alpha = 0.01$.

بحث

در این مطالعه، مدل SSM-iCrop برای پیش‌بینی رشد و عملکرد ذرت در ایران پارامتریابی و ارزیابی شد. مدل، عملکرد خوبی در پیش‌بینی مراحل فنولوژیک (شکل ۲- الف)، شاخص سطح برگ (شکل ۲- ب) و عملکرد (شکل ۳) داشت و ضریب تغییرات در دامنه استاندارد و قابل قبول (۳۰ درصد- ۱۰ درصد) برای مدل‌های گیاهی قرار گرفت (Hammer et al., 2010). عملکرد مدل برای شبیه‌سازی رشد و عملکرد ذرت در مقایسه با سایر مطالعات قابل قبول بود. در مطالعه‌ای، یکوب و همکاران (Yakoub, Lloveras, Biau, Lindquist, & Lizaso, 2017) عملکرد مدل DSSAT را برای پیش‌بینی رشد و عملکرد و جذب نیتروژن ارزیابی کردند. در مطالعه آن‌ها، RMSE برای عملکرد بیولوژیک و عملکرد دانه به ترتیب ۳۳۲۴ و ۱۳۱۳ کیلوگرم در هکتار و شاخص تبیین (R^2) به ترتیب ۰/۷۰ و ۰/۳۰ برآورد شد. به و همکاران (Beah et al., 2021) مدل APSIM را برای ارقام مختلف ذرت دانه‌ای پارامتریابی و ارزیابی کردند. در مطالعه مذکور، شاخص RMSE برای روز تا رسیدگی ۳/۴ تا ۴/۲ روز، برای شاخص سطح برگ ۰/۲۴ تا ۰/۳، برای عملکرد بیولوژیک ۵۱/۷ تا ۹۸/۸ گرم بر مترمربع و برای عملکرد دانه در حدود ۳۰ تا ۲۸ گرم بر مترمربع ارزیابی شد. دقت نتایج مطالعه حاضر نسبت به مطالعه آن‌ها قابل قبول است. باسو و همکاران (Basso, Liu, & Ritchie, 2016)، عملکرد مدل CERES-Maize را در مطالعات و شرایط مختلف رشد ارزیابی کردند. متوسط شاخص RMSE برای شاخص سطح برگ در بیش از ۲۰ مطالعه مختلف ۰/۸۳ برآورد شد. کارایی مدل حاضر در پیش‌بینی سطح برگ به‌طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر بود ($RMSE = 0.4$).

زینلی و همکاران (Zeinali et al., 2016) مدل SSM-iCrop را برای ذرت در شرایط گرگان پارامتریابی کردند. در مطالعه آن‌ها، جذر میانگین مربعات خطا و ضریب تغییرات برای روز تا رسیدگی به ترتیب ۰/۱۵ و ۰/۱۷ درصد، ضریب تغییرات (CV) برای عملکرد بیولوژیک و عملکرد دانه به ترتیب ۸/۱۹ درصد و ۴/۱۱ درصد و ضریب تبیین (R^2) برای عملکرد بیولوژیک و عملکرد دانه به ترتیب ۰/۸۳ و ۰/۷۶ گزارش شد. مطالعه حاضر عملکرد دانه را با دقت بالاتری نسبت به مطالعه آن‌ها شبیه‌سازی نمود. به‌علاوه در مطالعه آن‌ها نیتروژن در حالت پتانسیل در نظر گرفته شد و پویایی نیتروژن شبیه‌سازی نگردید. منشادی و همکاران (Manschadi et al., 2021)، مدل SSM-iCrop را برای شبیه‌سازی عملکرد ذرت دانه‌ای در شرایط اتریش پارامتریابی و ارزیابی کردند. براساس نتایج آن‌ها، جذر میانگین مربعات خطا برای عملکرد دانه ۳۲/۶۳ گرم و ضریب تبیین (R^2) بین نتایج مشاهده‌شده و پیش‌بینی‌شده ۰/۹۸ برآورد شد و نتایج دقت بسیار بالایی در پیش‌بینی عملکرد دانه داشت. با توجه به

آنکه صحت و دقت پارامترهای مشاهده‌شده نقش مهمی در ارزیابی عملکرد مدل دارد، کاهش دقت نتایج مطالعه حاضر در مقایسه با نتایج آن‌ها را می‌توان تا حد زیادی به دقت داده‌های مشاهده‌شده مرتبط دانست. لازم به ذکر است که اگرچه تیمارهای کودی نیتروژن در این مطالعه گنجانده شده است و اثر پارامترهای مرتبط با نیتروژن بر عملکرد، تولید ماده خشک و سطح برگ بررسی شده، اما صفات مرتبط با نیتروژن به‌طور مجزا ارزیابی نشدند، زیرا داده‌های دقیق و یکپارچه‌ای برای تغییرات نیتروژن در خاک و سیستم گیاه (ریشه، ساقه، برگ و دانه) در کشور ثبت نشده است. در مطالعات موجود، تنها اثر کود نیتروژن بر عملکرد و اجزای عملکرد بررسی شده، اما محتوای نیتروژن در برگ و دانه اندازه‌گیری نشده بود، در برخی موارد اطلاعات خاک ناقص یا تعداد اندازه‌گیری‌ها برای شبیه‌سازی ناکافی بود. به همین دلیل، امکان ارزیابی مدل (مقایسه پیش‌بینی مدل با داده‌های واقعی) در خصوص صفات مرتبط تغییرات نیتروژن در گیاه فراهم نبود.

اگرچه پارامتریابی و ارزیابی مدل SSM-iCrop در شبیه‌سازی عملکرد و پویایی نیتروژن برای ذرت محدود است، اما این مدل در مطالعات مختلف و برای گیاهان متعدد با موفقیت مورد استفاده قرار گرفته است (Manschadi et al., 2022; Nehbandani et al., 2020). نتایج مقایسه این مدل با سایر مدل‌های گیاهی نشان‌دهنده کارایی مدل در شبیه‌سازی عملکرد است. برای مثال، سلطانی و سینکلر (Soltani & Sinclair, 2015) در مقایسه عملکرد مدل SSM-iCrop با سه مدل گیاهی DSSAT، APSIM و CropSyst در شبیه‌سازی عملکرد گندم بیان کردند که مدل SSM-iCrop علی‌رغم تعداد پارامترهای کمتر (۵۵ پارامتر) در مقایسه با APSIM (۲۹۲ پارامتر) و DSSAT (۲۱۱ پارامتر) عملکرد گندم را با دقت بالایی پیش‌بینی نمود. ضریب تغییرات مقادیر شبیه‌سازی‌شده و مقادیر مشاهده‌شده در این مدل ($CV = 8\%$) پایین‌تر از سایر مدل‌ها برآورد شد. در مطالعه منشادی و همکاران (Manschadi et al., 2021) عملکرد دو مدل SSM-iCrop و APSIM در شبیه‌سازی عملکرد و پویایی نیتروژن ذرت دانه‌ای مورد مقایسه قرار گرفت. آن‌ها عملکرد مدل SSM-iCrop را بیشتر برآورد کردند. در مدل SSM، شاخص RMSE برای عملکرد دانه ۳۲/۶۳ و برای مقادیر نیتروژن اندام‌های هوایی ۱/۴ گرم بر مترمربع بود، درحالی‌که این مقادیر در مدل APSIM به ترتیب ۵۹/۹۲ و ۲/۴ گرم بر مترمربع برآورد شد. همچنین ضریب تبیین (R^2) بین نتایج مشاهده‌شده و پیش‌بینی‌شده در مدل SSM و APSIM به ترتیب ۰/۹۸ و ۰/۹۷ گزارش گردید.

از آنجاکه عملکرد مدل‌های گیاهی در شبیه‌سازی پاسخ گیاه به عوامل اقلیمی، خاکی، ژنتیکی و مدیریتی تا حد زیادی وابسته به کیفیت پارامتریابی است (Manschadi et al., 2021) و با توجه به نتایج رضایت‌بخش ارزیابی مدل SSM-iCrop در کشور، می‌توان از

این مدل در مطالعات گسترده از جمله بهینه‌سازی مدیریت کشت ذرت دانه‌ای (شامل بهینه‌سازی مصرف کود نیتروژن، بهینه‌سازی تاریخ و تراکم کاشت و الگوی آبیاری)، پیش‌بینی رشد و عملکرد ذرت، خلاء عملکرد، شناسایی صفات مطلوب گیاهی برای افزایش عملکرد ذرت دانه‌ای، و ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر رشد و عملکرد ذرت دانه‌ای در کشور استفاده گردد. محققان پس از تأیید نتایج ارزیابی مدل، از این مدل در مطالعه دیگری برای شناسایی صفات مؤثر بر افزایش عملکرد ذرت دانه‌ای در کشور استفاده کرده‌اند.

نتیجه‌گیری

به‌طور کلی، نتایج حاصل از شبیه‌سازی با مدل SSM-iCrop در مقایسه با سایر مدل‌های شبیه‌سازی گیاهی، در محدوده قابل قبول شاخص‌های آماری (مانند ضریب همبستگی و ضریب تغییرات) قرار داشت و عملکرد مدل در پیش‌بینی مراحل فنولوژی، سطح برگ، عملکرد بیولوژیک و عملکرد دانه، رضایت‌بخش ارزیابی گردید. با استناد به نتایج ارزیابی و با در نظر گرفتن تنوع داده‌های مشاهده‌شده که از مناطق مختلف کشت ذرت در ایران و تحت سطوح متفاوت مصرف کود نیتروژن جمع‌آوری شده بود، می‌توان نتیجه گرفت که مدل SSM-iCrop با پارامترهای گیاهی واسنجی‌شده در این پژوهش، ابزاری توانمند و قابل اعتماد برای استفاده در طیف وسیعی از مطالعات مرتبط با ذرت در کشور است. در این مطالعه، با واسنجی دقیق مدل و ارائه مجموعه‌ای معتبر از

پارامترهای فیزیولوژیک که در شرایط واقعی مزرعه‌ای آزموده شده‌اند، زمینه برای به‌کارگیری مؤثر مدل در تحلیل سناریوهای مدیریتی، مطالعات خلأ عملکرد، شناسایی صفات مطلوب در برنامه‌های به‌نژادی و بهینه‌سازی سیستم‌های مدیریت زراعی ذرت از جمله تعیین مقادیر بهینه مصرف نیتروژن، زمان و تراکم کاشت، و ارزیابی الگوهای آبیاری فراهم شده است. از آنجاکه پارامترهای به‌دست‌آمده از دقت بالایی برخوردارند، سایر پژوهشگران می‌توانند بدون نیاز به انجام مجدد فرآیند زمان‌بر و پرهزینه واسنجی، از این مدل در مطالعات مشابه بهره‌برداری نمایند. این موضوع می‌تواند منجر به صرفه‌جویی قابل توجهی در زمان و منابع پژوهشی شده و بستر مناسبی برای گسترش مطالعات کاربردی در حوزه تولید ذرت فراهم آورد.

علاوه‌بر این، با توجه به واسنجی مدل در شرایط اقلیمی غالب مناطق کشت ذرت در ایران، استفاده از آن در ارزیابی کمی اثرات تغییر اقلیم بر رشد و عملکرد، و همچنین شناسایی صفات گیاهی مؤثر در پایداری عملکرد، می‌تواند به تدوین راهکارهای سازگاری با تغییرات اقلیمی و توسعه برنامه‌های به‌نژادی هدفمند کمک شایانی نماید. در عین حال، با توجه به محدودیت دسترسی به داده‌های جامع در زمینه پویایی نیتروژن در این مطالعه، پیشنهاد می‌شود که در صورت فراهم شدن داده‌های مرتبط در آینده، فرآیند پارامتریابی و ارزیابی مجدد مدل برای این بخش نیز در دستور کار قرار گیرد؛ اقدامی که می‌تواند موجب ارتقاء دقت مدل در شبیه‌سازی چرخه نیتروژن و در نتیجه بهبود پیش‌بینی عملکرد شود.

References

- Abidi, A., Soltani, A., & Zeinali, E. (2024). Identifying plant traits to increase wheat yield under irrigated conditions. *Heliyon*, 10(11). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e31734>
- Ali, M. G. M., Ahmed, M., Ibrahim, M. M., El Baroudy, A. A., Ali, E. F., Shokr, M. S., Aldosari, A. A., Majrashi, A., & Kheir, A. M. S. (2022). Optimizing sowing window, cultivar choice, and plant density to boost maize yield under RCP8.5 climate scenario of CMIP5. *International Journal of Biometeorology*, 66(5), 971-985. <https://doi.org/10.1007/s00484-022-02253-x>
- Basso, B., Liu, L., & Ritchie, J. T. (2016). A Comprehensive Review of the CERES-Wheat, -Maize and -Rice Models' Performances. In D. L. Sparks ed., *Advances in Agronomy*, 136, 27-132. Academic Press, Cambridge, UK. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2015.11.004>
- Beah, A., Kamara, A. Y., Jibrin, J. M., Akinseye, F. M., Tofa, A. I., & Ademulegun, T. D. (2021). Simulation of the optimum planting windows for early and intermediate-maturing maize varieties in the nigerian savannas using the APSIM model. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.624886>
- Chisanga, C. B., Moombe, M., & Elijah, P. (2022). Modelling climate change impacts on maize. *CABI Reviews*, 2022. <https://doi.org/10.1079/cabireviews202217008>
- Eradatmand Asli, D., Farrokhi, G. R., & Usefi Rad, M. (2009). Effect of pyridoxine and different levels of nitrogen on yield and yield components of corn (*Zea mays* L. Var. SC. 704). *Journal on Plant Science Researches*, 14(2), 9.
- FAOSTAT. (2021). <http://www.fao.org/faostat>
- García-Lara, S., & Serna-Saldivar, S. O. (2019). Chapter 1 - Corn history and culture. pp. 1-18 in S. O. Serna-Saldivar (Ed.), *Corn* (3rd Edition). AACC International Press and Woodhead Publishing, Cambridge, UK. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811971-6.00001-2>
- Ghadiri, H., & Majidian, M. (2003). Effect of different nitrogen fertilizer levels and moisture stress during milky

- and dough stages on grain yield, yield components and water use efficiency of corn (*Zea mays* L.). *Journal of Water and Soil Science*, 7(2), 103-113. (in Persian with English abstract). <http://jstnar.iut.ac.ir/article-1-467-fa.html>
10. Ghobadi, R., Ghobadi, M., Mondani, F., Jalali Honarmand, S., & Farhadi Bansooleh, B. (2017). Effect of irrigation and nitrogen interactions on phenologic characteristics and growth indices of seed corn. *Plant Process and Function*, 6(21), 20. (in Persian with English abstract). <http://dorl.net/dor/20.1001.1.23222727.1396.6.21.13.5>
11. Guiguitant, J., Marrou, H., Vadez, V., Gupta, P., Kumar, S., Soltani, A., Sinclair, T. R., & Ghanem, M. E. (2017). Relevance of limited-transpiration trait for lentil (*Lens culinaris* Medik.) in South Asia. *Field Crops Research*, 209, 96-107. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.04.013>
12. Haghshenas, H., Soltani, A., Ghanbari Malidarreh, A., Ajam Norouzi, H., & Dastan, S. (2020). Selecting the ideotype of improved rice cultivars using multiple regression and multivariate models. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 66(8), 1134-1153. <https://doi.org/10.1080/03650340.2019.1658866>
13. Hammer, G. L., van Oosterom, E., McLean, G., Chapman, S. C., Broad, I., Harland, P., & Muchow, R. C. (2010). Adapting APSIM to model the physiology and genetics of complex adaptive traits in field crops. *Journal of Experimental Botany*, 61(8), 2185-2202. <https://doi.org/10.1093/jxb/erq095>
14. Hammer, G., Messina, C., Wu, A., & Cooper, M. (2019). Biological reality and parsimony in crop models—why we need both in crop improvement. *In Silico Plants*, 1(1), diz010. <https://doi.org/10.1093/insilicoplants/diz010>
15. Izadi, M. H., & Emam, Y. (2009). Effect of planting pattern, plant density and nitrogen levels on grain yield and yield components of maize cv. SC704. *Iranian Journal of Crop Sciences*, 12(3), 13. (in Persian with English abstract). <http://dorl.net/dor/20.1001.1.15625540.1389.12.3.2.3>
16. Jing, Q., Boote, K. J., Liu, K., Hoogenboom, G., White, J. W., Smith, W., Jégo, G., Grant, B., Crépeau, M., Shang, J., Liu, J., Chipanshi, A., & Qian, B. (2024). Simulating the development and growth of lentil using the CSM-CROPGRO model. *Agronomy Journal*, 116(5), 23. <https://doi.org/10.1002/agj2.21654>
17. Kafaie Ghaeini, A., Soltani, A., Deihimfard, R., & Ajam Norouzi, H. (2023). Modifying sowing date as an adaptation strategy to climate change in grain maize (*Zea mays* L.) under mild-arid climates as simulated by the SSM-Maize model. *International Journal of Plant Production*, 17(3), 437-447. <https://doi.org/10.1007/s42106-023-00252-5>
18. Karimi, H., Mazaheri, D., Peyghambari, S. A., & Mirabzadeh Ardakani, M. (2011). Effect of organic and chemical fertilizers application on grain yield and yield components of maize (*Zea mays* L.) SC704. *Iranian Journal of Crop Sciences*, 13(4), 16. (in Persian with English abstract). <http://dorl.net/dor/20.1001.1.15625540.1390.13.4.2.2>
19. Kimball, B. A., Thorp, K. R., Boote, K. J., Stockle, C., Suyker, A. E., Evett, S. R., Brauer, D. K., Coyle, G. G., Copeland, K. S., Marek, G. W., Colaizzi, P. D., Acutis, M., Alimagham, S., Archontoulis, S., Babacar, F., Barcza, Z., Basso, B., Bertuzzi, P., Constantin, J., De Antoni Migliorati, M., Dumont, B., Durand, J. L., Fodor, N., Gaiser, T., Garofalo, P., Gayler, S., Giglio, L., Grant, R., Guan, K., Hoogenboom, G., Jiang, Q., Kim, S. H., Kisekka, I., Lizaso, J., Masia, S., Meng, H., Mereu, V., Mukhtar, A., Perego, A., Peng, B., Priesack, E., Qi, Z., Shelia, V., Snyder, R., Soltani, A., Spano, D., Srivastava, A., Thomson, A., Timlin, D., Trabucco, A., Webber, H., Weber, T., Willaume, M., Williams, K., van der Laan, M., Ventrella, D., Viswanathan, M., Xu, X., & Zhou, W. (2023). Simulation of evapotranspiration and yield of maize: An inter-comparison among 41 maize models. *Agricultural and Forest Meteorology*, 333, 109396. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109396>
20. Kiniry, J. R. (1991). Maize phasic development. In R. J. Hanks & J. T. Ritchie (Eds.), *Modeling plant and soil systems* (pp. 55–70). Agronomy Monograph No. 31. Madison, WI: American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr31.c4>
21. Koo, J., & Dimes, J. (2013). *HC27 Generic Soil Profile Database*. Harvard Dataverse. <https://doi.org/10.7910/DVN/90WJ9W>
22. Lak, S., Naderi, A., Siyadat, S. A., Ayenehband, A., & Nourmohammadi, G. (2006). Effect of different levels of nitrogen and plant density on grain yield and its components and water use efficiency of maize (*Zea mays* L.) cv. SC. 704 under different moisture conditions in Khuzestan. *Iranian Journal of Crop Sciences*, 8(2), 153-170. (in Persian with English abstract). <http://agrobreedjournal.ir/article-1-297-fa.html>
23. Madadzadeh, M., & Amiri, S. R. (2022). Evaluation of growth, development and yield of maize cultivars for sustainable nitrogen management. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 32(4), 22. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22034/saps.2022.47202.2717>
24. Madadzadeh, M., Amiri, S. R., Kambouzia, J., & Soufizadeh, S. (2023). Calibration and evaluation of APSIM model for simulation of growth and development of KSC 704 and maxima maize hybrids under different amounts of nitrogen. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 20(4), 18. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jcsc.2022.71744.1071>
25. Madadzadeh, M., Kambouzia, J., & Soufizadeh, S. (2017). Evaluation of maize (*Zea mays* L.) hybrids thermal time requirements of different soil fertility in the arid climate of Kerman. *Iranian Journal of Applied Ecology*,

- 6(2), 10. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.18869/acadpub.ijae.6.2.43>
26. Madadzadeh, M., Kambouzia, J., Soufizadeh, S., & Panahi, B. (2017). Evaluation of physiological responses of maize hybrids to different nitrogen levels in Kerman province, Iran. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 15(2), 14. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/gsc.v15i2.60121>
27. Manschadi, A. M., Eitzinger, J., Breisch, M., Fuchs, W., Neubauer, T., & Soltani, A. (2021). Full parameterisation matters for the best performance of crop models: Inter-comparison of a simple and a detailed maize model. *International Journal of Plant Production*, 15(1), 61-78. <https://doi.org/10.1007/s42106-020-00116-2>
28. 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>
29. Messina, C. D., Sinclair, T. R., Hammer, G. L., Curan, D., Thompson, J., Oler, Z., Gho, C., & Cooper, M. (2015). Limited-transpiration trait may increase maize drought tolerance in the US corn belt. *Agronomy Journal*, 107(6), 1978-1986. <https://doi.org/10.2134/agronj15.0016>
30. Muchow, R. C., & Sinclair, T. R. (1991). Water deficit effects on maize yields modeled under current and "greenhouse" climates. *Agronomy Journal*, 83(6), 1052-1059. <https://doi.org/10.2134/agronj1991.00021962008300060023x>
31. Muchow, R. C., Sinclair, T. R., & Bennett, J. M. (1990). Temperature and solar radiation effects on potential maize yield across locations. *Agronomy Journal*, 82(2), 338-343. <https://doi.org/10.2134/agronj1990.00021962008200020033x>
32. Nehbandani, A., Barani, H., Soltani, A., Torabi, B., & Sharifian Bahraman, A. (2023). Estimating rangeland production in current and future conditions using SSM-iCrop2 model in Iran. *Agricultural Research*, 12(3), 346-355. <https://doi.org/10.1007/s40003-023-00652-z>
33. Nehbandani, A., Soltani, A., Nourbakhsh, F., & Dadrasi, A. (2020). Estimating crop model parameters for simulating soybean production in Iran conditions. *Oilseeds & fats Crops and Lipids*, 27, 1-9. <https://doi.org/10.1051/ocl/2020057>
34. Nehbandani, A. R., Soltani, A., Zeinali, E., Raeisi, S., & Najafi, R. A. (2015). Parameterization and evaluation of SSM-soybean model for prediction of growth and yield of soybean in Gorgan. *Journal of Plant Production Research*, 22(3), 1-26. (in Persian with English abstract). <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23222050.1394.22.3.1.2>
35. Ochieng', I. O., Gitari, H. I., Mochoge, B., Rezaei-Chiyaneh, E., & Gweyi-Onyango, J. P. (2021). Optimizing maize yield, nitrogen efficacy and grain protein content under different N forms and rates. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 21(3), 1867-1880. <https://doi.org/10.1007/s42729-021-00486-0>
36. Pickering, N. B., Hansen, J. W., Jones, J. W., Wells, C. M., Chan, V. K., & Godwin, D. C. (1994). WeatherMan: A utility for managing and generating daily weather data. *Agronomy Journal*, 86(2), 332-337. <https://doi.org/10.2134/agronj1994.00021962008600020023x>
37. Rugira, P., Ma, J., Zheng, L., Wu, C., & Liu, E. (2021). Application of DSSAT CERES-Maize to identify the optimum irrigation management and sowing dates on improving maize yield in Northern China. *Agronomy*, 11(4), 674. <https://www.mdpi.com/2073-4395/11/4/674>
38. Saddique, Q., Cai, H., Ishaque, W., Chen, H., Chau, H. W., Chattha, M. U., Hassan, M. U., Khan, M. I., & He, J. (2019). Optimizing the sowing date and irrigation strategy to improve maize yield by using CERES (crop estimation through resource and environment synthesis)-Maize model. *Agronomy*, 9(2), 109. <https://doi.org/10.3390/agronomy9020109>
39. Sadeghi, H., & Bahrani, M. J. (2001). Effect of plant density and nitrogen rates on yield and yield components of corn (*Zea mays* L.). *Iranian Journal of Crop Sciences*, 3(2), 13. (in Persian with English abstract). <http://agrobreedjournal.ir/article-1-439-fa.html>
40. Salo, T. J., Palosuo, T., Kersebaum, K. C., Nendel, C., Angulo, C., Ewert, F., Bindi, M., Calanca, P., Klein, T., Moriondo, M., Ferrise, R., Olesen, J. E., Patil, R. H., Ruget, F., Takáč, J., Hlavinka, P., Trnka, M., & Rötter, R. P. (2016). Comparing the performance of 11 crop simulation models in predicting yield response to nitrogen fertilization. *The Journal of Agricultural Science*, 154(7), 1218-1240. <https://doi.org/10.1017/S0021859615001124>
41. Shen, H., Xu, F., Zhao, R., Xing, X., & Ma, X. (2020). Optimization of sowing date, irrigation, and nitrogen management of summer maize using the DSSAT-CERES-Maize model in the Guanzhong plain, China. *Transactions of the ASABE*, 63(4), 789-797. <https://doi.org/10.13031/trans.13654>
42. Sinclair, T. R., & Muchow, R. C. (1995). Effect of nitrogen supply on maize yield: I. modeling physiological responses. *Agronomy Journal*, 87(4), 632-641. <https://doi.org/10.2134/agronj1995.00021962008700040005x>
43. Soltani, A., & Hoogenboom, G. (2007). Assessing crop management options with crop simulation models based on generated weather data. *Field Crops Research*, 103(3), 198-207. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2007.06.003>
44. Soltani, A., & Sinclair, T. R. (2012). Modeling Physiology of Crop Development, Growth and Yield.

- Wallingford, Oxfordshire, UK: CABI Publishing. 322 p.
45. Soltani, A., & Sinclair, T. R. (2015). A comparison of four wheat models with respect to robustness and transparency: Simulation in a temperate, sub-humid environment. *Field Crops Research*, 175, 37-46. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2014.10.019>
46. 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>
47. Tang, J., Wang, J., Fang, Q., Wang, E., Yin, H., & Pan, X. (2018). Optimizing planting date and supplemental irrigation for potato across the agro-pastoral ecotone in North China. *European Journal of Agronomy*, 98, 82-94. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2018.05.008>
48. Unknown. (2023). *Statistics of Crops Production in Iran, The Year 1402*. (in Persian). <https://www.maj.ir/>
49. Yakoub, A., Lloveras, J., Biau, A., Lindquist, J. L., & Lizaso, J. I. (2017). Testing and improving the maize models in DSSAT: Development, growth, yield, and N uptake. *Field Crops Research*, 212, 95-106. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.07.002>
50. Zeinali, E., Soltani, A., & Khadempir, M. (2016). *Parameterization of SSM-Maize model for growth and yield simulation in Gorgan*. Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources. Research Report. (in Persian with English abstract).