



## Evaluation of SSM-Wheat Model in Simulating the Growth and Development of Wheat (*Triticum aestivum* L.) Cultivars in Different Planting Densities

Ali Rahemi Karizeki<sup>1\*</sup>, Faramarz Sayyedi<sup>2</sup>, Habibollah Soughi<sup>2</sup>, Arazqlych Moarfy<sup>1</sup>, Mojtaba Salehi Shaikhi<sup>1</sup> and Saeed Bagherikia<sup>2</sup>

1-Department of Plant Production, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Gonbad Kavous University, Gonbad Kavous, Iran

2-Agricultural and Horticultural Department, Golestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Gorgan, Iran

(\*- Corresponding author's Email: [alirahemi@yahoo.com](mailto:alirahemi@yahoo.com))

### How to cite this article:

Rahemi Karizeki, A., Sayyedi, F., Soughi, H., Moarfy, A., Salehi Shaikhi, M., & Bagherikia, S. (2025). Evaluation of SSM-wheat model in simulating the growth and development of wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars in different planting densities. *Journal of Agroecology*, 17(1), 109-122. (In Persian with English abstract)

<https://doi.org/10.22067/agry.2025.89376.1209>

Received: 29-08-2024

Revised: 10-11-2024

Accepted: 01-02-2025

Available Online: 21-05-2025

### Introduction

Wheat (*Triticum aestivum* L.) is one of the most important and widely consumed crops in the world. Changing the density towards an optimal density can alter the ratio of soil evaporation to plant transpiration in such a way that water use efficiency improves. One of the branches of crop science and crop physiology is crop modeling. Quantifying the growth and development of a crop in response to environmental conditions in a system is called modeling, which helps the user make better decisions about crop management. One of the simple models of crops is the SSM model, which provides a simple simulation for estimating yield and phenological stages of various crops. Models have the ability to be used with physiological and ecological analysis based on research and empirical observations. The aim of this experiment is to evaluate the SSM-Wheat model under different density conditions and late-season drought stress.

### Materials and Methods

This experiment was conducted in the cropping year 2021-2022 at the Gorgan Agricultural Research Station. The factorial experiment included factors such as plant density at six levels (200, 250, 300, 350, 400, and 450 seeds per square meter) and genotype at six levels (N-93-9, Taktaz, Araz, Arman, Kalateh, and Tirgan). In this study, the SSM-Wheat model was used to simulate the growth and development of bread wheat. The meteorological data file, including precipitation, total sunshine hours, average relative humidity, average temperature, and average maximum temperature, was collected daily and defined in the model. The parameters related to soil characteristics were considered from the base data of the model. To evaluate the model, the coefficient of determination ( $R^2$ ), root mean square error (RMSE), normalized root mean square error (nRMSE), and the 1:1 line were used.



©2023 The author(s). 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/), which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source.

<https://doi.org/10.22067/agry.2025.89376.1209>

## Results and Discussion

The results of the model, using statistics based on the differences between simulated and observed values, including the coefficient of determination, root mean square error, normalized root mean square error, and the 1:1 line, showed that the model was able to accurately estimate the main phenological stages of days to emergence, days to flowering, and days to physiological maturity. The highest coefficient of determination was obtained for days to emergence, days to physiological maturity, and days to flowering, at 0.97, 0.77, and 0.71, respectively. The root mean square error (RMSE) for these traits was 2.8, 4.9, and 8.8, respectively. However, the traits "days to tillering" and "days to stem elongation" were estimated with lower accuracy, with a coefficient of determination and RMSE of 0.44 and 15.2 for days to tillering, and 0.17 and 6.8 for days to stem elongation, respectively. The results suggest that with an increase in maximum, minimum, and average temperature, and annual precipitation, the number of days required to reach each phenological stage decreases, which is logical. The maximum and minimum model-predicted values for grain yield were 410.4 and 547.6 grams per square meter, respectively, with a mean of 467.8 grams per square meter. The coefficient of determination and root mean square error for grain yield were 0.63 and 35.3, respectively. The distribution of simulated and observed points for the main phenological stages of days to emergence, days to flowering, and days to physiological maturity, as well as grain yield, fell within the 1:1 line range, indicating the model's high accuracy in predicting yield.

## Conclusion

In general, the results showed that the SSM-Wheat model was useful in simulating the main stages of wheat phenology and its performance under different conditions in different cultivars. The evaluation of the model using statistical indices of the coefficient of determination and root mean square error also confirmed the model's strength. Overall, the present study confirmed that SSM-Wheat is a simple, robust, and transparent model suitable for agricultural applications aimed at improving technical decision-making in crop management. In general, according to the results obtained for the SSM-Wheat model, it can be used for correct management in terms of the density and suitable cultivars of wheat cultivation in the field and its performance analysis in Gonbad Kavus weather conditions.

**Keywords:** Grain yield, Normalized root mean square error, Phenological Stage, Root mean square error

## مقاله پژوهشی

جلد ۱۷، شماره ۱، بهار ۱۴۰۴، ص ۱۲۲-۱۰۷

## ارزیابی مدل SSM-wheat در شبیه‌سازی رشد و نمو ارقام گندم (*Triticum aestivum* L.) در تراکم‌های مختلف کاشت

علی راحمی کاریزکی<sup>۱\*</sup>، فرامرز سیدی<sup>۲</sup>، حبیب‌الله سوقی<sup>۲</sup>، ارازقلیچ معارفی<sup>۱</sup>، مجتبی صالحی شیخی<sup>۱</sup> و سعید باقری کیا<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۱۳

## چکیده

گندم (*Triticum aestivum* L.) یکی از مهم‌ترین و پرمصرف‌ترین گیاهان زراعی شناخته‌شده در جهان می‌باشد. یکی از شاخه‌های علم زراعت و فیزیولوژی گیاهان زراعی، مدل‌سازی گیاهان زراعی است. در مدل SSM شبیه‌سازی ساده‌ای برای تخمین عملکرد و مراحل فنولوژیک محصولات مختلف به کار رفته است. هدف از این آزمایش، ارزیابی مدل SSM-Wheat در شرایط تراکم‌های متفاوت و تنش خشکی انتهایی فصل رشد است. این آزمایش در سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۰ در ایستگاه تحقیقات کشاورزی گنبد کاووس به اجرا درآمد. آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در چهار تکرار در شرایط آبی اجرا شد. عوامل آزمایش شامل تراکم بوته در شش سطح (شامل ۲۰۰، ۲۵۰، ۳۰۰، ۳۵۰، ۴۰۰ و ۴۵۰ بذر در مترمربع) و ژنوتیپ در شش سطح (شامل N-93-9، تکتاز، آراز، آرمان، کلاته و تیرگان) بودند. در این تحقیق، برای شبیه‌سازی رشد و نمو گندم نان از مدل SSM-wheat استفاده شد. نتایج مدل با استفاده از آماره‌های مبتنی بر اختلاف مقادیر شبیه‌سازی و مشاهده‌شده شامل ضریب تبیین ( $R^2$ )، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، جذر میانگین مربعات خطای نرمال‌شده (nRMSE) و خط یک به یک نشان داد که مدل توانایی این را دارد که عملکرد را با دقت قابل قبولی برآورد کند، درحالی‌که روز تا پنجه‌زنی و روز تا ساقه رفتن با دقت کمتری برآورد شد. حداکثر و حداقل مقادیر پیش‌بینی‌شده مدل برای عملکرد دانه به ترتیب معادل ۴۱۰/۴ و ۵۴۷/۶ گرم در مترمربع و میانگین ۴۶۷/۸ گرم در مترمربع بود. به‌طور کلی، مطالعه حاضر تأیید کرد که SSM-Wheat یک مدل ساده، قوی و شفاف است که برای کاربردهای زراعی با هدف بهبود تصمیم‌گیری فنی در مدیریت محصولات زراعی مناسب است.

واژه‌های کلیدی: جذر میانگین مربعات خطا، جذر میانگین مربعات خطای نرمال‌شده، عملکرد دانه، مراحل فنولوژی

## مقدمه

اختصاص دادند. گیاهان متعلق به خانواده در تأمین غذای انسان نقش کلیدی دارند (FAO, 2022). گندم (*Triticum aestivum* L.) یکی از مهم‌ترین و پرمصرف‌ترین گیاهان زراعی شناخته‌شده در جهان می‌باشد (Baygi et al., 2016). گندم به‌عنوان یک محصول استراتژیک با ارزش و دارای سطح انرژی بالا، اهمیت بسیار زیادی پیدا کرده است. ارزیابی وضعیت آینده تولید غلات به‌ویژه گندم از مسائلی است که توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کرده است (Shiukhy- Soqanloo et al., 2021). این گیاه نقش ویژه‌ای در الگوی غذایی بیشتر مردم دنیا و ایران دارد، به‌طوری‌که مصرف

غلات بیشترین سطح زیر کشت محصولات را در دنیا به خود

۱- گروه تولیدات گیاهی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه گنبد کاووس،

گنبد کاووس، ایران

۲- بخش زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان

گلستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، گرگان، ایران

alirahemi@yahoo.com

(\*)- نویسنده مسئول:

(Email:

<https://doi.org/10.22067/agry.2025.89376.1209>

نشان‌دهنده این است که عملکرد دانه ۱/۹ درصد و ۶۰/۵ گرم در مترمربع بود. نتایج مطالعه ایشان، دقت مدل را در پیش‌بینی رشد و عملکرد گندم تأیید کرد. ایشان معتقدند که ساختار نسبتاً ساده و درجه شفافیت بالا، مدل SSM-iCrop را برای ادغام در ابزارهای کشاورزی هوشمند برای بهبود تصمیم‌گیری زراعی در تولید محصول مناسب می‌داند (Manschadi et al., 2022). ژئوفری و همکاران (Geoffrey et al., 2018) با ارزیابی مدل SSM-Wheat دریافتند که مراحل فنولوژی روز تا گرده‌افشانی و رسیدگی فیزیولوژیک از کارایی بالا و دقت برخوردار است. نتایج آزمایش‌های خیری و کامبوزیا (Kheiri & Kambouzia, 2016) ارزیابی کارایی مدل APSIM-Wheat در شبیه‌سازی فنولوژی و عملکرد دانه گندم نان (*Triticum aestivum L.*) در دیم‌زارهای غرب و شمال غرب ایران نشان داد که میانگین مقادیر مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده برای تعداد روز تا گل‌دهی به ترتیب ۲۱۵ و ۲۱۸ و برای تعداد روز تا رسیدگی فیزیولوژیک به ترتیب ۲۵۲ و ۲۵۲ بودند. دقت ارزیابی‌ها با نتایج به‌دست‌آمده از شاخص‌های آماری تأیید شد، به طوری که برای تعداد روز تا گل‌دهی و تعداد روز تا رسیدگی فیزیولوژیک، مقدار جذر خطای میانگین مربعات نرمال‌شده به ترتیب ۰/۲۹ و ۰/۱۶ درصد، ضریب جرمی خطا ۰/۱۸- و ۰/۰۲ و ضریب هم‌خوانی ۰/۹۱ و ۰/۱۳ بودند. میانگین عملکرد دانه مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده به ترتیب ۲۲۴۵ و ۲۲۴۹ کیلوگرم در هکتار بود. مقادیر به‌دست‌آمده برای جذر خطای میانگین مربعات نرمال‌شده (۷/۲۱ درصد)، ضریب جرمی خطا (۰/۰۲-) و ضریب هم‌خوانی (۰/۰۳۷) نشان داد که مدل عملکرد کاملاً رضایت‌بخشی داشته و می‌توان از آن در برنامه‌ریزی برای افزایش تولید گندم دیم در ایران استفاده کرد. نتایج کلی این تحقیق نشان داد که می‌توان از مدل APSIM-Wheat در تعیین بهترین شیوه‌های مدیریت مزرعه، تجزیه و تحلیل خلأ عملکرد، ارزیابی اثر تغییر اقلیم و راهکارهای سازگاری با تغییرات اقلیم در مزارع گندم دیم غرب و شمال غرب ایران استفاده کرد.

احمد و همکاران (Ahmed et al., 2016) با استفاده از مدل APSIM-Wheat، رسیدگی فیزیولوژیک و عملکرد دانه تعدادی از ارقام گندم در پاکستان را شبیه‌سازی کردند. آن‌ها گزارش نمودند که مدل، زمان گل‌دهی و رسیدگی فیزیولوژیک را با دقت خوبی شبیه‌سازی کرده و دامنه مقدار جذر خطای میانگین مربعات نرمال‌شده برای ارقام گندم مورد مطالعه ۱/۴۶ و ۳/۳۵ درصد برای زمان گل‌دهی

گندم در حدود ۴۰ درصد از انرژی و پروتئین مردم ایران را تشکیل می‌دهد. سطح زیر کشت گندم کشور حدود ۴۱/۶ میلیون هکتار برآورد شده است که ۴۲/۳۷ درصد آن آبی و ۵۷/۶۳ درصد به‌صورت دیم بوده است. میزان تولید گندم کشور حدود ۴۴/۱۳ میلیون تن برآورد شده است که ۷۷/۶۴ درصد آن سهم کشت آبی و ۲۲/۳۶ درصد از کشت دیم به دست آمده است (Shiukhy- Soqanloo et al., 2021).

مدل‌های محصولات زراعی از دیرباز در بسیاری از کشورها برای شبیه‌سازی رشد محصولات مورد استفاده قرار می‌گرفتند. به این دلیل که فرآیند مدل‌سازی محصولات، فرآیندی است که برای برآورد پارامترها و در نهایت اجرا و ارزیابی نیاز به زمان زیادی دارد (Azadi et al., 2018). سامانه‌های طبیعی، زبان ساده‌شده مدل‌ها هستند که برای مطالعه سامانه‌های پیچیده واقعی مورد استفاده قرار می‌گیرند (Holzworth et al., 2011). کمی‌سازی رشد و نمو یک گیاه زراعی در پاسخ به شرایط محیطی در یک سامانه، مدل‌سازی نامیده می‌شود که به کاربر کمک می‌کند تا در مورد مدیریت گیاه زراعی تصمیم بهتری اتخاذ نماید (Asseng et al., 2015). فناوری‌های کشاورزی هوشمند این پتانسیل را دارند که این تعاملات پیچیده را برای پیش‌بینی دقیق و خاص فصل رشد محصول و عملکرد واقعی مدل‌های شبیه‌سازی محصول به تصویر بکشند با توجه به این قابلیت‌ها، مدل‌های محصول به‌طور گسترده در کاربردهای متنوعی مانند بهینه‌سازی برای بهبود بهره‌وری محصول مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Manschadi et al., 2014).

تاکنون مطالعات بسیاری در زمینه استفاده از مدل برای شبیه‌سازی مراحل فنولوژیک و رشد و نمو گیاهان انجام شده است که می‌توان به مدل‌های فرآیندمحور از جمله CropSyst، DSSAT، APSIM، WOFOST و SUCROS در طول دهه‌های گذشته اشاره کرد. این مدل‌ها جهت افزایش کارایی مدیریت و عملکرد گیاه زراعی در بسیاری از کشورها با موفقیت مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Guilpart et al., 2017; Smethurst et al., 2017). لازم به ذکر است که مدل‌ها به‌طور کامل نمی‌توانند جایگزین مطالعات مزرعه‌ای شوند و استفاده ترکیبی از مدل‌های شبیه‌سازی و آزمایش‌های مزرعه‌ای راهکار قابل قبولی می‌باشد (Farahani et al., 2009).

نتایج صورت‌گرفته توسط محققان در شرایط آب و هوایی اتروش، که به شبیه‌سازی مدل SSM-iCrop ارقام مختلف گندم پرداختند،

رسیدن به حداکثر عملکرد شمرده می‌شود و تراکم گیاهی متناسب با تغییر عواملی نظیر منطقه، تاریخ کاشت، شرایط اقلیمی به‌ویژه توزیع بارش، نوع خاک و رقم، متفاوت خواهد بود (Hiltbrunner et al., 2007). اگر تراکم بوته‌ها کمتر یا بیشتر از حالت معمول باشد، مشکلاتی مانند کاهش عملکرد (به‌واسطه تعداد بوته کمتر یا بیشتر در هکتار)، تولید بوته‌های ضعیف و وقوع ورس، افزایش رشد رویشی گیاه (دیررسی)، افزایش خسارت علف‌های هرز و گسترش بیماری و آفات به وجود خواهد آمد (Bastos et al., 2020). با توجه به تغییر اقلیم در چند سال اخیر و کاهش میزان بارندگی، نیاز به بررسی مجدد تراکم و ارقام مناسب گندم برای منطقه گنبد کاووس که از آب و هوای مدیترانه‌ای گرم و خشک برخوردار است، می‌باشد. لذا یکی از روش‌هایی که باعث کاهش هزینه تحقیقات می‌شود، استفاده از مدل است. هدف از این آزمایش، ارزیابی مدل SSM-Wheat در شبیه‌سازی رشد و نمو ارقام گندم در تراکم‌های مختلف کاشت است.

### مواد و روش‌ها

این آزمایش در سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۰ روی ارقام جدید گندم نان در استان گلستان در ایستگاه تحقیقات کشاورزی گنبد به اجرا درآمد. ایستگاه تحقیقات کشاورزی گنبد در پنج کیلومتری شرق شهرستان گنبد با عرض جغرافیایی ۳۷ درجه و ۱۶ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۵ درجه و ۱۳ دقیقه شرقی واقع شده است.

قبل از اجرای آزمایش، نمونه‌برداری خاک از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری انجام شد و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک تعیین شد (جدول ۱) که براساس نتایج حاصل، بافت خاک سیلتی رسی لوم بود.

آزمایش به‌صورت فاکتوریل با دو عامل تراکم و رقم در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در چهار تکرار در شرایط آبی اجرا شد. عوامل آزمایش شامل تراکم بوته در شش سطح (شامل ۲۰۰، ۲۵۰، ۳۰۰، ۳۵۰، ۴۰۰ و ۴۵۰ بذر در مترمربع) و ژنوتیپ در شش سطح (شامل N-93-9، تکتاز، آراز، آرمان، کلاته و تیرگان) بودند.

و رسیدگی فیزیولوژیک ۱/۱۹ و ۳/۲۸ است. که عملکرد دانه شبیه‌سازی شده از ۲/۴۱ تا ۴/۶۸ تن در هکتار متغیر و نزدیک به مقادیر مشاهده شده بود. در آزمایش دیگری، نتایج مقادیر شبیه‌سازی شده فنولوژی و عملکرد دانه گندم با استفاده از مدل APSIM-Wheat مشابهت قابل قبولی با مقادیر واقعی داشت (Zhang et al., 2012). دلقندی و همکاران (Dalqandi et al., 2013) در ارزیابی مدل CERES-Wheat نسخه 4.5 در شبیه‌سازی رشد، عملکرد و مراحل فنولوژی گندم نشان داد که کمترین خطای مدل مربوط به حداکثر شبیه‌سازی مراحل فنولوژی (دو درصد) می‌باشد و به‌طور کلی، نتیجه گرفته شد که مدل CERES-Wheat توانایی بالایی در شبیه‌سازی رشد و نمو، مراحل فنولوژیکی و عملکرد گندم برای شرایط آب و هوایی اهواز دارد.

حجاریپور و همکاران (Hajarpour et al., 2013) با استفاده از مدل SSM-Chickpea برای شبیه‌سازی نخود (*Cicer arietinum*) دریافتند که افزایش درجه حرارت باعث کاهش طول دوره رشد گیاه می‌شود. نه‌بندانی و همکاران (Nehbandani et al., 2014) برای پیش‌بینی رشد و عملکرد سویا (*Glycine max L.*) از داده‌های آزمایش‌های مزرعه‌ای مختلف برای ارزیابی مدل SSM-ilegume استفاده نمودند. رهبان و همکاران (Rehban et al., 2021) گزارش نمودند که پیش‌بینی فنولوژی و عملکرد کلزا (*Brassica napus L.*) توسط مدل SSM-iCrop2 در شرایط ایران رضایت‌بخش است. راحمی‌کاریزکی و نورعلیزاده اطاقسرا (Rahemi Karizaki & Nouralizadeh Otaghsara, 2018) نقل کردند که مدل SSM-ilegume عرضه پیش‌بینی عملکرد و شاخص برداشت سویا در شرایط محیطی شرق مازندران را دارد، ضمن اینکه پیش‌بینی مناسبی برای عملکرد بیولوژیک ارائه نمی‌دهد.

نتایج پژوهش ترکمان و همکاران (Torkaman et al., 2023) که بر روی واسنجی و تعیین اعتبار مدل WOFOST برای پیش‌بینی فنولوژی و عملکرد سیب‌زمینی (*Solanum tuberosum L.*) در ایران انجام دادند، نشان می‌دهد که جذر میانگین مربعات خطای مدل برای مراحل فنولوژیکی سبز شدن، گل‌دهی، رسیدگی فیزیولوژیکی به ترتیب ۱/۶، ۲/۳ و ۶/۴ روز و برای عملکرد غده ۲۹۳۳ کیلوگرم در هکتار به دست آمد. تراکم‌های کاشت مطلوب در گندم، کلیدی برای

جدول ۱- مشخصات خاک محل اجرای آزمایش  
Table1-Soil characteristics in experimental place

واحد Unit	ویژگی‌ها Characteristic	مقدار Amount
dS.m <sup>-1</sup>	هدایت الکتریکی EC	0.73
-	اسیدیته (pH)	8.1
%	کربن آلی Organic C	1.46
%	نیترژن N	0.15
mg.kg <sup>-1</sup>	فسفر قابل جذب Absorbable phosphorus	9
mg.kg <sup>-1</sup>	پتاسیم قابل جذب Absorbable potassium	350
%	رس Clay	35
%	سیلت Silt	52
%	شن Sand	13

جدول ۲- مشخصات سال آزادسازی ارقام  
Table 2- Specifications of the year of release of cultivars

ارقام Cultivars	سال آزادسازی Year of releasing
N-93-9	-
تکتاز Taktaz	2020
آراز Araz	2020
آرمان Arman	2020
کلاته Kalateh	2017
تیرگان Tirgan	2016

با توجه به نتایج آزمون خاک، میزان ۵۰ کیلوگرم کود اوره، سوپرفسفات تریپل ۱۰۰ کیلوگرم و سولفات روی ۲۵ کیلوگرم در هکتار برای همه ارقام قبل از کاشت به خاک اضافه شد. برای مه‌ار علف‌های هرز پهن‌برگ و باریک‌برگ از علف‌کش آتالانتیس ۱/۲ لیتر در هکتار گرانستار به مقدار ۳۰ گرم در هکتار و برای مه‌ار آفات سن (*Eurygaster integriceps*) و لما (*Oulema melanopus*) از دلتامترین به مقدار ۰/۵ لیتر در هکتار استفاده گردید، هم‌چنین برای مقابله با فوزاریوم خوشه گندم از قارچ‌کش آلتوکمی (سایپروکونازول

ابعاد هر کرت ۱۲ × ۱/۲ = ۱۴/۴ مترمربع و مساحت کرت قابل برداشت ۱۲ مترمربع طبق استانداردهای بخش تحقیقات غلات مؤسسه اصلاح و تهیه نهال و بذر بود و میزان بذر در هر کرت براساس تراکم‌های مورد نظر با توجه به وزن دانه لاین‌ها تعیین گردید. در طول دوره رشد، نسبت به اعمال توصیه‌های فنی زراعی به‌طور یکسان برای همه ترکیب‌های تیماری اقدام شد. میزان کودهای شیمیایی مصرفی براساس خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه تعیین و استفاده شد. آبیاری در چهار مرحله انجام گرفت.

کاربن‌دزیم) ۰/۵ لیتر در هکتار استفاده شد.

(۳۳۴) و اسفندماه (۱۲۶/۵) به وقوع پیوست. بالاترین مقدار رطوبت نسبی اسفند (۷۶ درصد) و کمترین این مقدار در خرداد (۵۳) حاصل شد. از طرفی، بیشترین میانگین دما و حداکثر آن متعلق به خرداد ماه و کمترین میانگین دما و کمترین حداکثر دما به ترتیب متعلق به ماه‌های بهمن و دی بود.

### روز تا سبز شدن

براساس نتایج حاصل از آنالیز داده‌ها، مقادیر روز تا سبز شدن در آزمایش مزرعه‌ای با حداکثر و حداقل معادل ۰/۲۰ و ۰/۱۲ روز و میانگین ۱۵/۳ روز بود، حداکثر و حداقل تعداد روز تا سبز شدن پیش‌بینی‌شده معادل ۰/۱۸ و ۰/۸ روز و میانگین ۱۲/۷ روز بود (جدول ۴). مقایسه بین روز تا سبز شدن واقعی و روز تا سبز شدن پیش‌بینی شده نشان داد که نقاط تقریباً در محدوده خطوط  $\pm 20\%$  درصد از خط ۱:۱ قرار می‌گیرند که بیانگر این است که مدل پیش‌بینی مناسبی برای این صفت را ارائه می‌نماید. ضریب تبیین برای روز تا سبز شدن ۰/۹۷ و مقدار جذر میانگین مربعات خطا ۲/۸ روز بود که حدود ۱۸/۵ درصد میانگین تعداد روز تا سبز شدن مشاهده‌شده بود (شکل ۲-a).

### روز تا پنجه‌زنی

نتایج نشان داد که مدل، پیش‌بینی مناسبی را برای روز تا پنجه‌زنی برای شرایط گنبد ارائه نمی‌دهد، به‌نحوی که مقادیر پیش‌بینی‌شده خارج از محدوده ۲۰ درصد خط یک و یک قرار داشت (شکل ۲-b). باین‌حال بررسی داده‌ها نشان داد که مقادیر روز تا پنجه‌زنی مشاهده‌شده در آزمایش مزرعه‌ای با حداکثر و حداقل معادل ۵۳/۸ و ۴۴/۰ روز و میانگین ۴۸/۸ روز بود، درحالی‌که حداکثر و حداقل تعداد روز پیش‌بینی‌شده تا پنجه‌زنی معادل ۴۴/۰ و ۲۶/۰ روز و میانگین ۳۴/۷ روز بود که بیانگر پیش‌بینی ضعیف مدل SSM-wheat است (جدول ۴).

### روز تا ساقه رفتن

چنانچه در شکل ۳-a مشخص می‌باشد، مقایسه ضریب تبیین حاصل از آنالیز رگرسیون خطی توابع بین مقادیر مشاهده‌شده و پیش‌بینی‌شده روز تا ساقه رفتن در گیاه گندم نشان داد که مدل ارزیابی قابل قبولی از این پارامتر داشت، به‌نحوی که اکثر داده‌ها در محدوده  $\pm 20\%$  خط ۱:۱ قرار داشتند. مقادیر به‌دست‌آمده از آزمایش

در طول دوره آزمایش، از هنگام کاشت تا برداشت مراحل فنولوژی مانند ظهور سنبله (زادوکس ۵۵)، گل‌دهی (زادوکس ۶۵) و رسیدگی فیزیولوژیک (زادوکس ۹۰) یادداشت گردید. ثبت مراحل فنولوژیک روی ۱۰ بوته معین که با روبان قرمز مشخص شدند، هر دو تا پنج روز، براساس شاخص زادوکس (Zadoks et al., 1974) انجام شد. به این صورت که در شروع هر مرحله تا پایان آن مرحله هر دو روز بازدید از مزرعه انجام شد. لازم به ذکر است که این بوته‌ها در قسمتی از کرت که برای برداشت نهایی است، علامت‌گذاری شدند. در پایان هر سال زراعی و پس از رسیدن فیزیولوژیک، برداشت با استفاده از کمباین آزمایشی انجام و عملکرد دانه و اجزای عملکرد هر کرت تعیین شدند.

در این تحقیق برای شبیه‌سازی رشد و نمو گندم از مدل SSM-wheat (Soltani & Sinclair., 2012) استفاده شد. داده‌های به‌دست‌آمده از آزمایش‌های مزرعه‌ای (۱۰۸ داده)، شامل شاخص‌های ارزیابی ضریب تبیین ( $R^2$ )، جذر میانگین مربعات خطا ( $RM\sqrt{SE}$ )، جذر میانگین مربعات خطای نرمال‌شده ( $nRM\sqrt{SE}$ ) و خط یک به یک استفاده شد. شاخص‌های آماری مذکور به‌شرح ذیل محاسبه شدند.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{n-1}} \quad \text{معادله (۱)}$$

$$nRMSE = \sqrt{\left(\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{n-1}\right) \times \frac{100}{\bar{O}}} \quad \text{معادله (۲)}$$

که در آن‌ها،  $S_i$ : مقادیر شبیه‌سازی‌شده،  $O_i$ : مقادیر مشاهده‌شده،  $n$ : تعداد مشاهده‌ها و  $\bar{O}$ : مقدار میانگین مشاهدات می‌باشد.

## نتایج و بحث

### شرایط آب و هوایی

آمار هواشناسی محل اجرای تحقیق شامل مجموع بارش، مجموع ساعات آفتابی، میانگین رطوبت نسبی و میانگین و حداکثر دما در طی یک سال زراعی تحقیق به تفکیک ماه‌های آزمایش در جدول ۲ آورده شده است. نتایج نشان داد که بیشترین و کمترین مقدار بارندگی به ترتیب با ۸۷/۶ و ۲/۲ میلی‌متر در اردیبهشت و خرداد مشاهده شد، در حالی که بیشترین و کمترین ساعات آفتابی به ترتیب در خرداد

1- Root mean square error

2- Normalized root mean square error

ارزیابی مطلوبی در مورد این پارامتر ندارد (جدول ۴).

### روز تا گل‌دهی

نتایج شبیه‌سازی اعداد روز تا گل‌دهی حاکی از آن دارد که مدل روز تا گل‌دهی را به‌خوبی پیش‌بینی کرده است، به‌نحوی که ضریب تبیین جذر میانگین مربعات خطا و جذر میانگین مربعات معادل ۸/۷۱، ۸/۰ و ۶/۷ بود که نشان‌دهنده این موضوع است که مدل SSM-wheat قادر است، ارزیابی خوبی از این اعداد ارائه دهد (جدول ۴). مقادیر به‌دست‌آمده از آزمایش مزرعه‌ای به‌ترتیب با حداکثر و حداقل مقادیر پیش‌بینی‌شده مدل معادل ۱۱۶ و ۱۲۸ روز و میانگین ۱۲۲ روز بود. اکثر داده‌ها در گستره  $\pm 20$  خطا ۱:۱ قرار گرفتند که بیانگر پیش‌بینی خوب مدل از مرحله فنولوژی روز تا گل‌دهی بود (شکل ۴-ا). نتایج مطالعات محمدی و همکاران (Mohammadi et al., 2023) روی جو نشان داد که مدل قادر است که روز تا گل‌دهی را به‌خوبی پیش‌بینی نماید که با نتایج پژوهش حاضر مطابقت داشت.

مزرعه‌ای به‌ترتیب با حداکثر و حداقل معادل ۸۷/۰ و ۷۱/۰ روز و میانگین ۷۹/۶ روز بود و همچنین حداکثر و حداقل تعداد روز برای این صفت در مقادیر پیش‌بینی‌شده مدل معادل ۸۶/۰ و ۸۰/۰ روز و میانگین ۸۳/۳ روز بود که نشان می‌دهد مدل به‌طور مطلوبی توانسته است روز تا ساقه رفتن گیاه گندم را ارزیابی و تفسیر کند. علاوه بر آن جذر میانگین مربعات خطا و جذر میانگین مربعات خطای نرمال‌شده نیز به‌ترتیب با مقادیری معادل ۶/۸ و ۸/۶ بیانگر پیش‌بینی خوب این پارامتر توسط مدل SSM-wheat بود (جدول ۴).

### روز تا سنبله‌دهی

نتایج نشان داد که با توجه به اینکه بیشتر داده‌ها در محدوده ۲۰ درصد خطا ۱:۱ قرار دارد، اما در زیر خط یک و یک قرار دارد که نشان‌دهنده آن است که پیش‌بینی مدل کمتر از مقدار واقعی است (شکل ۳-ب)، با این حال با توجه به اینکه ضریب تبیین، جذر میانگین مربعات خطا و جذر میانگین مربعات خطای نرمال‌شده به‌ترتیب برابر ۰/۱۶، ۲۰/۱ و ۱۶/۳ است، نشان می‌دهد که مدل SSM-wheat

جدول ۳- آمار هواشناسی ایستگاه تحقیقات کشاورزی گنبد در سال آزمایش (۱۴۰۱-۱۴۰۰)

Table 3- Meteorological statistics of Gonbad Agricultural Research Station in the experiment year (2021-2022)

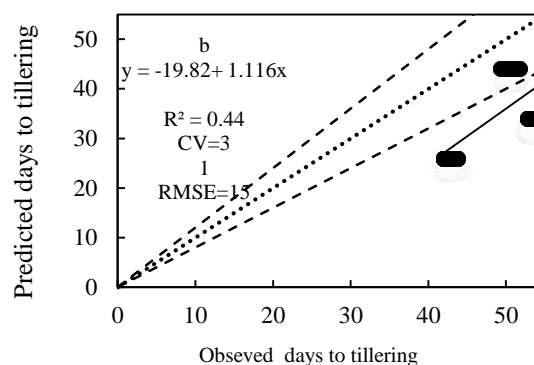
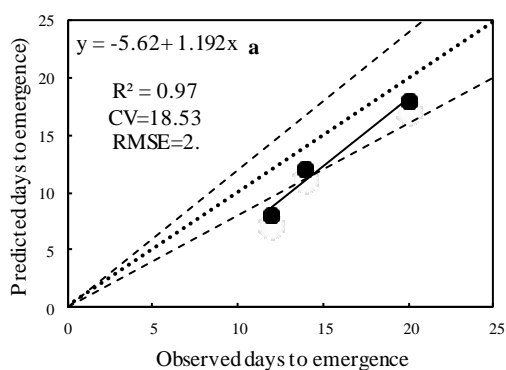
ماه Month	میزان بارش (mm) Precipitation	مجموع ساعات آفتابی Total sunshine (hours)hours	میانگین رطوبت نسبی Min. RH (%)	میانگین دما Average temp. (°C)	میانگین حداکثر دما Average. Max. temp. (°C)
	2021-2022	2021-2022	2021-2022	2021-2022	2021-2022
آبان Nov.	23.5	182.4	68	13.4	19.6
آذر Dec.	12.8	176.1	64	13.5	20.6
دی Jan.	36.9	168.0	68	10.1	16.1
بهمن Feb.	61.1	201.0	65	9.5	16.2
اسفند Mar.	70.9	126.5	76	12.1	17.4
فروردین Apr.	11.9	173.6	69	15.5	22.1
اردیبهشت May.	87.6	147.5	74	19.9	25.7
خرداد Jun.	2.2	334.0	53	26.3	34.8



جدول ۴- پارامترهای ریاضی و آماری مربوط به صفات مختلف مورد مطالعه به دست آمده از مدل و آزمایش‌های مزرعه‌ای

Table 4- Mathematical and statistical parameters related to the various traits studied by the model and field experiments

صفت Parameter	حداقل Min		حداکثر Max		میانگین Mean		پارامترهای آماری Statistical parameters		
	مشاهده شده Observed	پیش‌بینی شده Predicted	مشاهده شده Observed	پیش‌بینی شده Predicted	مشاهده شده Observed	پیش‌بینی شده Predicted	R <sup>2</sup>	RMSE	NRMSE
روز تا سبز شدن Days to emergence	12	8	20	18	15.3	12.7	0.97	2.8	18.5
روز تا پنجه‌دهی Days to tillering	42	26	53.8	44	48.8	34.7	0.44	15.2	31.3
روز تا ساقه‌رفتن Days to stemming	71	80	87	86	79.6	83.3	0.17	6.8	8.6
روز تا سنبله‌دهی Days to heading	110.5	102	138.8	110	123.7	105.7	0.16	20.1	16.3
روز تا گرده‌افشانی Days to anthesis	99.5	116	143.3	128	129.8	122.2	0.17	8.8	6.7
روز تا رسیدگی فیزیولوژیک Days to physiological maturity	138	155	183	173	165.7	164.1	0.77	4.9	3
عملکرد دانه Grain yield	377.1	410.4	616	547.6	471.6	467.8	0.63	35.3	7.5



شکل ۱- مقادیر شبیه‌سازی شده روز تا سبز شدن (a) و پنجه‌زنی (b) ژنوتیپ‌های گندم نان در مقابل مقادیر واقعی آن  
Fig. 1- Simulated versus measured days to emergence (a) and tillering (b) of bread wheat genotypes

نقطه چین خط ۱:۱ و خط نقطه‌چین بالا و پایین به ترتیب خطوط ۱:۱/۲۰ و ۱:۰/۸۰ هستند.  
Dotted line is 1:1 line and dashed lines are ± 20% discrepancy lines.

### رسیدگی فیزیولوژیک

نتایج یافته‌های تحقیق روز تا رسیدگی فیزیولوژیک به دست آمده از مزرعه در محدوده‌ای از مقادیر ۱۳۸ تا ۱۸۳ و میانگین ۱۶۵ روز به

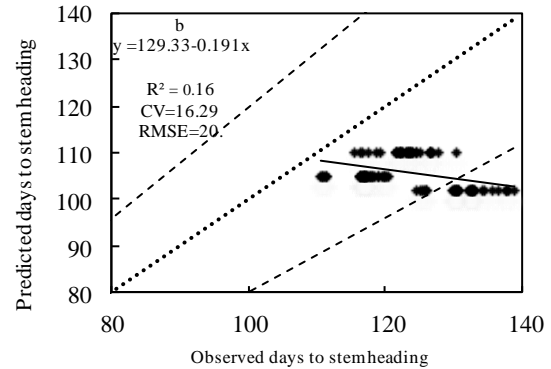
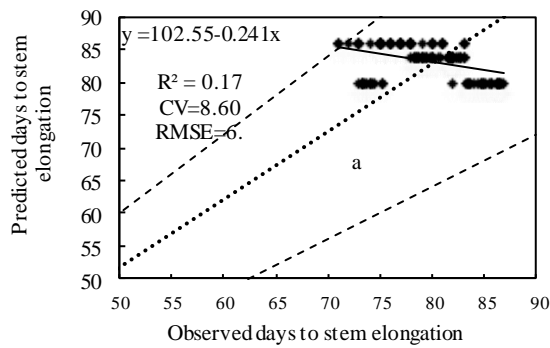
دست آمد. در این راستا، ضریب تبیین، جذر میانگین مربعات خطا و جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده به ترتیب ۰/۷۷، ۴/۹ و ۳/۰ محاسبه شد (جدول ۴) که بیانگر این است که مدل SSM-wheat

بود و همچنین حداکثر و حداقل مقادیر پیش‌بینی شده مدل به ترتیب معادل ۴۱۰/۴ و ۵۴۷/۶ گرم در مترمربع و میانگین ۴۶۷/۸ گرم در مترمربع بود. به عبارتی، ضریب تبیین، جذر میانگین مربعات خطا و جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده به ترتیب برابر ۳۵/۰، ۳/۶۳ و ۷/۵ به دست آمد (جدول ۴) که نشان می‌دهد مدل SSM-wheat با دقت خوبی مراحل مذکور را شبیه‌سازی نموده است و نیز مشخص گردید که اکثر داده‌ها در داخل گستره  $\pm 20$  خط ۱:۱ قرار دارد (شکل ۵).

ارزیابی خوبی در مورد این صفت داشته و اکثر داده‌ها در گستره  $\pm 20$  خط ۱:۱ قرار دارند (شکل ۴-ب).

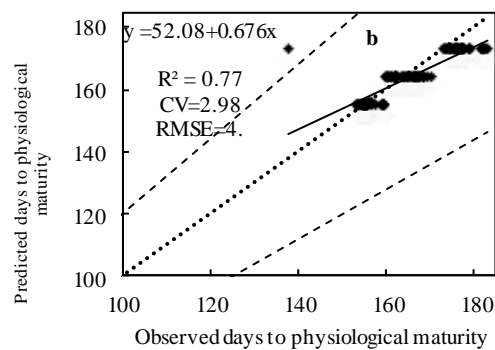
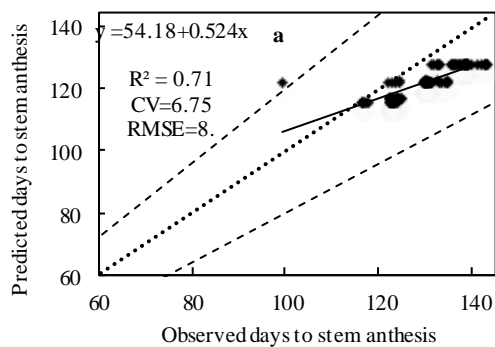
### عملکرد دانه

مقایسه داده‌های آماری مربوط به مقایسه بین عملکرد دانه به‌دست‌آمده از آزمایش‌های مزرعه‌ای و عملکرد دانه پیش‌بینی شده در مدل نشان داد که مدل توانایی این را دارد که پیش‌بینی خوبی ارائه دهد. نتایج حاصل از تحقیقات مزرعه‌ای به ترتیب با حداکثر و حداقل معادل ۳۷۷/۱ و ۰/۶۱۶ گرم در مترمربع و میانگین ۴۷۱/۶ در مترمربع



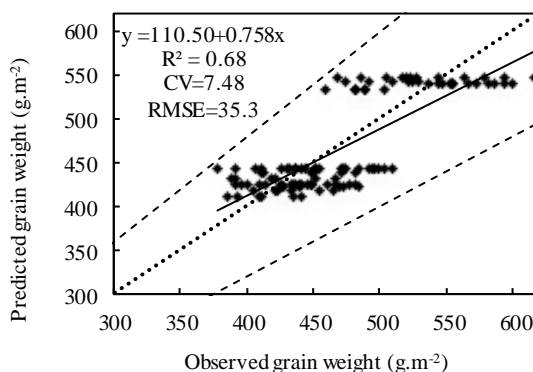
شکل ۲- مقادیر شبیه‌سازی شده روز تا ساقه رفتن (a) و سنبله‌دهی (b) ژنوتیپ‌های گندم نان در مقابل مقادیر واقعی آن  
Fig. 2- Simulated versus measured days to stem elongation (a) and tillering (b) of bread wheat genotypes

نقطه‌چین خط ۱:۱ و خط نقطه‌چین بالا و پایین به ترتیب خطوط ۱:۱/۲۰ و ۱:۰/۸۰ هستند.  
Dotted line is 1:1 line and dashed lines are  $\pm 20\%$  discrepancy lines.



شکل ۳- مقادیر شبیه‌سازی شده روز تا گل‌دهی (a) و رسیدگی فیزیولوژیک (b) ژنوتیپ‌های گندم نان در مقابل مقادیر واقعی آن  
Fig. 3- Simulated versus measured days to anthesis (a) and physiological maturity (b) of bread wheat genotypes

نقطه‌چین خط ۱:۱ و خط نقطه‌چین بالا و پایین به ترتیب خطوط ۱:۱/۲۰ و ۱:۰/۸۰ هستند.  
Dotted line is 1:1 line and dashed lines are  $\pm 20\%$  discrepancy lines.



شکل ۴- مقادیر شبیه‌سازی شده عملکرد دانه ژنوتیپ‌های گندم نان در مقابل مقادیر واقعی آن  
 Fig. 4- Simulated versus measured accumulated grain weight of bread wheat genotypes

نقطه‌چین خط ۱:۱ و خط نقطه‌چین بالا و پایین به ترتیب خطوط ۱:۱/۲۰ و ۱:۱/۸۰ هستند.  
 Dotted line is 1:1 line and dashed lines are  $\pm 20\%$  discrepancy lines.

wheat قادر است که روز تا گل‌دهی را به‌خوبی پیش‌بینی نماید که با نتایج پژوهش حاضر مطابقت داشت.

همچنین نتایج ارزیابی مدل SSM بر عملکرد گندم در شرایط گنبد نشان داد که مدل دارای قدرت پیش‌بینی قابل قبولی برای عملکرد گیاه گندم را دارد که با نتایج آزادی و همکاران (Azadi et al., 2018) در منطقه پاکدشت هم‌سو بود. یکی از نکات مهمی که باید در نظر گرفت، این است که این مدل‌ها مکمل آزمایش‌های مزرعه‌ای هستند و به هیچ‌وجه جایگزین آزمایش‌های مزرعه‌ای نیستند (Azadi et al., 2018). رهبان و همکاران (Rehban et al., 2021) گزارش نمودند که پیش‌بینی عملکرد کلزا (*Brassica napus*) توسط مدل SSM-iCrop2 در شرایط ایران رضایت‌بخش است. قائم و همکاران (Ghanem et al., 2015) با استفاده از مدل Legumes-SSM به شبیه‌سازی رشد و عملکرد عدس (*Lens culinaris* Medi) در خاورمیانه سوریه و لبنان پرداختند و نتیجه گرفتند که، عملکرد عدس را با دقت خوبی برآورد کرد، به‌طوری‌که مقادیر  $R^2$  و RMSE شبیه‌سازی عملکرد عدس به ترتیب برابر با ۰/۶۷ درصد، ۳۰۸/۳۶ کیلوگرم در هکتار بود. قاسمی‌مهام و همکاران (Ghasemi Maham et al., 2016) در پژوهشی به مدل‌سازی رشد و عملکرد گندم پاییزه در استان همدان پرداختند و دریافتند که ضرایب تبیین حاصل از خط ۱:۱ عملکرد دانه شبیه‌سازی شده در مقابل عملکرد دانه مشاهده‌شده نشان داد که در تمام موارد، عملکرد شبیه‌سازی شده مطابقت خوبی با عملکرد مشاهده‌شده دارد. مطالعات پژوهشگران مختلفی از قبیل راحمی کاریزکی و همکاران (Rahemi

نتایج نشان داد که مدل SSM-wheat توانست از میان مراحل فنولوژیک اصلی روز تاسیز شدن، روز تا رسیدگی فیزیولوژیک و روز تا گل‌دهی را با دقت قابل قبولی برآورد کند. پیش‌بینی نمو فنولوژیک یا مراحل نمو گیاه اهمیت زیادی دارد، مراحل فنولوژی در مدیریت مزرعه (آبیاری، مصرف کود و دیگر نهاده‌ها) برای دستیابی به حداکثر عملکرد نقش مهمی دارند (Nehbandani et al., 2016). نتایج بر این اصل استوار است که با افزایش دمای حداکثر، حداقل، میانگین دما و بارش سالانه، تعداد روزهای لازم برای رسیدن به هر مرحله فنولوژی گیاه روند کاهشی دارد که منطقی است (Azadi et al., 2018). همبستگی زیاد بین فنولوژی شبیه‌سازی شده و مشاهده‌شده نشان می‌دهد که مدل SSM در پیش‌بینی فنولوژی موفق بوده است (Azadi et al., 2018).

راحی کاریزکی و حسینی (Rahemi Karizaki & Hosseini, 2020) در بررسی روی مدل‌سازی مراحل فنولوژیک و پارامترهای عملکردی گیاه باقلا (*Vicia faba*)، نتیجه گرفتند که مقایسه بین روز تا گل‌دهی واقعی و پیش‌بینی شده داده‌ها در دامنه ۱۵ درصد از خط ۱:۱ قرار دارند که این نتایج با نتایج پژوهش حاضر هم‌جهت بود. همچنین راحمی کاریزکی و همکاران (Rahemi Karizaki et al., 2023) در مطالعه مراحل فنولوژیک در سورگوم (*Sorghum bicolor* L.) دریافتند که مدل SSM-wheat مراحل فنولوژیک در تراکم‌های مختلف را به‌خوبی پیش‌بینی نمود که با نتایج این پژوهش هم‌خوانی دارد. نتایج مطالعات محمدی و همکاران (Mohammadi et al., 2023) نیز در جو (*Hordeum vulgare*) نشان داد که مدل SSM-

از مدل SSM-Wheat در جهت حداکثر عملکرد استفاده کرد (Moeinirad et al., 2017). نتایج تحقیق مدل SSM-Wheat گندم نشان می‌دهد که مقدار روز تا گرده افشانی با  $R=0/98$  و رسیدگی فیزیولوژیک با  $R=0/96$  بود (Soltani et al., 2013).

### نتیجه‌گیری

به‌طور کلی، نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که مدل SSM-Wheat از توانایی بالایی در شبیه‌سازی مراحل اصلی فنولوژی گندم و عملکرد آن تحت شرایط تراکم در ارقام مختلف برخوردار بود. ارزیابی مدل با استفاده شاخص آماری ضریب تبیین و خطای جذر میانگین مربعات نیز توانمندی مدل را تأیید کرد. به‌طور کلی، مطالعه حاضر تأیید کرد که SSM-Wheat یک مدل ساده، قوی و شفاف است که برای کاربردهای زراعی با هدف بهبود تصمیم‌گیری فنی در مدیریت محصولات زراعی مناسب است. در مجموع، می‌توان با توجه به نتایج به‌دست‌آمده برای مدل SSM-Wheat، برای مدیریت صحیح از نظر تراکم و ارقام مناسب کشت گندم در مزرعه و تحلیل عملکرد آن در شرایط آب و هوایی گنبدکاووس استفاده کرد.

در سورگوم (*Sorghum bicolor* L.)، نه‌بندانی و همکاران (Nehbandani et al., 2016) در سویا (*Glycine max* L.)؛ در گزارش خود اذعان داشتند که مدل SSM-Wheat توانایی این را دارد که عملکرد دانه را به‌خوبی پیش‌بینی نماید. وجود طول روز کافی و مناسب و دمای مطلوب در طول سپری کردن مراحل فنولوژیکی به‌ویژه گل‌دهی و پر شدن دانه‌ها، منجر به افزایش عملکرد شد (Mokari et al., 2020). نتایج ارزیابی مدل SSM-Wheat مراحل فنولوژی گندم نشان داد که مقدار جذر میانگین مربعات خطا برای روز تا گرده‌افشانی و روز تا رسیدگی فیزیولوژیک به ترتیب ۷/۷ (با ضریب تغییرات ۱۰/۳ درصد) و ۷/۱ (با ضریب تغییرات ۵/۲ درصد) روز بودند. همچنین همبستگی بالای فنولوژی شبیه‌سازی‌شده با فنولوژی مشاهده‌شده نیز نشان می‌دهد که مدل در پیش‌بینی فنولوژی موفق بوده است (Panahi et al., 2020). نتایج ارزیابی مدل SSM-Wheat نشان داد که مقادیر R و RMSE اندازه‌گیری‌شده و داده‌های شبیه‌سازی‌شده عملکرد دانه برابر با ۰/۶۲ و ۹۵۸/۸۲ بود، به‌نحوی که مدل SSM-Wheat گندم در ارتقاء صفات فنولوژی برای گندم رقم N-87-20 قابل قبول بود. بنابراین، می‌توان

### References

- Ahmed, M., Akram, M.N. Asim, M. Aslam, M. Hassan, F. Higgins, S. Stockle, O., & Hoogenboom, C.G. (2016). Calibration and validation of APSIM -Wheat and CERES -Wheat for spring wheat under rainfed conditions: Models evaluation and application. *Computers and Electronics in Agriculture*, 123, 384-401. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.03.015>
- Asseng, S., Zhu, Y., Wcang, E., & Zhang, W. (2015). Crop modeling for climate change impact and adaptation. In S. Asseng, Y. Zhu, E. Wang, and W. Zhang (Eds.). *Crop Physiology*. USA. p. 505-546 <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-417104-6.00020-0>
- Azadi, H., Akbar, G.A., & Akbari, G.A. (2018). Parameterization of SSM Model to analyze wheat growth and yield potential under Pakdasht conditions. *Biomedical and Pharmacology Journal*, 11(4), 1913-1926. <http://dx.doi.org/10.13005/bpj/1564>
- Bastos, L.M., Carciocchi, W., Lollato, R.P., Jaenisch, B.R., Rezende, C.R., Schwalbert, R., & Ciampitti, I.A. (2020). Winter wheat yield response to plant density as a function of yield environment and tillering potential: A review and field studies. *Frontiers in Plant Science*, 11, 54. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00054>
- Baygi, Z., Safizadeh, S., Shirani Rad, A.M., Valadabadi S.A., & Jafarinejad. A. (2016). Seed yield and yield component of some spring wheat varieties as affected by different sowing dates in Neishabour. *Journal of Crop Ecophysiology*, 11(4), 905-922. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22092/AJ.2018.109088.1113>
- Delghandi, M., Anderzian, B., Broumand Nesab, S., Masah Boani, A., & Javaheri, A. (2014). Evaluation of the CERES-Wheat model, DSSAT 4.5 version, in simulating the growth, yield and phenology stages of wheat under the conditions of different management of water allocation in the field (case study: Ahvaz city). *Water and soil magazine*, 28(1), 91-82. <https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.20658>
- Farahani, H.J., Izzi, G., & Oweis, T. Y. (2009). Parameterization and evaluation of the AquaCrop model for full and deficit irrigated cotton. *Agronomy journal*, 101(3), 469-476. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0182s>
- Fischer, R. A., Moreno Ramos, O. H., Ortiz Monasterio, I., & Sayre, K. D. (2019). Yield response to plant density,

- row spacing and raised beds in low latitude spring wheat with ample soil resources: An update. *Field Crops Research*, 232, 95–105. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.12.011>
9. Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAOSTAT database Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAOSTAT database (FAOSTAT, 2021), [cited 28 March, 2023], Available from: [http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC/ Forest Meteorology](http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC/Forest%20Meteorology), 250, 243–261. [http://faostat.FAO.Org., 2018](http://faostat.FAO.Org.,2018) <https://doi.org/10.32614/cran.package.faostat>
  10. Geoffrey, E.O., Wietse, H.P., Iwan, S., Omondi, P., & Ronald, W.A. (2018). Probabilistic maize yield prediction over East Africa using dynamic ensemble seasonal climate forecasts. *Agricultural and Forest Meteorology*, 250, 243-261. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.12.256>
  11. Ghanem, M. E., Marrou, H., & Sinclair, T. R. (2015). Physiological phenotyping of plants for crop improvement. *Trends in Plant Science*, 20(3), 139-144. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2014.11.006>
  12. Ghasemimoham, S., Tarabi, B., & Dadarsi, A. 2017. Modeling growth and yield of autumn wheat in Hamadan province. *Journal of Plant Ecophysiology*, 33(10), 199-186. <https://www.researchgate.net/publication/321709810>
  13. Guilpart, N., P. Grassini, V. Sadras, O. Timisina, J., & Cassman, K. G. (2017). Estimating yield gaps at the cropping system level. *Field Crops Research*, 206, 21-32. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.02.008>
  14. Hajarpour, A., Soltani, A., Zainli, A., & Sayyedi, F. (2013). Simulating the effect of climate change on chickpea production in dry and wet conditions in Kermanshah. *Plant Production Research (Agricultural Sciences and Natural Resources)*, 20(2), 252-235.
  15. Hiltbrunner, J., Streit, B. & Lidgens, M. (2007). Are seeding densities an opportunity to increase grain yield of winter wheat in a living mulch of white clover? *Field Crop Research*, 102, 163- 171. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2007.03.009>
  16. Holzworth, D. P., Huth, N. I., & deVoil, P. G. (2011). Simple software processes and tests improve the reliability and usefulness of a model. *Environmental Modelling and Software*, 26(4), 510-516. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2010.10.014>
  17. Kheiri, M., & Kambouzia, J. (2022). Evaluating the efficiency of APSIM-Wheat model in simulating the phenology and grain yield of bread wheat (*Triticum aestivum* L.) in the western and northwestern drylands of Iran. *Journal of Agricultural Sciences of Iran*, 24(2), 118-135. (in Persian with English abstract). <http://agrobreedjournal.ir/article-1-1230-en.html>
  18. Khaliliaqdam, N., Rahemi Karizaki, A., & Mir Mahmoodi, T. (2017). Simulation of wheat production under different planting patterns (adaptation remedy). *Journal of Applied Researches of Plant Ecophysiology*, 3(2), 1-10. (in Persian). <http://arpe.gonbad.ac.ir/article-1-215-fa.html>
  19. 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>
  20. Mohammadi, S., Rahmi Kariziki, A.; & Nakhzari Moghadam, A. (2023). Evaluation of SSM-wheat model to simulate barley growth and yield. *Journal of Applied Researches of Plant Ecophysiology*, 7(13), 133-123. (in Persian). <http://arpe.gonbad.ac.ir/article-1-408-fa.html>
  21. Moeinirad, A., Zeinali, E., Soltani, A., Galeshi, S., & Yeganeh Poor, F. (2017). Investigation of SSM-Wheat model to forecast of growth and yield of wheat in response to fertilizer nitrogen in order to decrease pollution environmental and diseases. *International Journal of Advanced Biological and Biomedical Research*, 5(2), 73-78. <https://doi.org/10.18869/IJABBR>
  22. Mokari, M., Abedinpour, M., & Dehghan, H. (2020). The effect of drought stress and sowing date on grain yield and water use efficiency in autumn wheat in Kashmar region. *Journal of Water Research in Agriculture*, 34(2), 167-189. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22092/jwra.2020.122256>
  23. Nehbandani, A.R., Soltani, A., Zeinali, E., Raeisi, S., & Rajabi, R. (2016). Parameterization and evaluation of SSM-soybean model for prediction of growth and yield of soybean in Gorgan. 2014. *Journal of Plant Production*, 22(3): 1-26. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/20.1001.1.23222050.1394.22.3.1.2>
  24. Panahi, M.H., Soltani, A. , Zeinali, E., Kalateh Arabi, M., & Nehbandani, A. R. (2020). Estimation of phenological parameters in SSM-Wheat model for bread wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes in Golestan province of Iran. *Iranian Journal of Crop Sciences*, 21(4): 302-314. (in Persian). <https://doi.org/10.29252/abj.21.4.302>

25. Pourghasemian, N., Moradi, R., & Naghizadeh, M. (2018). Effect of planting time and place on quality of some broomrape varieties for cultivation in Bardsir, Kerman. *Crops Improvement*, 20, 679-692. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22059/jci.2018.246733.1879>
26. Rahemi Karizaki, A., & Nouralizadeh Otaghsara, M. (2020). Simulation of soybean growth and yield using SSM-iLegume\_Soybean model in Mazandaran. *Plant Ecophysiology*, 12(40), 166-177. (in Persian with English abstract). <https://dorl.net/dor/20.1001.1.20085958.1399.12.40.14.9>
27. Rahemi Karizki, A., & Hosseini, S.H. (2020). Modeling of phenological stages and yield parameters of faba bean in the east of Golestan province conditions. *Iranian Journal Pulses Research*, 11(1), 38-48. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/IJPR.V11I1.69427>
28. Rahemi Karizaki, A., Kouhkan, H., Feyzbakhsh, M.T., & Khaliliaqdam, N. (2023). Simulation of phenological stages and length of growth period of grain sorghum (*Sorghum bicolor* L.) using SSM-iSorghum model (Case study: Gorgan city). *Journal of Agroecology*, 14(4), 729-713. (in Persian with English abstract). <https://agry.um.ac.ir/>
29. Rehban, S., Torabi, B., Soltani, A., & Zainli, A. (2021). Using the SSM-iCrop model to predict the phenology, yield and water productivity of rapeseed (*Brassica napis* L.) in Iran. *Journal of Agroecology*, 13(1), 157-177. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/JAG.V13I2.84057>
30. Sassendran, S.A., Nielsen, D.C Ahuja, L.R.; & Halvorson, A.D. (2004). Modeling nitrogen management on winter wheat production using RZWQM and CERES-Wheat. *Agronomy*, 96, 615-630. <https://doi.org/10.2134/agronj2004.0615>
31. Shiukhy Soqanloo, S., Mousavi Baygi, M., Torabi, B., Raeini Sarjaz, M. (2023). Evaluating the SSM model efficiency in simulating the wheat growth under water stress conditions. *Journal of Water and Soil*, 37(3), 353-366. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.2023.80355.1237>
32. Shiukhy-Soqanloo, S., Mousavi-Baygi, M., Torabi, B., & Raeini-Sarjaz, M. (2021). Evaluation of climate change effects on irrigated wheat CV. Mehregan yield under drought stress condition (Case study: Varamin). *Journal of Agricultural Meteorology*, 9(2), 15-28. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22125/AGMJ.2021.297373.1121>
33. Smethurst, P.J., Huth, N.I., Masikati, P., Sileshi, G.W., Akinnifesi, F. K., Wilson, J., & Sinclair, F. (2017). Accurate crop yield predictions from modeling tree-crop interactions in Gliricidia-maize agroforestry. *Agricultural Systems*, 155, 70-77. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.04.008>
34. 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>
35. Turkman, M., Nasiri Mahalati, M., & Koocheki, A. (2022). Calibration and validation of WOFOST model for predicting phenology and yield of potato (*Solanum tuberosum* L.) in Iran. *Journal of Agroecology*, 4(4), 615-601. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/JAG.V11I1.47502>
36. Zhang, Y., L. Feng, E. Wang, J.; & Li, B. (2012). Evaluation of the APSIM -Wheat model in terms of different cultivars, management regimes and environmental conditions. *Canadian Journal of Plant Science*, 92, 937-949. <https://doi.org/10.4141/cjps2011-266>
37. Zadoks, J. C., Chang, T. T., & Konzak, C. F. (1974). A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed Research*, 14(6), 415-421. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.1974.tb01084.x>