



Evaluation of the SSM_Wheat Model for Estimating the Phenological Stages of Wheat (*Triticum aestivum* L.) under Different Planting Dates and Cultivar Conditions

Ali Rahemi Karizeki^{1*}, Faramarz Sayyedi², Habibollah Soughi², Arazqlych Moarfy¹, Mojtaba Salehi Shaikhi¹ and Saeed Bagherikia²

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

2- Agricultural and Horticultural Department, Golestan Province Agriculture and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Promotion Organization, Gorgan, Iran

(*- Corresponding author's Email: alirahemi@yahoo.com)

Received: 07-08-2025
Revised: 05-11-2025
Accepted: 23-11-2025
Available Online: 10-05-2026

How to cite this article:

Rahemi Karizeki, A., Sayyedi, F., Soughi, H., Moarfy, A., Salehi Shaikhi, M., & Bagherikia, S. (2026). Evaluation of the SSM_Wheat model for estimating the phenological stages of wheat (*Triticum aestivum* L.) under different planting dates and cultivar conditions. *Journal of Agroecology*, 17(4), 561-574. (In Persian with English abstract)
<https://doi.org/10.22067/AGRY.2025.94755.1248>

Introduction

Wheat (*Triticum aestivum* L.) is one of the most important cereal crops. A model is a tool that helps us interpret and understand the world we live in. Crop modeling, a branch of agricultural science, has been around for about 40 years, with the development of powerful and efficient computers playing a major role in its advancement. These models usually enable the determination of management options and can be used to explore a wide range of management strategies at low costs. Plant models have proven to be useful tools for estimating crop yield, integrating a comprehensive set of values under physiological conditions, and evaluating crop management options. One essential feature of simulation models is the accurate prediction of crop phenology. The key phenological stages required for simulating the physiological processes of growth and yield in wheat are as follows: Days from planting to emergence, days from emergence to tillering, days from tillering to stem elongation, days from stem elongation to booting, days from booting to heading, days from heading to anthesis, days from anthesis to physiological maturity, and days from physiological maturity to harvest. The aim of this research is to evaluate the SSM-Wheat model for predicting the phenological stages and yield of wheat.

Materials and Methods

The necessary information for simulating the phenological stages and yield of wheat was obtained from experimental data on 7 planting dates (November 1st, November 10th, November 20th, November 30th,



© Authors retain the copyright. This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

 <https://doi.org/10.22067/AGRY.2025.94755.1248>

December 10th, December 20th, and December 30th) and four bread wheat genotypes (line N9-93 and the varieties Araz, Taktaz, and Arman) over two cropping years, 2019-2020 and 2020-2021. Data on the phenological stages and yield of wheat were used to evaluate the model. Daily meteorological data (maximum and minimum temperatures, precipitation, and solar radiation) were collected and defined in the model. Soil characteristics parameters were considered based on the model's default data.

Results and Discussion

The evaluation of the SSM-Wheat model showed that it accurately simulates phenological stages, including days to emergence, days to stem elongation, days to heading, days to flowering, and days to physiological maturity, as well as grain yield across different planting dates and wheat varieties under the climatic conditions of Gonbad. However, the model did not accurately predict days to tillering, biological yield, and harvest index. The highest coefficients of determination (R^2) were obtained for days to heading (0.79), days to flowering (0.77), and days to physiological maturity (0.92). Accurate prediction of crop phenology is a crucial feature of simulation models. Yield in crop simulation models is largely regulated by the timing of developmental stages. The poor prediction of biological yield and harvest index may be due to water stress and high temperatures during the grain-filling and maturity stages, which caused leaf drop and reduced biomass, leading to incomplete harvest by the combine. Delayed planting and low temperatures during the early growth stages in areas with very cold winters, due to inadequate plant establishment and growth to withstand autumn frosts, and high temperatures in hot, dry regions during the late growth stages, especially the grain-filling period, can reduce plant yield. Grain weight is a key component of final grain yield and is influenced by environmental stresses, particularly water stress.

Conclusion

The evaluation of the SSM-Wheat model showed that it was acceptable for simulating phenological stages, including days to emergence, days to stem elongation, days to heading, days to flowering, days to physiological maturity, and grain yield across different planting dates and cultivars under the climatic conditions of Gonbad Kavous. However, the model poorly predicted days to tillering, biological yield, and harvest index. It seems necessary to revalidate and refine the model accuracy using data from diverse experiments, and if the results of this review are confirmed, to incorporate them into the model equations. Nevertheless, this model can be used in field management planning, such as selecting planting dates, suitable cultivars, analyzing crop yield, and its limitations. Obviously, models become effective only when applied alongside analyses of physiological and ecological conditions, based on experimental measurements and observations from the system.

Keywords: Coefficient of determination, Grain yield, Harvest index, Physiological examination, Simulation

مقاله پژوهشی

جلد ۱۷، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۴، ص ۵۷۴-۵۶۱

ارزیابی مدل SSM_Wheat برای تخمین مراحل فنولوژی گندم (*Triticum aestivum* L.) تحت شرایط تاریخ کاشت و ارقام مختلف

علی راحمی کاریزکی^{۱*}، فرامرز سیدی^۲، حبیب الله سوقی^۲، ارازقلیچ معارفی^۱، مجتبی صالحی شیخی^۱ و سعید باقری کیا^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۰۲

چکیده

گندم (*Triticum aestivum* L.) یکی از مهم‌ترین غلات است که می‌توان با کمک مدل‌های رشد گیاهی، مراحل رشدی و عملکرد آن را در مناطق مختلف پیش‌بینی کرد. مدل SSM-Wheat یکی از مدل‌های اختصاصی توصیف رشد و عملکرد گندم است. لذا هدف از این تحقیق، ارزیابی مدل SSM-Wheat برای پیش‌بینی مراحل فنولوژیکی و عملکرد گندم است. اطلاعات لازم برای شبیه‌سازی مراحل فنولوژی و عملکرد گندم از داده‌های تجربی مربوط به هفت تاریخ کاشت (۱۰ آبان، ۲۰ آبان، ۳۰ آبان، ۱۰ آذر، ۲۰ آذر، ۳۰ آذر و ۱۰ دی ماه) و چهار ژنوتیپ گندم نان (لاین N9-93 و ارقام آراز، تکتاز و آرمان) طی دو سال زراعی ۱۳۹۹-۱۴۰۰ و ۱۴۰۰-۱۴۰۱ به دست آمد. ارزیابی مدل SSM-Wheat نشان داد که این مدل مراحل فنولوژیکی شامل روز تا سبز شدن، روز تا ساقه رفتن، روز تا خوشه‌دهی، روز تا گل‌دهی و روز تا رسیدگی فیزیولوژیکی، و همچنین عملکرد دانه را در تاریخ‌های کاشت مختلف و ارقام گندم تحت شرایط آب‌وهوایی مدیترانه‌ای خشک به‌طور دقیق شبیه‌سازی می‌کند. با این حال، این مدل روز تا پنجه‌زنی، عملکرد بیولوژیکی و شاخص برداشت را به‌طور دقیق پیش‌بینی نکرد. بالاترین ضرایب تعیین (R^2) برای روز تا خوشه‌دهی (۰/۷۹)، روز تا گل‌دهی (۰/۷۷) و روز تا رسیدگی فیزیولوژیکی (۰/۹۲) به دست آمد. در مجموع، با توجه به ارزیابی نسبتاً دقیق این مدل، می‌توان از آن در برنامه‌ریزی های مدیریت مزرعه، مانند انتخاب تاریخ کاشت، ارقام مناسب، تجزیه و تحلیل عملکرد محصول و ارزیابی محدودیت‌های آن استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: رسیدگی فیزیولوژیکی، شاخص برداشت، شبیه‌سازی، عملکرد دانه

مقدمه

تحقیقات مزرعه‌ای که برای تعیین راهکارهای بهینه به‌زراعی و به‌نژادی انجام می‌شوند، علاوه بر هزینه بر بودن، زمان بر نیز می‌باشند. مدل‌های شبیه‌سازی رشد که جایگزین مناسبی برای کاهش هزینه و مدت زمان انجام این گونه تحقیقات مزرعه‌ای محسوب می‌شوند، اثرات پیچیده عواملی مانند آب‌وهوا، خصوصیات خاک، و عوامل

مدیریتی را بر عملکرد گیاه در نظر می‌گیرند (Shiukhy Soqanloo

et al., 2023). توانایی مدل‌های شبیه‌سازی در پیش‌بینی رشد و نمو و عملکرد گیاهان زراعی، آن‌ها را قادر می‌سازد تا با استفاده از گزینه‌های کاهش‌دهنده، اثرات منفی مانند تنظیم تاریخ کشت و کشت ارقام مختلف را تسهیل کند (Raza et al., 2019).

کمّی‌سازی رشد و نمو یک گیاه زراعی در پاسخ به شرایط محیطی در یک سامانه، مدل‌سازی نامیده می‌شود که به کاربر کمک می‌کند تا در مدیریت گیاه زراعی تصمیم بهتری اتخاذ نماید (Kheiri & Kambouzia, 2022). مدل‌های رشد محصول، توسعه و رشد محصولات را به روشی پویا شبیه‌سازی می‌کنند و در نتیجه این عوامل و تعاملات آن‌ها را در نظر می‌گیرند (Berghuijs et al., 2023). یکی از جنبه‌های اصلی مدل‌های شبیه‌سازی محصول، امکان

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

(*) نویسنده مسئول: Email: alirahemi@yahoo.com

<https://doi.org/10.22067/AGRY.2025.94755.1248>

استفاده آن‌ها در شرایط مختلف اقلیمی و مدیریتی است، به‌شرطی که مدل مورد نظر در دامنه وسیعی از شرایط مورد ارزیابی و اعتبارسنجی قرار گرفته باشد (Kassie et al., 2016). یکی از ویژگی‌های ضروری مدل‌های شبیه‌سازی، پیش‌بینی دقیق فنولوژی گیاهان زراعی می‌باشد (Rahemi Karizaki et al., 2023). مطالعات اخیر تأثیر دما، تاریخ کاشت و واریته‌ها را بر فنولوژی گندم از طریق اقلیم‌های متنوع در مقیاس‌های منطقه‌ای با استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی نشان داده‌اند (Hu et al., 2022).

گندم (*Triticum aestivum* L.) یکی از مهم‌ترین محصولات غذایی جهان و منبع غذایی اولیه برای حدود ۳۵ درصد از جمعیت جهان است که به‌عنوان سلطان غلات شناخته می‌شود (Spanic et al., 2024). براساس آمار وزارت جهاد کشاورزی سطح زیرکشت، عملکرد در واحد سطح و تولید گندم کشور در سال زراعی ۱۴۰۲-۱۴۰۱ بیش از شش میلیون هکتار ۱۳۷۰ کیلوگرم در هکتار برای زراعت دیم و ۴۲۰۰ کیلوگرم در هکتار برای زراعت آبی و ۱۲ میلیون تن تولید برآورد شده است. در ۱۰ سال اخیر، حدود یک میلیون تن گندم به‌طور میانگین در ۳۸۰ هزار هکتار زمین در استان گلستان تولید می‌شود که حدود ۱۰ درصد تولید کل کشور محسوب می‌شود (Iran's Agricultural Ministry, 2022).

مدل‌های ریاضی توصیف رشدونمو گیاهان زراعی در طی ۳۰ سال گذشته توسعه و بهبود یافته‌اند و تقریباً در تمام محصولات عمده از جمله سویا (*Glycine max* L.) (Rahemi Karizaki et al., 2020)، ذرت (*Zea mays*) (Rani et al., 2024)، سورگوم (*Sorghum bicolor* L.) (Rahemi Karizaki et al., 2023)، جو (*Hordeum vulgare*) (Wahbi & Sinclair, 2005)، بادام زمینی (*Arachis hypogaea*) (Hammer et al., 1995)، نخود (*Cicer arietinum*) (Rahemi Karizaki et al., 2022) و گندم (Delghandi et al., 2014) مورد مطالعه قرار گرفته است. به‌منظور ارزیابی مدل شبیه‌سازی SSM-Wheat برای پیش‌بینی نمو رشد و عملکرد دو رقم گندم در استان کرمان نشان داد که علی‌رغم اختلافات مطلق بین مقادیر مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده، مدل SSM-Wheat می‌تواند واکنش نمو رشد و عملکرد ارقام مورد استفاده کرمان به تاریخ کاشت را به‌خوبی شبیه‌سازی کند (Bahramjerdi, 2015). طی پژوهشی که روی ارزیابی کارایی مدل SSM در شبیه‌سازی رشدونمو گندم انجام گرفت، نتایج حاکی از آن

دارد که این مدل، مراحل مختلف فنولوژیکی گندم را درک و با دقت بسیار خوبی شبیه‌سازی نمود، به‌نحوی که روز تا گل‌دهی مشاهده شده و شبیه‌سازی‌شده به‌ترتیب ۱۸۱ و ۱۸۴ روز بود (Shiukhy Soqanloo et al., 2023).

درک چگونگی واکنش نمو فنولوژیک گندم به طول روز و دما، ایجاد مدلی برای پیش‌بینی زمان وقوع مراحل مختلف نمو این گیاه زراعی را میسر می‌سازد. انجام آزمایش‌ها و تحقیقات علمی روی محصول زراعی و یافتن شرایط مطلوب رشد آن‌ها مستلزم هزینه‌های گزاف و صرف وقت و دقت زیادی می‌باشد و این موضوع برای کشورهای در حال توسعه به علت کمبود امکانات و پژوهشگر دشوار است (Rahemi Karizaki et al., 2020). لذا هدف از این پژوهش، ارزیابی مدل SSM-Wheat برای تخمین مراحل فنولوژی گندم تحت شرایط تاریخ کاشت و ارقام مختلف می‌باشد.

مواد و روش‌ها

آزمایش‌های مزرعه‌ای

این پژوهش در سال‌های زراعی ۱۴۰۰-۱۴۰۱ و ۱۳۹۹-۱۴۰۰ در ایستگاه تحقیقات کشاورزی گنبد کاووس با عرض جغرافیایی ۳۷ درجه و ۱۶ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۵ درجه و ۱۳ دقیقه شرقی در ارتفاع ۴۵ متر از سطح دریا اجرا شد. اقلیم منطقه گنبدکاووس اقلیم مدیترانه‌ای براساس سامانه طبقه‌بندی اقلیمی کوپن بود. آمار هواشناسی محل اجرای آزمایش در طی دو سال آزمایش در جدول ۱ ارائه شده است.

قبل از اجرای آزمایش، نمونه‌برداری از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری خاک انجام و خصوصیات خاک تعیین شد (جدول ۲). آزمایش به‌صورت کرت‌های خردشده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در چهار تکرار در هر دو سال زراعی اجرا شد. هفت تاریخ کاشت (۱۰ آبان، ۲۰ آبان، ۳۰ آبان، ۱۰ آذر، ۲۰ آذر، ۳۰ آذر و ۱۰ دی ماه) در کرت‌های اصلی و چهار ژنوتیپ گندم نان (شامل لاین امیدبخش-۹۳-۹ N و ارقام آراز، تکتاز و آرمان) در کرت‌های فرعی قرار گرفتند. هر کرت در عرض ۱/۲ متر و طول ۶/۶۶ متر با استفاده از ماشین کاشت آزمایش‌های وینتراشت‌ایگر کشت گردید. میزان بذر در کلیه کرت‌ها براساس تراکم ۳۵۰ دانه در مترمربع بر مبنای وزن هزار دانه ارقام محاسبه شد.

جدول ۱- آمار هواشناسی ایستگاه تحقیقات کشاورزی گنبد کاووس در دو سال آزمایش (۱۳۹۹-۱۴۰۰)
 Table 1- Meteorological statistics of Gonbad Kavous Agricultural Research Station in two years of
 (growing 2019-2020, 2020-2021)

ماه Month	بارش Precipitation (mm)		مجموع ساعات آفتابی Total hours of sunshine (hour)		میانگین دما Temperature mean (°C)	
	2019-2020	2020-2021	2019-2020	2020-2021	2019-2020	2020-2021
آبان October	16.5	23.5	192.9	182.4	16.5	13.4
آذر November	31.9	12.8	107.3	176.1	8.9	13.5
دی December	31.8	36.9	173.5	168.0	8.3	10.1
بهمن January	24.5	61.1	187.8	201.0	10.2	9.5
اسفند February	62.2	70.9	163.3	126.5	9.1	12.1
فروردین March	16.6	11.9	202.7	173.6	16.6	15.5
اردیبهشت April	20.0	87.6	240.1	147.5	22.3	19.9
خرداد May	12.2	2.2	279.0	334.0	28.2	26.3

آمار هواشناسی مربوط به ایستگاه هواشناسی گنبد کاووس است.

Meteorological statistics are related to the Gonbad Kavous weather station

جدول ۲- مشخصات خاک محل اجرای آزمایش
 Table1-Soil characteristics in experimental place

بافت خاک Soil texture	پتاسیم K (mg.kg ⁻¹)	فسفر p (mg.kg ⁻¹)	نیتروژن کل N	هدایت الکتریکی K (dS.m ⁻¹)	اسیدی ته pH	کربن آلی Organic C	آهک Lime (%)
سیلت-لومی Silt-loam	895	11.4	9.52	1.2	7.7	1	18

توصیف مدل

برای شبیه‌سازی رشدنمو اثرات تاریخ کاشت و ارقام گندم از مدل SSM-WHEAT استفاده شد (Soltani et al., 2013). این مدل رشدنمو و عملکرد را به‌صورت روزانه به‌عنوان تابعی از شرایط آب‌وهوایی (با استفاده از شاخص‌های دمای بیشینه، کمینه، و تابش خورشیدی)، خصوصیات خاک و مدیریت زراعی (رقم، تاریخ کاشت، تراکم بوته و رژیم‌آبیاری) شبیه‌سازی می‌کند. از آنجایی که این مدل از صفحات برنامه اکسل شرکت مایکروسافت برای ورود و خروجی استفاده می‌کند، کار با آن ساده است. در این مدل، روش کمی‌سازی پیش‌بینی نمو فنولوژیکی در گندم تابعی از دما، طول دوره رشد

میزان کودهای شیمیایی مصرفی براساس خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه تعیین گردید (جدول ۲). این آزمایش در شرایط مطلوب زراعی و عاری از آفات و بیماری‌ها انجام شد. در طول دوره آزمایش از کاشت تا برداشت مراحل فنولوژی مانند تاریخ‌های سبز شدن، ظهور سنبله، گل‌دهی و رسیدگی فیزیولوژیک ثبت گردید. در پایان هر سال زراعی و پس از رسیدن محصول، برداشت با استفاده از کمباین آزمایشی انجام شد. مساحت برداشت هر کرت ۷/۲ مترمربع (۱/۲ متر عرض و ۶ متر طول) بود. عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک و شاخص برداشت برای هر کرت اندازه‌گیری شدند.

دکتر سلطانی کالیبره شده است که آدرس سایت این مدل در لینک <https://sites.google.com/site/cropmodeling> می‌باشد.

نتایج و بحث

روز تا سبز شدن

جهت بررسی این شاخص، روز از کاشت تا سبز شدن مشاهده با روز تا سبز شدن پیش‌بینی‌شده توسط مدل مورد ارزیابی قرار گرفت. مقادیر مشاهده‌شده در آزمایش مزرعه‌ای با حداکثر، حداقل و میانگین به‌ترتیب ۲۳، ۸/۸ و ۱۵/۸ روز بود. در صورتی که این مقادیر در نتایج پیش‌بینی‌شده به‌ترتیب معادل ۲۹، ۶ و ۱۴/۴ روز بود. مقایسه بین روز تا سبز شدن واقعی و پیش‌بینی‌شده نشان داد که داده‌ها در دامنه ۱۵ درصد از خط ۱:۱ قرار دارند که بیانگر کارایی خوب مدل می‌باشد (شکل ۱). ضریب تبیین بین این مقادیر در خصوص روز تا سبز شدن برابر ۵۳/۰ درصد به دست آمد. جذر میانگین مربعات خطا و مقدار نرمال‌شده آن به‌ترتیب برابر ۴/۷ و ۲۹/۸ درصد بود. براساس توضیحات رینادی و همکاران (Rinaldi et al., 2003)، در صورتی که میزان RMSEn کمتر از ۱۰ درصد باشد، عالی، اگر بین ۱۰ تا ۲۰ درصد باشد، خوب، اگر بین ۲۰ تا ۳۰ درصد باشد، متوسط و اگر بالاتر از ۳۰ درصد باشد، ضعیف برآورد می‌گردد. بنابراین دقت این مدل برای این صفت قابل قبول است.

نتایج شبیه‌سازی مراحل فنولوژیک گیاه سورگوم (*Sorghum bicolor* L. حاکي از آن است که ضریب تبیین برای این مقادیر در خصوص روز از کاشت تا سبز شدن برابر ۷۳/۰ درصد به دست آمد؛ جذر میانگین مربعات خطا و مقادیر نرمال‌شده آن به‌ترتیب ۳۷ و ۱۳/۰ درصد محاسبه شد. این موضوع نشان‌دهنده این است که این مدل قادر به شبیه‌سازی دقیق می‌باشد (Rahemi Karizaki et al., 2023).

تعداد روز تا پنجه‌دهی

نتایج نشان داد که این مدل روز تا پنجه‌دهی را تقریباً بیشتر از مقدار واقعی پیش‌بینی کرد، به‌نحوی که ضریب تبیین، جذر میانگین مربعات خطا و جذر میانگین مربعات خطای نرمال‌شده بین داده‌های به‌دست‌آمده از آزمایش‌های مزرعه‌ای و داده‌های پیش‌بینی‌شده از مدل به‌ترتیب معادل ۳۲/۱، ۱۳/۱ و ۲۷/۵۳ درصد بود. مقایسه داده‌های حاصل مقادیر اندازه‌گیری‌شده و پیش‌بینی‌شده نشان داد که داده‌ها در

رویشی مورد بررسی قرار می‌گیرد و با توجه به اینکه تعداد زیادی از فرایندهای فیزیولوژیکی و ریخت‌شناختی با مرحله فنولوژیک تغییر می‌کنند، کمی کردن دقیق مراحل نمو فنولوژیک برای هر یک از مدل‌های شبیه‌سازی رشد ضروری است. مراحل مهم فنولوژیکی که برای شبیه‌سازی فرایندهای فیزیولوژیکی رشد و عملکرد گندم نیاز است به شرح زیر هستند: روز از کاشت تا سبز شدن، روز از سبز شدن تا پنجه‌دهی، روز از پنجه‌دهی تا ساقه رفتن، روز از ساقه رفتن تا آبستنی، روز از آبستنی تا سنبله رفتن، روز از سنبله رفتن تا گل‌دهی دانه، روز از گل‌دهی تا رسیدگی فیزیولوژیک و روز از رسیدگی فیزیولوژیک تا زمان برداشت (Soltani et al., 2013). در این مدل می‌توان واحد دمایی تجمعی مورد نیاز برای یک مرحله را برحسب تعداد روز تقویمی مورد نیاز برای یک مرحله فنولوژیک بیان کرد که به اصطلاح به آن روز زیستی (روز بیولوژیک) مورد نیاز اطلاق می‌شود. جهت مقایسه داده‌های شبیه‌سازی‌شده با داده‌های اندازه‌گیری شده از آزمایش‌های مزرعه‌ای، از شاخص‌های ارزیابی شامل ضریب تبیین (R^2)، جذر میانگین مربعات خطا ($RMSE^1$)، جذر میانگین مربعات خطای نرمال‌شده ($NRMSE^2$) و خط ۱:۱ استفاده گردید (Rahemi Karizaki et al., 2021).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{N}} \times 100 \quad (1) \text{ معادله}$$

$$NRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{N}} \times \frac{100}{\bar{O}} \quad (2) \text{ معادله}$$

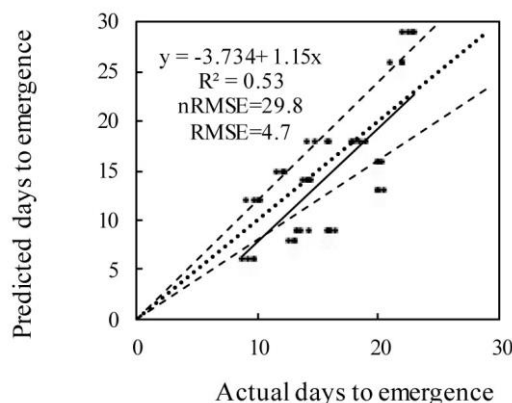
$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (3) \text{ معادله}$$

که در آن‌ها، P_i ، O_i و $\bar{O}$: به‌ترتیب مقادیر شبیه‌سازی، مشاهده شده و میانگین مشاهدات برای متغیرهای مورد مطالعه و N : تعداد مشاهدات است. در صورتی که $NRMSE$ به‌دست‌آمده کمتر از ۱۰ درصد باشد، شبیه‌سازی بسیار عالی، اگر بین ۱۰ تا ۲۰ درصد باشد، شبیه‌سازی خوب، اگر بین ۲۰ تا ۳۰ درصد باشد، شبیه‌سازی نسبتاً خوب و در صورتی که این شاخص آماری بزرگ‌تر از ۳۰ درصد باشد، شبیه‌سازی ضعیف خواهد بود. هرچه مقدار R^2 حاصل از رگرسیون خطی توابع و خط ۱:۱ به یک نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده همبستگی بالا بین مقادیر شبیه‌سازی‌شده و مشاهده‌شده است که نشان‌دهنده توصیف بهتر مدل در شبیه‌سازی صفت مورد نظر می‌باشد (Rahemi Karizaki et al., 2021). لازم به ذکر است که این مدل قبلاً توسط

1- Root mean square error

2- Normalized root mean square error

دامنه ۱۵ درصد از خط ۱:۱ قرار دارند که بیانگر دقت پایین مدل صفت روز تا پنجه‌دهی در شرایط شهرستان گنبد ضعیف می‌باشد. می‌باشد (شکل ۲). لذا با توجه به نتایج فوق، شبیه‌سازی مدل در مورد

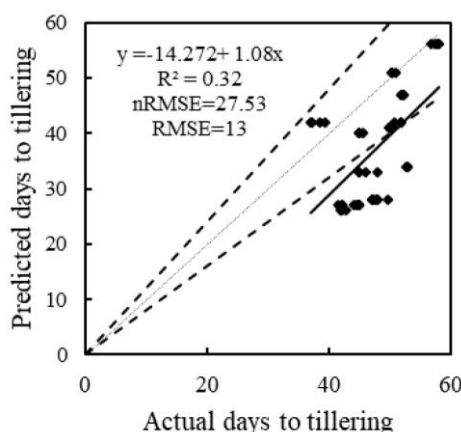


شکل ۱- مقادیر شبیه‌سازی شده روز تا سبز شدن گندم در مقابل مقادیر واقعی آن

Fig. 1- Simulated day to emergence versus actual

نقطه‌چین خط ۱:۱ و خط‌چین بالا و پایین به ترتیب خطوط ۱:۱:۲۰ و ۱:۰/۸۰ هستند.

The dotted line is 1:1 and the top and bottom lines are 1:1: 20 and 1: 0.80 respectively



شکل ۲- مقادیر شبیه‌سازی شده روز تا پنجه‌زنی گندم در مقابل مقادیر واقعی آن

Fig. 2- Simulated day of topping versus actual

نقطه‌چین خط ۱:۱ و خط‌چین بالا و پایین به ترتیب خطوط ۱:۱:۲۰ و ۱:۰/۸۰ هستند.

The dotted line is 1:1 and the top and bottom lines are 1:1: 20 and 1: 0.80 respectively

درصد از خط ۱:۱ قرار دارند که بیانگر کارایی عالی مدل می‌باشد (شکل ۳).

تعداد روز تا سنبله‌دهی

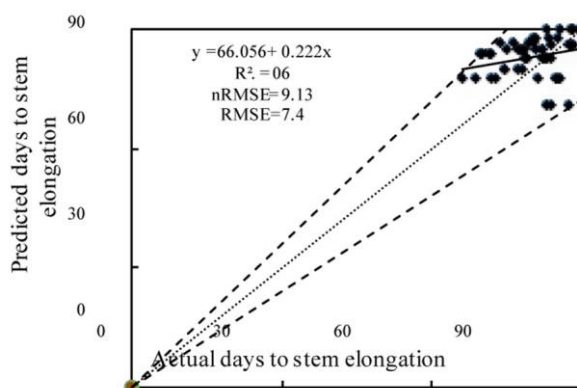
نتایج نشان داد که این مدل، روز تا سنبله‌دهی را به خوبی پیش‌بینی کرد، به نحوی که ضریب تبیین، جذر میانگین مربعات خطا و جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده بین داده‌های به دست آمده از

تعداد روز تا ساقه رفتن

نتایج نشان داد که این مدل، روز تا ساقه رفتن را نیز به خوبی پیش‌بینی کرد، به نحوی که ضریب تبیین، جذر میانگین مربعات خطا و جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده بین داده‌های به دست آمده از آزمایش‌های مزرعه‌ای و داده‌های پیش‌بینی شده از مدل به ترتیب معادل ۰/۰۶، ۷/۴ و ۹/۱۳ درصد بود. مقایسه داده‌های حاصل مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده نشان داد که داده‌ها در دامنه ۱۵

پیش‌بینی شده نشان داد اگر داده‌ها در دامنه ۱۵ درصد از خط ۱:۱ قرار دارند، قابل قبول می‌باشد (شکل ۴). لذا با توجه به نتایج فوق، مدل می‌تواند شبیه‌سازی قابل قبولی در مورد صفت روز تا سنبله‌دهی در شرایط شهرستان گنبد کاووس ارائه دهد.

آزمایش‌های مزرعه‌ای و داده‌های پیش‌بینی شده از مدل به ترتیب معادل ۷۹/۰، ۷۹/۰ و ۹۰/۹۰ روز بود. مقایسه ضریب تبیین روز تا سنبله‌دهی اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده گیاه گندم در شرایط گنبد نشان داد که این مدل، ارزیابی خوبی از این شاخص داشت ($R^2=0.79$). مقایسه داده‌های حاصل مقادیر اندازه‌گیری شده و

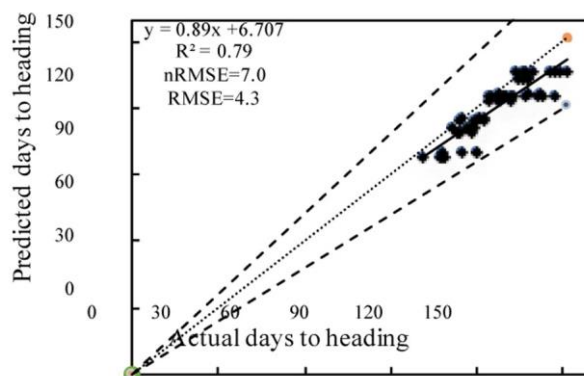


شکل ۳- مقادیر شبیه‌سازی شده روز تا ساقه رفتن در مقابل مقادیر واقعی آن

Fig. 3- Simulated values of days to shoot versus their actual values

نقطه چین خط ۱:۱ و خط چین بالا و پایین به ترتیب خطوط ۱:۱:۲۰ و ۱:۰/۸۰ هستند.

The dotted line is 1:1 and the top and bottom lines are 1:1: 20 and 1: 0.80 respectively.



شکل ۴- مقادیر شبیه‌سازی شده روز تا سنبله رفتن گندم در مقابل مقادیر واقعی آن

Fig. 4- Simulated values of days to spike versus their actual values

نقطه چین خط ۱:۱ و خط چین بالا و پایین به ترتیب خطوط ۱:۱:۲۰ و ۱:۰/۸۰ هستند.

The dotted line is 1:1 and the top and bottom lines are 1:1: 20 and 1: 0.80 respectively

رگرسیون خطی توابع بین مقادیر روز تا گل‌دهی اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده گیاه گندم در شرایط گنبد نشان داد که مدل ارزیابی خوبی از این پارامتر داشت ($R^2=0.77$). علاوه بر آن جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده نیز به ترتیب با مقادیری معادل ۱۲/۳ و ۹/۲ درصد بیانگر پیش‌بینی عالی این پارامتر توسط مدل بود. ضریب همبستگی بالای بین مقادیر روز تا گل‌دهی مشاهده شده و پیش‌بینی

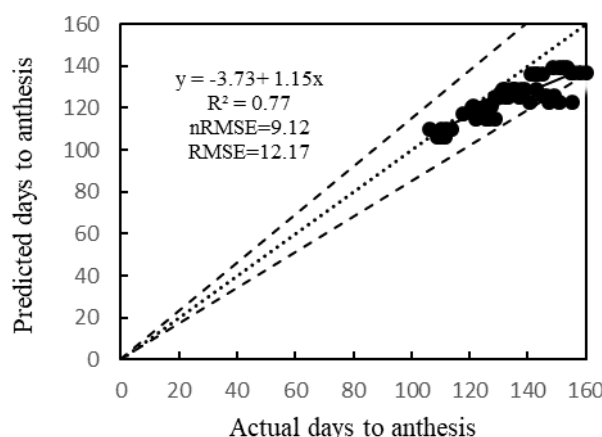
تعداد روز تا گرده افشانی

نتایج نشان داد که این مدل، روز تا گل‌دهی را به خوبی پیش‌بینی کرد، حداکثر و حداقل روز تا گل‌دهی مشاهده شده برابر ۱۶۰/۰ و ۱۰۶/۲ با میانگین ۱۳۳/۴ روز بود، حداکثر و حداقل تعداد روز پیش‌بینی شده برای روز تا گل‌دهی به ترتیب معادل ۱۳۹/۰ و ۱۰۶/۰ با میانگین ۱۲۳/۸ روز بود. مقایسه ضریب تبیین حاصل از آنالیز

مدل SSM با دقت خوبی مراحل مذکور را شبیه‌سازی نموده است، به‌طوری‌که نتایج حاصل از ارزیابی فنولوژی مدل نشان داد که برای روز تا گل‌دهی ۵/۸ روز است که حدود ۱۱ درصد میانگین روز تا گل‌دهی بود که نشان‌دهنده قابل قبول بودن مدل در شبیه‌سازی مراحل فنولوژی بود.

یافته‌های شیوخ‌سوغانلو و همکاران (Shiukhy-Sughanlu et al., 2023) نیز حاکی از توانایی مدل SSM-wheat در شبیه‌سازی روز تا گل‌دهی گندم رقم مهرگان بود، به‌طوری‌که مقادیر جذر میانگین مربعات خطا و ضریب تغییرات برای این صفت به‌ترتیب ۴/۴ درصد و ۲/۴ درصد بود.

شده ($r=0.87$) نیز نشان می‌دهد که مدل در پیش‌بینی این مرحله فنولوژی موفق بوده است. نمودار مربوط به مقادیر اندازه‌گیری‌شده روز تا شروع رشد دانه و مقادیر پیش‌بینی‌شده آن نیز نشان داد که تمامی داده‌ها در محدوده ۱۵ درصد خطا ۱:۱ قرار داشتند (شکل ۵). پیش‌بینی دقیق فنولوژی گیاهان زراعی از ویژگی‌های ضروری مدل‌های شبیه‌سازی به شمار می‌رود. عملکرد در مدل‌های شبیه‌سازی گیاهان زراعی تا حد زیادی با زمان‌بندی مراحل نمو تنظیم می‌شود (Rahemi Karizaki et al., 2023). براساس گزارش نتایج نه‌بندانی و همکاران (Nehbandani et al., 2016) از شبیه‌سازی مراحل فنولوژیکی (گل‌دهی) برای دو رقم سویا سحر و کتول نشان داد که



شکل ۵- مقادیر شبیه‌سازی‌شده روز تا گرده‌افشانی گندم در مقابل مقادیر واقعی آن

Fig. 5- Simulated values of days to flowering (a) and days to spike (b) versus their actual values

نقطه‌چین خط ۱:۱ و خط‌چین بالا و پایین به‌ترتیب خطوط ۱:۱.۲۰ و ۱:۰.۸۰ هستند.

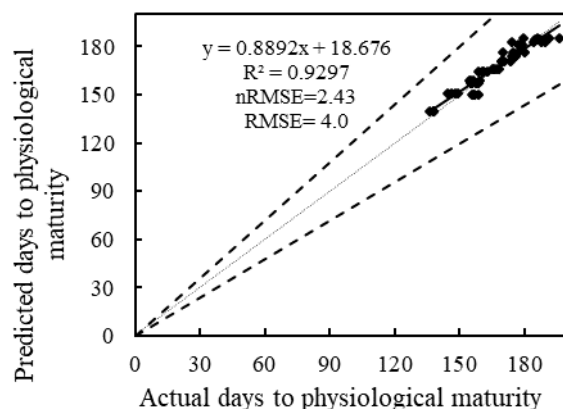
The dotted line is 1:1 and the top and bottom lines are 1:1.20 and 1:0.80 respectively

(شکل ۳ b) که بیانگر پیش‌بینی عالی مدل از خصوصیت فنولوژیک روز تا رسیدگی فیزیولوژیک گندم بود.

براساس گزارش نتایج نه‌بندانی و همکاران (Nehbandani et al., 2016) از شبیه‌سازی مراحل فنولوژیکی (گل‌دهی) برای دو رقم سویا سحر و کتول نشان داد که مدل SSM با دقت خوبی مراحل مذکور را شبیه‌سازی نموده است، به‌طوری‌که نتایج حاصل از ارزیابی فنولوژی مدل نشان داد که برای روز تا رسیدگی ۸/۷ روز است که حدود ۶۱ درصد روز تا رسیدگی محاسبه شده است که نشان‌دهنده دقت بالای مدل در شبیه‌سازی مراحل فنولوژی است.

تعداد روز تا رسیدگی فیزیولوژیک

مقادیر روز تا رسیدگی فیزیولوژیک به‌دست‌آمده از مزرعه در یک محدوده‌ای از مقادیر ۱۹۵ و ۱۳۶ و میانگین ۱۶۷ روز به دست آمد. در مقابل نیز اعداد به‌دست‌آمده از مدل نیز تقریباً در دامنه‌ای مشابه با اعداد واقعی به دست آمد، به‌نحوی‌که حداکثر و حداقل روز تا رسیدگی فیزیولوژیک به‌دست‌آمده از مدل به‌ترتیب معادل ۱۸۵ و ۱۴۰ و میانگین ۱۶۷/۲ درصد به دست آمد. در خصوص این پارامتر، ضریب تبیین، جذر میانگین مربعات خطای نرمال‌شده به‌ترتیب ۰/۹۳، ۴/۹ و ۲/۴ درصد به دست آمد که همگی نشان‌دهنده پیش‌بینی عالی مدل می‌باشد. مقایسه داده‌های حاصل مقادیر اندازه‌گیری‌شده و پیش‌بینی شده نشان داد که داده‌ها در دامنه ۱۵ درصد از خط ۱:۱ قرار دارند



شکل ۶- مقادیر شبیه‌سازی شده روز تا رسیدگی فیزیولوژیکی گندم در مقابل مقادیر واقعی آن
Fig. 6- Simulated values of days to physiological maturity versus their actual values

نقطه چین خط ۱:۱ و خط چین بالا و پایین به ترتیب خطوط ۱:۱.۲۰ و ۱:۰.۸۰ هستند.

The dotted line is 1:1 and the top and bottom lines are 1:1.20 and 1:0.80 respectively

است.

عملکرد بیولوژیک

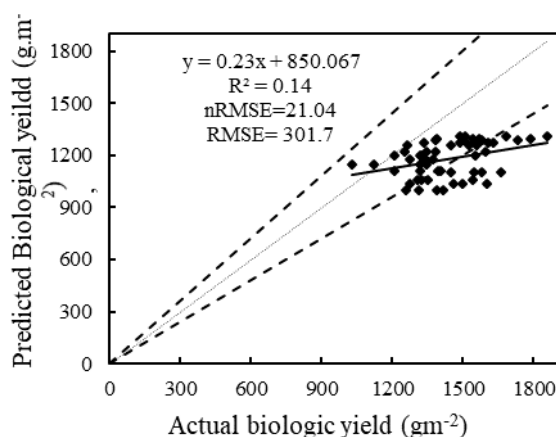
نتایج نشان داد که این مدل، روز تا عملکرد بیولوژیک را تقریباً کمتر از مقدار واقعی پیش‌بینی کرد، به نحوی که ضریب تبیین، جذر میانگین مربعات خطا و جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده بین داده‌های به‌دست‌آمده از آزمایش‌های مزرعه‌ای و داده‌های پیش‌بینی شده از مدل به ترتیب معادل ۰/۱۴، ۳۰۱/۷ و ۲۱/۰۴ درصد بود. مقایسه داده‌های حاصل از مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده نشان داد که بخشی از داده‌ها در دامنه ۱۵ درصد از خط ۱:۱ قرار ندارند که بیانگر دقت پایین مدل می‌باشد. لذا با توجه به نتایج فوق، شبیه‌سازی مدل در مورد عملکرد بیولوژیک گندم در شرایط شهرستان گنبد ضعیف بود و کمتر از مقدار واقعی پیش‌بینی می‌کند (شکل ۷).

ضعف مشاهده شده در دقت مدل SSM-Wheat در پیش‌بینی عملکرد بیولوژیک گندم در شرایط منطقه گنبد را می‌توان عمدتاً به محدودیت‌های ساختاری این مدل نسبت داد. این مدل با رویکردی نسبتاً ساده شده، بسیاری از برهم‌کنش‌های پیچیده گیاه-خاک-اتمسفر، به‌ویژه تنش‌های ترکیبی (مانند گرمایش و خشکی) و پویایی دقیق مواد آلی خاک را که در مدل‌های جامع‌تری مانند DSSAT-CERES-Wheat وجود دارد، در نظر نمی‌گیرد. علاوه بر این، حساسیت بالا به داده‌های اقلیمی ورودی با وضوح مکانی بالا و کالیبراسیون ناکافی پارامترهای ژنوتیپی خاص منطقه از دیگر عوامل مؤثر در بروز خطای سیستماتیک (پیش‌بینی کمتر از واقع) بوده

نتایج بررسی مدل‌سازی مراحل فنولوژیک و پارامترهای عملکردی گیاه باقلا (*Vicia faba* L.) نشان‌دهنده این است که مدل در خصوص عملکرد بیولوژیک قادر نیست تا پیش‌بینی مناسبی را ارائه نماید. پارامترهای آماری شامل ضریب تبیین، جذر میانگین مربعات خطا و جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده نیز بیانگر این مطلب بود (Rahemi Karizaki & Hosseini, 2020).

عملکرد دانه

نتایج نشان داد که این مدل، وزن خشک تجمعی دانه را تقریباً قابل قبول پیش‌بینی کرد، به نحوی که اکثر داده‌ها در محدوده دامنه ۱۵ درصد از خط ۱:۱ قرار داشتند. عملکرد دانه مشاهده شده در دامنه ۳۷۴/۵ تا ۶۲۸/۸ گرم در مترمربع و میانگین ۵۰۸/۸ گرم در مترمربع به دست آمد. نتایج شبیه‌سازی نیز مقادیر حداقل، حداکثر و میانگین عملکرد دانه را به ترتیب ۳۷۴/۵، ۶۲۸/۰۸ و ۵۳۲/۰ گرم در مترمربع محاسبه نمود. لذا با توجه به نتایج فوق، این مدل برای شبیه‌سازی عملکرد دانه در شرایط شهرستان گنبد قابل قبول است (شکل ۸).

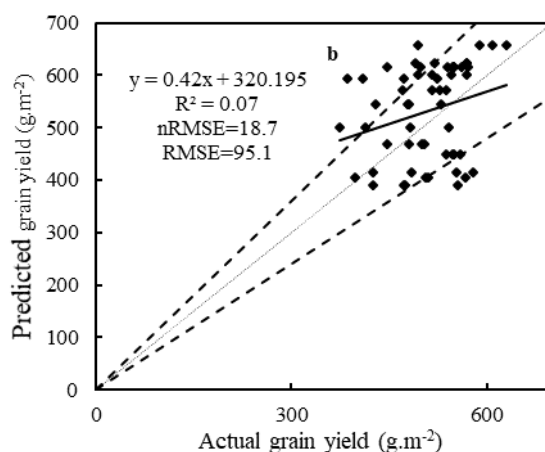


شکل ۷- مقادیر شبیه‌سازی شده عملکرد بیولوژیک گندم در مقابل مقادیر واقعی آن
Fig. 7- Simulated values of aerial body dry weight versus its actual values

نقطه‌چین خط ۱:۱ و خط‌چین بالا و پایین به ترتیب خطوط ۱:۱.۲۰ و ۱:۰.۸۰ هستند.
The dotted line is 1:1 and the upper and lower lines are 1:1.20 and 1:0.80, respectively.

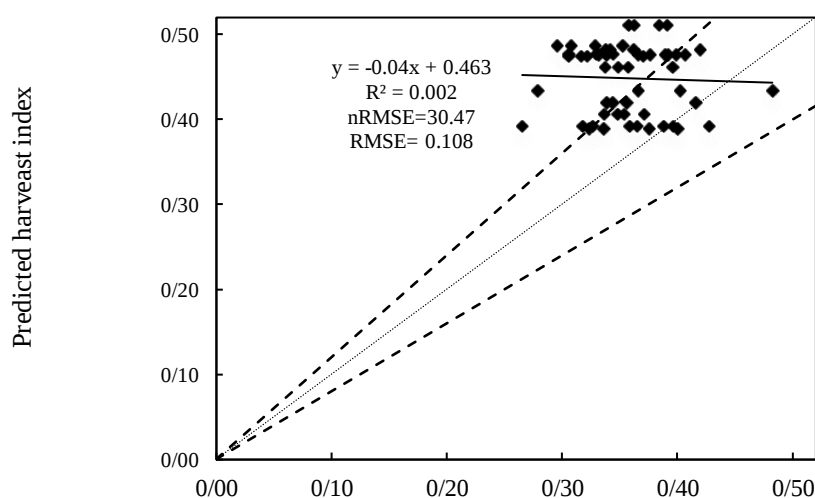
بنابراین، حصول نتیجه مطلوب از به‌کارگیری مدل‌ها مستلزم شناخت مناسب توانایی‌ها و محدودیت‌های آن‌ها است. اما همسو با نتایج این تحقیق، نتایج احمدی علیپور و همکاران (Ahmadi Alipour et al., 2017) در شرایط گرگان نشان داد که مدل SSM-Wheat، مراحل فنولوژیک و عملکرد دانه را با ضریب تبیین بالا و مناسب پیش‌بینی نمود.

برعکس نتایج این تحقیق، نتایج معینی‌راد و همکاران (Moeinirad et al., 2017) بیان‌کننده این است که مدل SSM-Wheat با ضریب تبیین ۰/۷۴ درصد و میانگین مربعات خطای آزمایش ۲۳۰۵/۶۲ درصد به‌خوبی عملکرد بیولوژیک را در گندم پیش‌بینی کرد. استفاده از یک مدل شبیه‌سازی برای رشد و عملکرد، بستگی به پارامترهای ورودی آن مدل در منطقه مورد نظر دارد.



شکل ۸- مقادیر شبیه‌سازی شده عملکرد دانه در مقابل مقادیر واقعی آن
Fig. 8- Simulated values of simulated grain yield versus its actual values

نقطه‌چین خط ۱:۱ و خط‌چین بالا و پایین به ترتیب خطوط ۱:۱.۲۰ و ۱:۰.۸۰ هستند.
The dotted line is 1:1 and the upper and lower lines are 1:1.20 and 1:0.80, respectively.



شکل ۹- مقادیر شبیه‌سازی شده شاخص برداشت گندم در مقابل مقادیر واقعی آن

Fig. 9- Simulated values of harvest index versus its real values

نقطه چین خط ۱:۱ و خط چین بالا و پایین به ترتیب خطوط ۱:۲۰ و ۱:۰۸ هستند.

The dotted line is 1:1 and the upper and lower lines are 1:20 and 1:08 respectively.

نتیجه‌گیری

ارزیابی مدل SSM-Wheat نشان داد که مدل مراحل فنولوژیکی شامل روز تا سبز شدن، روز تا ساقه رفتن، روز تا سنبله‌دهی، روز تا گل‌دهی، روز تا رسیدگی بیولوژیک و عملکرد دانه با تاریخ کاشت‌های مختلف و ارقام متفاوت در شرایط آب‌وهوایی گنبد قابل قبول بود. اما در مقابل روز تا پنجه‌دهی، عملکرد بیولوژیک و شاخص برداشت توسط مدل ضعیف پیش‌بینی شد. به نظر می‌رسد که لازم است آزمون و دقت مدل با داده‌های حاصل از آزمایش‌های متنوع مجدداً انجام شود و در صورت تأیید نتایج این بررسی در معادلات به کار رود. باین‌حال از این مدل می‌توان در برنامه‌ریزی‌های مدیریتی مزرعه از قبیل انتخاب تاریخ کاشت، رقم مناسب، تجزیه و تحلیل عملکرد محصول و محدودیت‌های آن استفاده نمود. بدیهی است که مدل‌ها، زمانی مؤثر واقع می‌شوند که با تحلیل شرایط فیزیولوژیک و اکولوژیک و با توجه به آزمایش‌ها و مشاهده‌های اندازه‌گیری تجربی از سیستم به‌کار گرفته شوند.

شاخص برداشت

نتایج نشان داد که این مدل، پیش‌بینی مناسبی از شاخص برداشت گندم برای شرایط گنبد را ارائه نداد. به‌نحوی که اکثر داده‌ها در محدوده ۱۵ درصد خط ۱:۱ قرار نگرفتند. پارامترهای آماری بیانگر عدم توجه مناسب مقادیر پیش‌بینی شده شاخص برداشت توسط مدل بود؛ که بیانگر این است که این مدل صفت شاخص برداشت را ضعیف پیش‌بینی نموده است. به‌طوری که ضریب تبیین برابر ۰/۰۰۲ درصد به دست آمد (شکل ۹).

نتایج مطالعه روی مراحل فنولوژی باقلا نشان داد که این مدل، پیش‌بینی مناسبی از شاخص برداشت باقلا برای شرایط گنبد را ارائه نمی‌دهد. با وجود قرار گرفتن بیشتر داده‌ها در محدوده ۱۵ درصد خط، ۱:۱ پارامترهای آماری بیانگر عدم توجه مناسب مقادیر پیش‌بینی شده شاخص برداشت توسط مدل بود. به‌طور مثال، ضریب تبیین برابر ۰/۰۰۶ درصد به دست آمد (Rahemi Karizaki & Hoseini, 2020) که با نتایج این تحقیق همسو بود.

References

- 1- Ahmadi Alipour, H., Soltani, A., Kazemi, H., & Nehbandani, A. (2017). Zoning Golestan province in terms of the ability and the wheat production gap using a simulation model (SSM). *Journal of Crops Improvement*, 20(1), 129-144. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/jci.2018.237053.1784>

- 2- Bahramjerdi, F. (2015). Evaluation of SSM-Wheat simulation model under Kerman conditions/ M.Sc. Thesis, Rafsanjan Vali Asr University, Rafsanjan, Iran. 1-100. (In Persian with English abstract).
- 3- Berghuijs, H.N., Silva, J.V., Rijk, H.C.A., van Ittersum, M.K., van Evert, F.K., & Reidsma, P. (2023). Catching-up with genetic progress: Simulation of potential production for modern wheat cultivars in the Netherlands. *Field Crops Research*, 296(15), 108891. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2023.108891>
- 4- Delghandi, M., & Boroomand Nasab, S. (2014). Evaluation of DSSAT 4.5-CSM-CERES-Wheat to simulate growth and development, yield and phenology stages of wheat under water deficit condition (case study: Ahvaz region). *Water and Soil*, 28(1), 82-91. <https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.20658>
- 5- Hammer, G.L., Sinclair, T.R., Boote, K.J., Wright, G.C., Meinke, H., & Bell, M.J. (1995). A peanut simulation model: I. Model development and testing. *Agronomy Journal*, 87(6), 1085–1093. <https://doi.org/10.2134/agronj1995.00021962008700060009x>
- 6- Hu, P., Chapman, S.C., Sukumaran, S., Reynolds, M., & Zheng, B. (2022). Phonological optimization of late reproductive phase for raising wheat yield potential in irrigated mega-environments. *Journal of Experimental Botany*, 73(12), 4236-4249. <https://doi.org/10.1093/jxb/erac144>
- 7- Iran's Agricultural Ministry. (2022). Iran's Agricultural Ministry. 2022. Annual statistics of agricultural production. Available at: www.maj.ir.
- 8- Kassie, B.T., Asseng, S., Porter, C.H., & Royce, F.S. (2016). Performance of DSSAT-Nwheat across a wide range of current and future growing conditions. *European Journal of Agronomy*, 81, 27-36. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.08.012>
- 9- Kheiri, M., & Kambouzia, J. (2022). Evaluation of the efficiency of APSIM -Wheat model for simulation of phenology and grain yield of bread wheat (*Triticum aestivum* L.) in drylands of west and northwest of Iran. *Iranian Journal of Crop Sciences*, 2(24), 118-135. (In Persian with English abstract).
- 10- 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), 459-464.
- 11- 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. *Journal of Plant Production*, 22(3), 1-26. (In Persian with English abstract).
- 12- Rahemi Karizaki, A., & Hosseini, S.H. (2020). Modeling of phenological stages and yield parameters of faba bean in the east of Golstan province conditions. *Iranin Journal of Pulses Research*, 11(1), 8-48. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/ijpr.v11i1.69427>
- 13- Rahemi Karizaki, A., & Nouralizadeh Otahgsara, M. (2020). Simulation of soybean growth and yield using iLegume_Soybean model in Mazandaran. *Journal of Plant Ecophysiology*, 12(40), 166-177. (In Persian with English abstract).
- 14- Rahemi Karizaki, A., Kouhkan, H., Feyzbakhsh, M.T., & Khaliliaqdam, N. (2023). Simulation of phonological development and growth duration in sorghum (*Sorghum bicolor* L.) using SSM-iSorghum model (case Study: Gorgan county). *Journal of Agroecology*, 14(4), 713-729. (. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/AGRY.2021.67229.0>
- 15- Rahemi Karizaki, A., Sanaie, K., Nakhzari Moghaddam, A., Golamalipour Alamdari, E., Pirdehghan, S., & Habibian, L. (2022). The effect of climate change pheological traits of chick pea (*Cicer arietinum* L.) under rainfed and irrigated conditions in Gonbad crop production, *Journal of Crop Production*, 15(1), 57-72. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22069/EJCP.2022.19074.2423>
- 16- Rahemi-Karizaki, A., Khaliliaghdam, N., & Biabani, A. (2021). Predicting time trend of dry matter accumulation and leaf area index of winter cereals under nitrogen limitation by non-linear models. *Plant Physiology Reports*, 26, 443-456. <https://doi.org/10.1007/s40502-021-00597-x>
- 17- Rani, N., Bamel, J.S., Garg, S., Shukla, A., Pathak, S.K., Singh, R.N., & Bamel, K. (2024). Linear mathematical models for yield estimation of baby corn (*Zea mays* L.). *Plant Science Today*, 11(1), 166-175. <https://doi.org/10.14719/pst.2618>

- 18- Raza, A., Razzaq, A., Mehmood, S.S., Zou, X., Zhang, X., & Xu, J. (2019). Impact of climate change on crops adaptation and strategies to tackle its outcome. A review. *Plants*, 8(34), 1-29. <https://doi.org/10.3390/plants8020034>
- 19- Rinaldi, M., Losavio, N., & Flagella, Z. (2003). Evaluation and application of the OILCROP–SUN model for sunflower in southern Italy. *Agricultural Systems*, 78(1), 17-30. [https://doi.org/10.1016/S0308-521X\(03\)00030-1](https://doi.org/10.1016/S0308-521X(03)00030-1)
- 20- Shiukhy-Sughanlu, 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*, 3(37), 353-366. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.2023.80355.1237>
- 21- 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. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22069/IJPP.2013.1266>
- 22- Spanic, V., Lalic, Z., Berakovic, I., Jukic, G., & Varnica, I. (2024). Morphological characterization of 1322 Winter wheat (*Triticum aestivum* L.) varieties from EU referent collection. *Agriculture*, 14(4), pp.551. <https://doi.org/10.3390/agriculture14040551>
- 23- Wahbi, A., & Sinclair, T.R. (2005). Simulation analysis of relative yield advantage of barley and wheat in an eastern Mediterranean climate. *Field Crop Resources*, 91(2-3), 287–296. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2004.07.020>