

Gorgan University of Agricultural
Sciences and Natural Resources

Simulation of Yield and Water Productivity in New Bread Wheat Cultivars Using DSSAT-Nwheat Model

Farasat Sajadi¹, Hossein Sharifan^{*2}, Habiballah Soughi³,
Mohammad Abdolhosseini⁴

1. Ph.D. Student, Dept. of Irrigation and Drainage, Faculty of Water and Soil, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: farasatsajadi@gmail.com
2. Corresponding Author, Associate Prof., Dept. of Irrigation and Drainage, Faculty of Water and Soil, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: h_sharifan@gau.ac.ir
3. Associate Prof., Horticulture Crops Research Department, Golestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Gorgan, Iran. E-mail: hab3asog@gmail.com
4. Assistant Prof., Dept. of Irrigation and Drainage, Faculty of Water and Soil, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: abdolhosseini@gau.ac.ir

Article Info

Article type:
Full Length Research Paper

Article history:
Received: 05.10.2022
Revised: 06.16.2022
Accepted: 07.01.2022

Keywords:
Climate change,
Golestan province,
Modeling,
Sowing date

ABSTRACT

Background and Objectives: Crop simulation models are widely used in the analysis of cropping systems, climate change and crop management methods. It is a good tool for completing and developing the results of field trials to evaluate new cultivars and new management systems. The aim of this research was to simulate the phenological stages and yield of different bread wheat cultivars in climatic conditions of Gorgan city using DSSAT-Nwheat model.

Materials and Methods: In this study, in order to evaluate the performance of the DSSAT-Nwheat model, the data derived from a two-year experiment (Growing seasons 2019-2020 and 2021-2020), in which four new bread wheat cultivars were studied under seven sowing dates as split plot based on randomized complete block design (RCBD). Seven sowing dates (from 1 November to 31 December, 10-day intervals) were placed in main plots and four bread wheat genotypes (including Arman, Araz, Taktaz and N-93-9) were placed as subplots. The data derived from the first year and the second year were used for calibration and validation of the model, respectively. In addition to field data, daily meteorological data, management events, soil characteristics and geographical coordinates were provided to DSSAT 4.7 software. After determining the genetic coefficients of each genotype, the model was calibrated for different traits and subsequently the same coefficients were used to validate the model. Using statistical indices, the simulated values of the model were tested with the observed values.

Results: The results showed that the phenological stages including day to anthesis and day to maturity were simulated with root mean squared error (RMSE) equal to four days, and normalized root mean square error (nRMSE) less than 3%. RMSE for grain yield and biological yield were 416 kg ha⁻¹ and 1000 kg ha⁻¹, respectively, and nRMSE values were between 7-8%. In water productivity based on grain yield and biological yield, nRMSE values were 6.21% and 7.53%, respectively, and RMSE values were 0.93 kg ha⁻¹ mm⁻¹ and 2.91 kg ha⁻¹ mm⁻¹, respectively. In all the simulated traits, the Willmott's agreement indices (d) and the coefficient of determination (R²) were in the acceptable range, which

showed the proper performance of the DSSAT-Nwheat model for simulating these traits in different bread wheat cultivars.

Conclusion: The results of this study showed that the DSSAT-Nwheat model had proper performance for simulating phenological stages, grain yield, biological yield and water productivity in four cultivars including Araz, Arman, Taktaz and N-93-9. The nRMSE values for all studied traits were between 6-8%. The cultivars studied in this study are the latest cultivars released for the northern warm and humid agro-climatic zone, Iran, in the next few years, they will occupy a large area of wheat cultivation in Golestan province. Therefore, it seems that the results of this study can be used in the decisions of wheat cultivation systems, different effects of agricultural management and current and future climate change in Golestan province.

Cite this article: Sajadi, Farasat, Sharifan, Hossein, Soughi, Habiballah, Abdolhosseini, Mohammad. 2023. Simulation of Yield and Water Productivity in New Bread Wheat Cultivars Using DSSAT-Nwheat Model. *Journal of Plant Production Research*, 30 (1), 103-124.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/JOPP.2022.20198.2932

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری مصرف آب در ارقام جدید گندم نان با استفاده از مدل DSSAT-Nwheat

فراست سجادی^۱، حسین شریفان^{۲*}، حبیب‌اله سوقی^۳، محمد عبدالحسینی^۴

۱. دانشجوی دکتری گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.
رایانامه: farasatsajadi@gmail.com
۲. نویسنده مسئول، دانشیار گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.
رایانامه: h_sharifan@gu.ac.ir
۳. دانشیار بخش تحقیقات زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی گلستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، گرگان، ایران. رایانامه: hab3asog@gmail.com
۴. استادیار گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.
رایانامه: abdolhosseini@gu.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی- پژوهشی	سابقه و هدف: مدل‌های شبیه‌سازی گیاهان زراعی به‌طور گسترده‌ای در تجزیه و تحلیل نظام‌های کشت، تغییرات اقلیمی و روش‌های مدیریت محصول مورد استفاده قرار می‌گیرند و ابزار مناسبی برای تکمیل و توسعه نتایج آزمایش‌های مزرعه‌ای برای ارزیابی ارقام جدید و نظام‌های مدیریتی جدید است. هدف از این پژوهش شبیه‌سازی مراحل فنولوژی و عملکرد ارقام مختلف گندم نان در شرایط اقلیمی شهرستان گرگان با استفاده از مدل DSSAT-Nwheat بود.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۲۰ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۱/۰۳/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۱۰	مواد و روش‌ها: در این پژوهش به‌منظور ارزیابی کارکرد مدل DSSAT-Nwheat، از داده‌های یک آزمایش دو ساله (سال‌های زراعی ۱۳۹۹-۱۳۹۸ و ۱۴۰۰-۱۳۹۹) استفاده شد که چهار رقم جدید گندم نان در هفت تاریخ کاشت به صورت کرت‌های خرد شده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی بررسی شده بودند. در این آزمایش هفت تاریخ کاشت (از ۱۰ آبان تا ۱۰ دی ماه به فواصل ۱۰ روزه) در کرت‌های اصلی و چهار ژنوتیپ گندم نان (آرمان، آراز، تکتاز و N-93-9) در کرت‌های فرعی قرار گرفته بودند. از داده‌های سال اول و سال دوم آزمایش به ترتیب جهت واسنجی و صحت‌سنجی مدل استفاده شد. علاوه بر داده‌های مزرعه، داده‌های هواشناسی روزانه، رویدادهای مدیریتی، خصوصیات خاک و مختصات جغرافیایی در اختیار نرم‌افزار DSSAT 4.7 قرار گرفت. پس از تعیین ضرایب ژنتیکی هر رقم، واسنجی مدل برای صفات مختلف انجام شد و از همان ضرایب برای صحت‌سنجی مدل استفاده شد. با استفاده از شاخص‌های آماری مقادیر شبیه‌سازی شده مدل با مقادیر مشاهده شده مورد آزمون قرار گرفت.
واژه‌های کلیدی: استان گلستان، تاریخ کاشت، تغییر اقلیم، مدل‌سازی	

یافته‌ها: نتایج نشان داد که مراحل فنولوژی شامل صفات روز تا گلدهی و روز تا رسیدگی با مقادیر جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) چهار روز، جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده (nRMSE) کم‌تر از سه درصد شبیه‌سازی شده است. مقادیر RMSE برای عملکرد دانه و عملکرد زیستی به ترتیب ۴۱۶ و ۱۰۰۰ کیلوگرم در هکتار بود و مقادیر nRMSE نیز بین ۷-۸ درصد بود. در بهره‌وری آب مبتنی بر عملکرد دانه و عملکرد زیستی مقادیر nRMSE به ترتیب ۶/۲۱ و ۷/۵۳ درصد و مقادیر RMSE نیز در به ترتیب ۰/۹۳ و ۲/۹۱ کیلوگرم در هکتار بر میلی‌متر بود. در تمامی صفات شبیه‌سازی شده آماره‌های شاخص توافق ویلموت (d) و ضریب تبیین (R^2) در محدوده قابل‌قبولی قرار داشتند که نشان از کارایی خوب مدل DSSAT-Nwheat در شبیه‌سازی این صفات در ارقام مختلف گندم نان داشت.

نتیجه‌گیری: نتایج این پژوهش نشان داد که مدل DSSAT-Nwheat با کارایی مناسبی قادر به شبیه‌سازی مراحل فنولوژی، عملکرد دانه، عملکرد زیستی و کارایی مصرف آب در چهار رقم آراز، آرمان، تکتاز و N-93-9 بود. به‌طوری‌که مقادیر nRMSE برای تمامی صفات مورد مطالعه بین ۶-۸ درصد بود. ارقام مورد مطالعه در این پژوهش، جدیدترین ارقام معرفی شده برای اقلیم گرم و مرطوب شمال کشور بودند و در چند سال آینده سطح قابل‌توجهی از کشت گندم را در استان گلستان به خود اختصاص خواهند داد. بنابراین به‌نظر می‌رسد نتایج این پژوهش می‌تواند در تصمیم‌گیری‌ها نظام‌های کشت گندم، تأثیرات مختلف مدیریت زراعی و تغییر شرایط اقلیمی جاری و آینده استان گلستان مورد بهره‌برداری قرار گیرد.

استناد: سجادی، فراست، شریفان، حسین، سوقی، حبیب‌اله، عبدالحسینی، محمد (۱۴۰۲). شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری مصرف آب در ارقام جدید گندم نان با استفاده از مدل DSSAT-Nwheat. نشریه پژوهش‌های تولید گیاهی، ۳۰ (۱)، ۱۰۳-۱۲۴.

DOI: 10.22069/JOPP.2022.20198.2932



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

گندم یکی از مهم‌ترین و اصلی‌ترین محصولات کشاورزی جهان است که با بیش از ۲۱۹ میلیون هکتار بیش‌ترین سطح زیر کشت را در سراسر جهان به خود اختصاص داده است و در مجموع تولیدی در حدود ۷۶۰ میلیون تن دارا است (۱). در ایران نیز گندم از نظر تولید و سطح زیر کشت مهم‌ترین محصول کشاورزی است و افزایش محصول آن روز به روز مورد توجه قرار گرفته است و از نظر اقتصادی و امنیت غذایی مردم از اهمیت بسیاری برخوردار است (۲). بر اساس آمارنامه وزارت جهاد کشاورزی در سال زراعی ۹۸-۹۹ حدود ۳۵۶ هزار هکتار اراضی استان گلستان زیر کشت گندم رفته است (رتبه هشتم در کشور) که در آن بیش از ۱/۲۸ میلیون تن گندم برداشت شده است که از این نظر استان گلستان پس از استان‌های خوزستان و فارس در رتبه سوم کشور قرار گرفته است (۳).

تغییر اقلیم یکی از مهم‌ترین چالش‌های تحقیقاتی متخصصان علوم گیاهی است. افزایش گازهای گلخانه‌ای و اثرات دی‌اکسید کربن باعث تغییر دما و الگوی بارندگی تغییر در مراحل فنولوژی گیاهان و در نتیجه کاهش عملکرد بسیاری از گیاهان زراعی از جمله گندم شده است (۴ و ۵). توانایی کنترل طول دوره مراحل فنولوژیک برای سازگاری با شرایط محیطی خاص و تعیین راهبردهای به‌نژادی بر اساس آن‌ها بسیار مهم است (۶). در بسیاری از مناطق جهان از جمله ایران وقوع تنش‌های گرما و خشکی انتهای فصل عامل اصلی کاهش عملکرد گندم بوده است (۷). گلدهی و دوره پر شدن دانه حساس‌ترین مراحل رشد گندم به تنش‌های محیطی انتهای فصل هستند؛ به‌طوری‌که وقوع تنش در مراحل مذکور باعث عدم باروری مناسب و کوتاه شدن دوره پر شدن دانه می‌شود. بنابراین توانایی گیاه برای تطبیق مراحل حساس نموی با شرایط عدم تنش در طی فصل رشد

می‌تواند سبب فرار گیاه از تنش‌های محیطی مانند خشکی و گرمای انتهای فصل شود (۸). تعیین تاریخ کاشت مناسب برای استفاده از شرایط بهینه ابزاری مهم در به حداقل رساندن عوارض تنش گرما و خشکی انتهای فصل است (۹). در مطالعه‌های مختلفی که در استان گلستان انجام شده است به تفاوت عملکرد ارقام مختلف گندم نان تحت تاریخ‌های مختلف کاشت در اثر تفاوت در شرایط رویشی و زایشی گندم تأکید شده است (۱۰ و ۱۱).

مدل‌های شبیه‌سازی گیاهان زراعی به‌طور گسترده‌ای برای پشتیبانی از تصمیم‌گیری در تجزیه و تحلیل نظام‌های کشت، ارزیابی اثرات اقلیمی و ارزیابی روش‌های مدیریت محصول مورد استفاده قرار می‌گیرند (۱۲). استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی به دلیل هزینه پایین، سرعت بالا و در اختیار قراردادن اطلاعات کامل گزینه مناسبی برای تکمیل و توسعه نتایج آزمایش‌های مزرعه‌ای محسوب می‌شوند (۱۳). به دلیل وابستگی انسان به تولید مواد غذایی پایدار، پژوهش‌ها در زمینه شبیه‌سازی محصولات کشاورزی از اهمیت فراوانی برخوردار است زیرا عملکرد گیاه حاصل از اثر متقابل بین ژنوتیپ، محیط و عوامل مدیریت مزرعه است (۱۴ و ۱۵). مدل‌های شبیه‌سازی می‌توانند برهمکنش‌های پیچیده خصوصیات خاک، شرایط اقلیمی، شیوه‌های مدیریت و ویژگی‌های ژنتیکی محصول را ادغام و باعث درک بهتر از برهمکنش‌های پیچیده بین عوامل مؤثر بر رشد و نمو گیاهان شوند. از جنبه‌های اصلی مدل‌های شبیه‌سازی محصول، امکان استفاده آن‌ها در شرایط مختلف اقلیمی و مدیریتی است، به شرطی که مدل موردنظر در دامنه وسیعی از شرایط مورد ارزیابی و صحت‌سنجی قرار گرفته باشد (۱۲). از عواملی که بر شفافیت یک مدل تأثیر می‌گذارد، مسأله واسنجی مدل برای شرایط جدید است. در اغلب موارد برای رسیدن به نتایج مطلوب در شرایط مختلف، باید چند پارامتر واسنجی

آبی محصول از طریق کارایی تعرق به جای تبخیر تعرق بالقوه و LAI، اضافه شدن یک فاکتور تنش نسبت به دمای بالا برای افزایش سرعت زوال برگ و اصلاح عملکرد کنترل تنش یخبندان، سطح ویژه برگ (SLA)، ضریب خاموشی نور (k) و شبیه‌سازی اثر تنش غرقابی بر رشد محصول می‌باشد. این تفاوت‌ها در مدل‌سازی منجر به تفاوت‌هایی در قابلیت شبیه‌سازی بین مدل‌های CERES-Wheat و Nwheat شده است (۱۶). هم‌چنین در مدل DSSAT-Nwheat نیاز به تعیین ضرایب ژنتیکی بیش‌تری نسبت به مدل CERES-Wheat برای ارقام مورد مطالعه در جهت واسنجی مدل است (۲۱).

مدل DSSAT تحت تاریخ کاشت‌های مختلف (۹ و ۲۱) و تیمارهای آبیاری و کودی متفاوت (۲۲ و ۲۳) برای شبیه‌سازی مراحل فنولوژی، عملکرد دانه و عملکرد دانه گندم مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج شبیه‌سازی چهار رقم گندم با استفاده از مدل DSSAT-Nwheat نشان داده است که مراحل فنولوژیکی کاشت تا گل‌دهی و کاشت تا رسیدگی را به‌خوبی با مقادیر جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) کم‌تر از چهار روز، جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده (nRMSE) کم‌تر از سه درصد و شاخص توافق ویلموت (d) نزدیک به یک شبیه‌سازی شده است. هم‌چنین نتایج شبیه‌سازی عملکرد دانه ارقام گندم نشان داد که مقدار RMSE برای ارقام مختلف متغیر بوده اما به‌طور کلی، جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده (nRMSE) و شاخص توافق ویلموت (d) برای عملکرد دانه ارقام به‌ترتیب کم‌تر از ۲۰ درصد و بالاتر از ۰/۸ بوده که دقت واسنجی را به‌خوبی نشان می‌دهد (۲۴). مدل‌های شبیه‌سازی که اثرات مقادیر مختلف آب بر عملکرد محصول را به‌صورت کمی شبیه‌سازی می‌کنند، ابزارهای مفید در مدیریت آب در سطح مزرعه و بهینه‌سازی کارایی مصرف آب می‌باشند. سعادتی و

شوند. دقت روش واسنجی عمدتاً به نوع و کیفیت داده‌های اندازه‌گیری بستگی دارد. برای برآورد دقیق‌تر ضرایب ژنتیکی ارقام، توصیه می‌شود که آزمایش در چندین تاریخ کاشت در یک محل و یا با تاریخ کاشت یکسان در مکان‌های مختلف انجام شود (۱۷).

سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری برای انتقال فناوری کشاورزی^۱ (DSSAT) یک سیستم مدل‌سازی است که به‌طور گسترده در مناطق مختلف جهان به عنوان ابزاری برای تحقیق و آموزش از آن استفاده شده (۱۲) و به‌عنوان ابزاری بسیار مفید برای کاهش قابل‌ملاحظه زمان و هزینه در آزمایش‌های مزرعه‌ای برای ارزیابی مناسب ارقام جدید و نظام‌های مدیریتی جدید به‌کار می‌رود (۱۴). این بسته نرم‌افزاری مجموعه‌ای از برنامه‌های مستقل است که با یکدیگر به‌کار برده شده و برای ۲۸ محصول زراعی مهم استفاده شده است (۱۹). مدل‌های مختلفی برای شبیه‌سازی رشد گندم توسعه داده شده‌اند، از جمله این مدل‌ها می‌توان به مدل‌های CERES-Wheat، APSIM، WOFOST، EPIC، SOCRUS و Aqua Crop اشاره کرد. در یک مطالعه مروری با بررسی ۲۲۱ مطالعه انجام شده در بین سال‌های ۱۹۸۵ تا ۲۰۱۰ در زمینه مدل‌سازی در گیاهان، گزارش شده است که از بین تمام مدل‌های مختلف مورد استفاده در این مطالعات، مدل CERES بیش‌ترین کاربرد را شبیه‌سازی رشد و نمو و عملکرد گندم در دنیا داشته است (۲۰).

اخیراً مدل DSSAT-Nwheat به دلیل کارایی بالای آن در نسخه جدید نرم‌افزار DSSAT v4.7 در دسترس قرار گرفته است (۱۸). مدل DSSAT-Nwheat یک مدل شبیه‌سازی گندم است که با تغییرات مختلف از مدل DSSAT-CERES مشتق شده است. مهم‌ترین تغییرات در مدل Nwheat جایگزینی روش معمول مصرف آب با یک رویکرد مبتنی بر یک بخش بحرانی آب خاک در دسترس، رابطه زیست‌توده با نیاز

1- Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT)

شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری مصرف آب ... / فراست سجادی و همکاران

استفاده از مدل DSSAT-Nwheat در شرایط آب و هوایی شهرستان گرگان انجام گرفت.

مواد و روش‌ها

محل و زمان اجرای آزمایش: این پژوهش در سال‌های زراعی ۱۳۹۸-۱۳۹۹ و ۱۳۹۹-۱۴۰۰ در ایستگاه تحقیقات کشاورزی عراقی محله گرگان واقع در پنج کیلومتری شمال گرگان با عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۵۴ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۴ درجه و ۲۵ دقیقه شرقی به اجرا در آمد. آمار هواشناسی محل آزمایش شامل مجموع طول روز، بارش، مجموع ساعات آفتابی، میانگین رطوبت نسبی و میانگین و حداکثر دما در طی دو سال آزمایش به تفکیک ماه‌های آزمایش در جدول ۱ ارائه شده است.

همکاران (۲۰۱۶) با ارزیابی مدل CERES-Wheat در شبیه‌سازی عملکرد ارقام گندم تحت تیمارهای مختلف آبیاری گزارش کردند که کارایی مدل CERES-Wheat در شبیه‌سازی فرآیند رشد را مطلوب است و تأثیر آب بر عملکرد گندم در منطقه مورد مطالعه را تأیید کردند (۲۵). در یک آزمایش دوساله روی سه رقم گندم نان تحت تاریخ کاشت‌های زودهنگام، مطلوب و دیرهنگام، کارایی مدل DSSAT-Nwheat در کنار سه مدل دیگر مورد ارزیابی قرار گرفته است و شبیه‌سازی صفات تعداد روز تا گلدهی، حداکثر شاخص سطح برگ، عملکرد زیست‌توده و عملکرد دانه تحت شرایط تنش انتهایی فصل مورد تأیید قرار گرفت (۲۱). این مطالعه با هدف شبیه‌سازی رشد، عملکرد و بهره‌وری مصرف آب ارقام مختلف گندم نان با

جدول ۱- آمار هواشناسی ایستگاه تحقیقات کشاورزی گرگان در دو سال آزمایش (۱۳۹۸-۱۴۰۰) #.

Table 1. Meteorological statistics of Gorgan agricultural research station during two years of the experiment (2019-2021) #.

ماه Month	مجموع طول روز (ساعت) Accumulated day length (hour)	بارش (میلی‌متر) Precipitation (mm)	مجموع ساعات آفتابی (ساعت) Accumulated actual sunshine (hour)	میانگین رطوبت نسبی (درصد) Mean relative humidity (%)	میانگین دما (°C) Mean temperature (°C)	میانگین حداکثر دما (°C) Mean maximum temperature (°C)
	۹۸-۹۹, ۹۹-۰۰	۹۸-۹۹	۹۹-۰۰	۹۸-۹۹	۹۹-۰۰	۹۸-۹۹
	2019-2020 2020-2021	2017-2018 2019-2020	2017-2018 2019-2020	2017-2018 2019-2020	2017-2018 2019-2020	2017-2018 2019-2020
آبان Oct23-Nov21	312.7	106.1	24.4	156.6	174.5	76
آذر Nov22-Dec21	291.0	8.1	37.2	160.9	92.5	77
دی Dec22-Jan20	291.4	11.5	21.9	151.8	154.5	75
بهمن Jan21-Feb19	314.1	27.6	25.0	193.5	165.0	71
اسفند Feb20-Mar20	335.7	57.4	72.3	132.5	149.5	80
فروردین Mar21-Apr20	396.2	61.7	16.8	118.2	187.5	81
اردیبهشت Apr21-May21	431.2	39.8	13.8	184.2	209.2	76
خرداد May22-Jun21	455.0	0.4	9.4	299.8	247.4	64

آمار هواشناسی از ایستگاه فرودگاه در یک کیلومتری ایستگاه تحقیقات کشاورزی گرگان گرفته شد

Meteorological information obtained from Gorgan airport station located one kilometer from Gorgan agricultural research station

آزمایشی انجام شده و عملکرد دانه و اجزای عملکرد هر کرت تعیین شده است.

توصیف مدل DSSAT-Nwheat (اطلاعات ورودی):

اطلاعات ورودی به نرم‌افزار شامل داده‌های هواشناسی روزانه، خصوصیات ژنتیکی و رشد و نمو رقم، رویدادهای مدیریتی، خصوصیات خاک محل اجرای آزمایش، مختصات محل آزمایش شامل عرض و طول جغرافیایی و ارتفاع از سطح دریا بود. فایل داده‌های هواشناسی محل اجرای آزمایش شامل دمای حداقل و حداکثر روزانه، بارندگی، رطوبت نسبی، تبخیر، ساعات آفتابی و میزان تشعشع محاسبه شده با استفاده از ابزار WeatherMan تهیه شده و در اختیار نرم‌افزار DSSAT 4.7 (۱۸) قرار گرفت.

خصوصیات ژنتیکی هر رقم با استفاده از ضرایب ژنتیکی تعیین شد. مدل DSSAT-Nwheat از نه ضریب ژنتیکی اصلی برای هر رقم استفاده می‌کند (۱۶). این ضرایب شامل نیاز به بهاره‌سازی (VSEN)، حساسیت فتوسنتزی (PPSEN)، درجه روز مورد نیاز از جوانه‌زنی تا آغاز گل (P1)، درجه روز مورد نیاز از شروع پر شدن دانه تا رسیدگی (P5)، نسبت تعداد دانه بر وزن ساقه (GRNO)، پتانسیل سرعت رشد دانه (MXFIL)، حداکثر وزن خشک ساقه (STMMX) و فاصله بین ظهور نوک دو برگ متوالی (PHINT) بودند (جدول ۲).

ورودی‌های اصلی خاک شامل پارامترهای شیمیایی و فیزیکی خاک در لایه‌های مختلف خاک، اسیدیته خاک، محتوای آب خاک در نقطه اشباع، نقطه پژمردگی دائم و در ظرفیت زراعی طبق آزمون خاک مزرعه تعیین شدند (جدول ۳). اطلاعات مدیریت زراعی شامل تاریخ‌های کاشت مختلف، عمق کاشت، تراکم، میزان و تاریخ مصرف کودها، آب آبیاری و همچنین شرایط اولیه آب و محتوای نیتروژن خاک بود. ورودی‌های مربوط به خاک مزرعه و مدیریت زراعی توسط ابزار SBuild در نرم‌افزار

واسنجی مدل DSSAT-Nwheat: به‌طور کلی برای واسنجی مدل‌ها از داده‌های تیمارهای نرمال (در شرایط بدون تنش) آزمایش‌های مزرعه‌ای استفاده می‌گردد. در همین راستا واسنجی مدل DSSAT-Nwheat با استفاده از داده‌ها و اطلاعات آزمایشی انجام شد که در سال زراعی ۱۳۹۹-۱۳۹۸ اجرا شد.

شرایط آزمایش، مواد گیاهی و طرح آزمایشی جهت برداشت اطلاعات ورودی: جهت واسنجی مدل،

چهار رقم در هفت تاریخ کاشت به صورت کرت‌های خرد شده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در چهار تکرار کشت شدند. 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 آرمان، آراز، تکتاز و لاین N-93-9 (در دست معرفی) در کرت‌های فرعی قرار گرفتند. مواد گیاهی مورد استفاده در این پژوهش جدیدترین ارقام گندم اقلیم گرم و مرطوب شمال کشور هستند که توسط مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر معرفی شده یا کاندید معرفی است. این آزمایش در شرایط مطلوب رطوبتی انجام شد و با توجه به نیاز آبی گیاه، نسبت به آبیاری اقدام شد. مساحت هر کرت ۷/۲ مترمربع (عرض ۱/۲ متر و طول ۶ متر) و کاشت با استفاده از ماشین کاشت آزمایش‌های غلات انجام شده. میزان بذر در همه کرت‌ها بر اساس تراکم ۳۵۰ دانه در مترمربع بر مبنای وزن هزاردانه ارقام محاسبه گردید و میزان کودهای شیمیایی مصرفی بر اساس خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه بود. در طول دوره رشد نسبت به اعمال توصیه‌های فنی زراعی به طور یکسان برای همه ترکیب‌های تیماری اقدام شده است. در طول دوره آزمایش از کاشت تا برداشت مراحل فنولوژی مانند تاریخ‌های سبز شدن، ظهور سنبله، گلدهی و رسیدگی فیزیولوژیک برای هر رقم یادداشت شده و در پایان هر سال زراعی و پس از رسیدن محصول، برداشت با استفاده از کمباین

شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری مصرف آب ... / فراست سجادی و همکاران

DSSAT 4.7 ساخته شد. داده‌های اندازه‌گیری شده عملکرد دانه و اجزای آن در دو فایل مجزا (A-file و T-file) در ابزار ATCreate به نرم‌افزار معرفی شد. در مزرعه نیز شامل مراحل فنولوژی، عملکرد زیستی،

جدول ۲- ضرایب ژنتیکی مدل DSSAT-Nwheat برای گندم نان.

Table 2. Main genetic coefficients used in DSSAT-Nwheat model for wheat cultivars.

شماره No.	پارامتر Parameter	Parameter definition	تعریف پارامتر	واحد Unit
1	VSEN	Sensitivity to vernalization	حساسیت به بهاره‌سازی	
2	PPSEN	Sensitivity to photoperiod	حساسیت به طول روز	
3	P1	Thermal time from seedling emergence to end of juvenile phase	درجه روز مورد نیاز از جوانه زنی تا آغاز گل	(°C)
4	P5	Thermal time (start of grain filling to maturity)	درجه روز مورد نیاز از شروع پر شدن دانه تا رسیدگی	(°C)
5	GRNO	Kernel number per stem weight	تعداد دانه بر وزن ساقه در زمان شروع پر شدن دانه	kernel/ g-stem
6	MXFIL	Potential kernel growth rate	پتانسیل حداکثر سرعت رشد دانه	mg kernel ⁻¹ day ⁻¹
7	STMMX	Potential final dry weight of a single tiller	پتانسیل وزن خشک نهایی تک ساقه	g stem ⁻¹
8	PHINT	Phyllochron interval (°C-days/leaf appearance)	زمان حرارتی لازم بین ظهور نوک دو برگ متوالی	°C-days/leaf appearance
9	ADLAI	Threshold aeration deficit (AF2) affecting	LAI کسری هوای آستانه (AF2) موثر بر شاخص سطح برگ	

جدول ۳- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش.

Table 3. Physical and chemical characteristics of soil of experimental site.

Soil characteristic	ویژگی‌های خاک	عمق (cm) Depth			
		0-15	15-30	30-45	60-90
pH	اسیدیته	7.20	7.30	7.30	7.30
Ec (dSm ⁻¹)	شوری	1.35	1.27	1.42	1.41
Organic carbon (%)	درصد کربن آلی	1.50	1.10	0.60	0.40
Total nitrogen (%)	درصد نیتروژن	0.15	0.11	0.06	0.03
Available phosphor (ppm)	فسفر قابل دسترس	8.60	4.80	2.00	1.01
Available potassium (ppm)	پتاسیم قابل دسترس	333.00	220.00	108.00	70.00
Bulk density (g cm ⁻³)	وزن مخصوص ظاهری	1.44	1.41	1.40	1.40
Soil texture	بافت خاک				
Clay (%)	درصد رس	28	30	34	33
Silt (%)	درصد سیلت	54	52	52	52
Sand (%)	درصد شن	18	18	14	15
Water content	محتوای آب خاک				
Saturation point (%) (θm)	نقطه اشباع (درصد حجمی)	49.9	52.2	51.90	60.00
Field capacity (%) (θm)	ظرفیت زراعی (درصد حجمی)	27.7	27.0	6.27	7.27
Wilting point (%) (θm)	نقطه پژمردگی دائم (درصد حجمی)	13.1	12.3	9.80	9.80

آماره‌های جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، جذر میانگین مربعات خطای نرمال (NRMSE)، ضریب تبیین (R^2)، شاخص توافق ویلموت (d)، ضریب باقی‌مانده (CRM) و هم‌چنین انحراف مقادیر شبیه‌سازی شده از مشاهده شده با استفاده از معادله خط رگرسیون استفاده شد (۲۷).

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

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

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

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (4)$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n p_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (5)$$

باشد شبیه‌سازی ضعیف است (۲۸). مقدار RMSE هر چقدر به سمت صفر میل کند، عملکرد مدل بهبود می‌یابد. مقدار شاخص آماری توافق (d) نیز هر چقدر به عدد یک نزدیک‌تر باشد یعنی مقادیر مشاهده شده با مقادیر شبیه‌سازی شده تطابق بیشتری دارند و برعکس. مقدار ضریب تبیین (R^2) هم بین صفر تا یک است یعنی هرچه مقدار آن، به عدد یک نزدیک‌تر شود، عملکرد مدل بهتر می‌شود. مقادیر منفی و مثبت CRM به ترتیب نشانگر تمایل مدل به برآورد بیش‌تر و کم‌تر از مقادیر مشاهده‌ای است (۲۹).

ارزیابی آماری مدل: کارایی مدل DSSAT-Nwheat برای صفات تاریخ گلدهی، تاریخ رسیدگی فیزیولوژیکی، عملکرد دانه، عملکرد زیستی و بهره‌وری مصرف آب با مقایسه نتایج شبیه‌سازی شده در برابر مقادیر اندازه‌گیری شده انجام شد. به این منظور از شاخص‌های آماری مختلف از جمله

در این روابط، P_i ، O_i و \bar{O} به ترتیب مقادیر پیش‌بینی شده، مشاهده شده و میانگین مشاهدات برای متغیرهای مورد مطالعه و n تعداد مشاهدات است. NRMSE بر حسب درصد بیان می‌شود و بیانگر درصد اختلاف نسبی مقادیر اندازه‌گیری شده و مشاهده شده است. اگر NRMSE به دست آمده کم‌تر از ۱۰ درصد باشد شبیه‌سازی عالی، اگر بین ۱۰ درصد تا ۲۰ درصد باشد شبیه‌سازی خوب، اگر بین ۲۰ درصد تا ۳۰ درصد باشد شبیه‌سازی نسبتاً خوب و در صورتی که این شاخص آماری بزرگ‌تر از ۳۰ درصد

هواشناسی (شامل دمای حداقل و حداکثر روزانه، بارندگی، رطوبت نسبی، تبخیر، ساعات آفتابی، میزان تشعشع)، داده‌های خاک (شامل مشخصات شیمیایی و فیزیکی خاک در لایه‌های مختلف خاک، اسیدیته خاک و محتوای آب خاک در نقطه اشباع نقطه پژمردگی و در ظرفیت زراعی) و داده‌های مدیریت زراعی (شامل شرایط رطوبتی اجرای آزمایش، تاریخ‌های کاشت مختلف، عمق کاشت، تراکم و غیره) انجام شد. صفات اندازه‌گیری شده در مزرعه نیز در قالب دو فایل مجزا (A-file و T-file) به نرم‌افزار DSSAT 4.7 معرفی شدند.

شبیه‌سازی صفات با استفاده از ضرایب ژنتیکی به‌دست آمده در مدل واسنجی شده انجام شد. با استفاده از آماره‌های جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، جذر میانگین مربعات خطای نرمال (NRMSE)، ضریب تبیین (R^2)، شاخص توافق ویلموت (d)، ضریب باقی‌مانده (CRM) و ضریب رگرسیون (b)، اعتبار مدل DSSAT-Nwheat در شبیه‌سازی صفات مختلف آزمون شدند. بر اساس نتایج حاصل از مدل DSSAT-Nwheat مقادیر بهره‌وری آب (مجموع بارندگی و آبیاری) در تیمارهای مختلف بر اساس رابطه زیر محاسبه شد.

$$WP = \frac{Y}{I + R} \quad (6)$$

ارائه شده است. از آن‌جا که ارقام مذکور بهاره هستند، حساسیت به بهاره‌سازی (VSEN) ارقام بین ۱ تا ۲ بود مقدار این در ارقام زمستانه با توجه به لزوم بهاره‌سازی جهت ورود از مرحله رویشی به مرحله زایشی تا عدد ۴ می‌تواند باشد (۳۰).

ضرایب حساسیت ارقام به طول روز (PPSEN) نیز از ۳/۹ تا ۴ بود. در ارقام مختلف گندم اختلافات ژنتیکی از نظر حساسیت به طول روز وجود دارد و

صحت‌سنجی مدل DSSAT-Nwheat: جهت صحت‌سنجی مدل DSSAT-Nwheat آزمایشی دقیقاً مشابه به آزمایش سال قبل در سال زراعی ۱۳۹۹-۱۴۰۰ اجرا شد. در واقع آزمایش سال دوم نیز به صورت کرت‌های دو بار خرد شده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در چهار تکرار اجرا شد. در این آزمایش نیز 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 مطالعه (آرمان، آراز، تکتاز و لاین N-93-9) در کرت‌های فرعی قرار گرفتند.

ابعاد کرت‌ها، تراکم، میزان بذر مصرفی، میزان کودهای شیمیایی مصرفی و عملیات فنی زراعی مطابق آزمایش سال قبل در نظر گرفته شدند. در طول دوره آزمایش از کاشت تا برداشت مراحل فنولوژی مانند تاریخ‌های سبز شدن، ظهور سنبله، گلدهی و رسیدگی فیزیولوژیک برای هر کرت یادداشت شده و در پایان سال زراعی و پس از رسیدن محصول، برداشت با استفاده از کمباین آزمایشی انجام شده و عملکرد دانه و اجزای عملکرد هر کرت تعیین شدند. جهت صحت‌سنجی مدل مشابه حالت واسنجی، توصیف مدل DSSAT-Nwheat شامل داده‌های

در این رابطه، WP بهره‌وری مصرف آب (کیلوگرم در هکتار بر میلی‌متر)، Y عملکرد دانه یا زیستی (کیلوگرم در هکتار)، I مقدار آبیاری و R مقدار بارندگی بر حسب میلی‌متر هستند.

نتایج و بحث

واسنجی مدل: نتایج برآورد ضرایب ژنتیکی چهار رقم گندم آراز، آرمان، تکتاز و لاین N-93-9 در جدول ۴

ارقام مورد مطالعه رقم تکتاز زودرس‌ترین رقم بود. در مدل Nwheat پارامترهای PHINT و ADLAI تأثیر مستقیم بر پارامترهای رشدی به ویژه شاخص سطح برگ دارد. پارامترهای GRNO و STMMX که اثر مستقیم بر تعداد دانه در سنبله دارند و همچنین MXFIL که سرعت پر شدن دانه را تعیین می‌کند، پارامترهای تعیین‌کننده عملکرد هستند که مقادیر آنها برای هر رقم برآورد شده است (جدول ۴). درک برهمکنش بین این پارامترها در مدیریت‌ها و اقلیم‌های متفاوت باعث برآورد دقیق پارامترها و شبیه‌سازی دقیق عملکرد دانه در مدل می‌شود.

میزان تاخیر در نمو گندم در صورت عدم تامین طول روز مطلوب، بستگی به حساسیت رقم به فتوپریود خواهد داشت. سرعت تغییر نمو با طول روز به صورت ضریبی خاص برای ارقام زراعی در DSSAT بیان می‌شود (۳۱).

ضرایب مقادیر درجه روز رشد مورد نیاز از جوانه‌زنی تا آغاز گل (P1) بین ۳۴۰ تا ۳۸۵ بود همچنین ضرایب مقادیر درجه روز رشد شروع پر شدن دانه تا رسیدگی این ارقام بین ۶۰۰ تا ۷۰۰ برآورد شد. هرچه مقادیر ضرایب P1 و P5 کم‌تر باشد، آن رقم زودرس‌تر است به همین دلیل از میان

جدول ۴- ضرایب ژنتیکی مدل DSSAT-Nwheat برای چهار ژنوتیپ گندم نان.

Table 4. Genetic coefficients of DSSAT-Nwheat model for four bread wheat genotypes.

شماره No.	پارامتر Parameter	تعریف پارامتر Parameter definition	آراز Araz	آرمان Arman	N-93-9	تکتاز Taktaz
1	VSEN	حساسیت به بهاره‌سازی Sensitivity to vernalization	2	1.5	1.9	1
2	PPSEN	حساسیت به طول روز Sensitivity to photoperiod	4	4	3.9	3.9
3	P1	درجه روز مورد نیاز از جوانه‌زنی تا آغاز گل Thermal time from seedling emergence to end of juvenile phase	370	380	385	340
4	P5	درجه روز مورد نیاز از شروع پر شدن دانه تا رسیدگی Thermal time (start of grain filling to maturity)	610	660	700	600
5	GRNO	تعداد دانه بر وزن ساقه در زمان شروع پر شدن دانه Kernel number per stem weight	80	82	90	80
6	MXFIL	پتانسیل حداکثر سرعت رشد دانه Potential kernel growth rate	28	30	29	28
7	STMMX	پتانسیل وزن خشک نهایی تک ساقه Potential final dry weight of a single tiller	1.9	2.9	2	1.4
8	PHINT	زمان حرارتی لازم بین ظهور نوک دو برگ متوالی Phyllochron interval (°C-days/leaf appearance)	3	3	1	3
9	ADLAI	کسری هوای آستانه (AF2) مؤثر بر شاخص سطح برگ Threshold aeration deficit (AF2) affecting LAI	0.8	0.8	0.7	0.7

شبیه‌سازی صفات عملکرد زیستی و عملکرد دانه را به ترتیب با حداکثر RMSE ۱۱۲۵ و ۵۱۷ کیلوگرم در هکتار انجام داد (جدول ۶). آماره‌های ضریب توافق (d) و ضریب تبیین (R^2) برای همه ژنوتیپ‌های مورد مطالعه قابل قبول بود (جدول ۶).

صحت‌سنجی مدل: به منظور صحت‌سنجی مدل از مجموعه‌ای از داده‌های آزمایش سال دوم آزمایش که در برآورد ضرایب ژنتیکی مدل در مرحله واسنجی به کار نرفته بودند، استفاده شد. نتایج صحت‌سنجی صفات روز تا گلدهی، روز تا رسیدگی فیزیولوژیک، عملکرد زیستی و عملکرد دانه در شکل ۱ نشان داده شده است. مقادیر RMSE چهار روز، nRMSE سه درصد، d و R^2 نزدیک به یک نشان از صحت بالای مدل واسنجی شده برای صفت روز تا گلدهی دارد (شکل ۱، الف). این دقت بالا در صفت روز تا رسیدگی ارقام گندم نیز مشاهده شد به طوری که مقادیر RMSE، nRMSE، d و R^2 به ترتیب چهار روز، ۲/۴ درصد، ۰/۹۹ و ۰/۹۶ بود (شکل ۱، ب). این معیارهای آماری نشان از کارایی بالای مدل در شبیه‌سازی صفات فنولوژیکی ارقام مختلف گندم سال‌های مختلف و در تاریخ کاشت‌های مختلف می‌باشد. هم‌چنین نتایج صحت‌سنجی عملکرد دانه نشان داد که مقدار RMSE ۴۱۶ کیلوگرم در هکتار و nRMSE ۸ درصد بود که نشان‌دهنده دقت مدل Nwheat در شبیه‌سازی عملکرد ارقام بود. مقادیر d و R^2 نیز برای عملکرد دانه ارقام به ترتیب ۰/۹۰ و ۰/۶۹ مشاهده شد (شکل ۱، ج). در صفت عملکرد زیستی نیز صحت‌سنجی مدل با دقت بالایی تأیید شد به طوری که مقادیر nRMSE ۷/۳۸ درصد و RMSE هزار کیلوگرم در هکتار بود. هم‌چنین مقادیر d و R^2 برای عملکرد زیستی به ترتیب ۰/۹۳ و ۰/۹۶ بود (شکل ۱، د) که نشان از نزدیکی مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده و تأیید کارایی بالای مدل Nwheat داشت.

مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده شده روز تا گلدهی، روز تا رسیدگی، عملکرد زیستی و عملکرد دانه پس از مرحله واسنجی مدل به تفکیک هر رقم در جدول ۵ به نمایش در آمده است. صفات روز تا گلدهی و روز تا رسیدگی در ارقام مختلف با دقت عالی شبیه‌سازی شدند به طوری که حداکثر مقدار nRMSE برای صفات مذکور به ترتیب با ۴/۲۴ و ۳/۴۰ درصد مربوط به لاین N-93-9 بود. در واقع به طور کلی مدل Nwheat صفات روز تا گلدهی و روز تا رسیدگی را حداکثر با ۶/۶۹ روز اختلاف شبیه‌سازی کرد (جدول ۶). آماره‌های ضریب توافق (d) و ضریب تبیین (R^2) برای همه ژنوتیپ‌های مورد مطالعه نیز نزدیک به یک بود که نشان‌دهنده این است که واسنجی مدل برای مراحل نمو با دقت بالایی انجام شده است. مقادیر آماره CRM در همه ژنوتیپ‌ها منفی بود که نشان می‌دهد که مدل واسنجی شده N-Wheat مراحل فنولوژی را بیش‌تر از مقادیر مشاهده شده شبیه‌سازی کرده است (جدول ۶). واسنجی دقیق مراحل فنولوژی از آن جهت اهمیت دارد که این مراحل تأثیر مستقیمی بر شبیه‌سازی رشد و عملکرد دارند و به عبارتی، پیش‌نیاز واسنجی تولید ماده خشک و عملکرد می‌باشد (۳۲ و ۳۳). در صفات عملکرد زیستی و عملکرد دانه نتایج مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده شده در مرحله واسنجی مدل نشان داد که میانگین عملکرد شبیه‌سازی شده هر چهار ژنوتیپ به مقادیر مشاهده شده بسیار نزدیک بوده است (جدول ۵) و مدل به صورت عالی شبیه‌سازی عملکرد ارقام را در تاریخ‌های مختلف کاشت انجام داده است مقدار nRMSE برای هر چهار ژنوتیپ کم‌تر از ۱۰ درصد بود.

حداکثر مقدار nRMSE برای صفات عملکرد زیستی و عملکرد دانه به ترتیب با ۸/۲۴ و ۹/۸۲ درصد مربوط به رقم آراز بود. به طور کلی مدل Nwheat

جدول ۵- مقادیر شبیه‌سازی و مشاهده‌ای صفات روز تا گلدهی، روز تا رسیدگی، عملکرد زیستی و عملکرد دانه چهار ژنوتیپ گندم

نان توسط مدل DSSAT-Nwheat.

Table 5. Simulated and observed values of day to anthesis, day to maturity, biological yield and grain yield of four bread wheat genotypes using DSSAT-Nwheat model.

رقم/لاین Cultivar/ Line	تاریخ کاشت [§] Sowing Date [§]	روز از کاشت تا گلدهی		روز از کاشت تا رسیدگی		عملکرد زیستی (Kg ha ⁻¹)		عملکرد دانه (Kg ha ⁻¹)	
		Day to anthesis		Day to maturity		Biological yield (Kg ha ⁻¹)		Grain yield (Kg ha ⁻¹)	
		مشاهده‌شده Observed	شبیه‌سازی شده Simulated	مشاهده‌شده Observed	شبیه‌سازی شده Simulated	مشاهده‌شده Observed	شبیه‌سازی شده Simulated	مشاهده‌شده Observed	شبیه‌سازی شده Simulated
آراز Araz	اول (SD1)	150	155	188	193	16089	16985	5840	5807
	دوم (SD2)	145	152	183	190	15833	16912	5993	5672
	سوم (SD3)	144	145	180	181	15194	16023	6154	5349
	چهارم (SD4)	140	138	173	171	14125	14116	5993	5207
	پنجم (SD5)	132	130	161	159	12278	13465	4897	5042
	ششم (SD6)	120	121	149	150	11789	13158	4387	4872
	هفتم (SD7)	109	113	137	141	10250	11961	3577	4070
	میانگین Mean	134	136	167	169	13651	14660	5263	5146
آرمان Arman	اول (SD1)	153	156	192	195	15917	17231	5780	6176
	دوم (SD2)	147	153	186	192	15517	16800	6417	5687
	سوم (SD3)	146	146	183	183	15394	16183	5561	5559
	چهارم (SD4)	141	139	175	173	13406	14407	5477	5445
	پنجم (SD5)	135	131	165	161	12923	13834	4870	5299
	ششم (SD6)	122	122	151	151	12350	13397	4473	5046
	هفتم (SD7)	111	114	139	142	11147	12193	4490	4592
	میانگین Mean	136	137	170	171	13808	14864	5295	5401
N-93-9	اول (SD1)	150	158	188	196	15658	16618	5933	5727
	دوم (SD2)	145	154	184	193	15500	16287	6043	5456
	سوم (SD3)	144	148	181	185	15111	15438	6073	5439
	چهارم (SD4)	140	141	173	174	12452	13880	5380	5150
	پنجم (SD5)	132	132	162	162	12319	13363	4807	5044
	ششم (SD6)	120	124	149	153	11688	12889	4580	4760
	هفتم (SD7)	109	116	137	144	11089	11680	4133	4017
	میانگین Mean	134	139	168	172	13402	14308	5278	5085
تکتاز Taktaz	اول (SD1)	147	147	185	185	15683	15971	4660	5263
	دوم (SD2)	143	147	181	185	15254	16563	5275	5481
	سوم (SD3)	141	140	177	176	14550	15661	5635	5576
	چهارم (SD4)	138	134	172	168	13167	13043	5447	5059
	پنجم (SD5)	129	126	159	156	12490	12513	4900	4683
	ششم (SD6)	117	118	147	148	11817	12420	4568	4450
	هفتم (SD7)	107	110	135	138	10514	11582	4125	3671
	میانگین Mean	132	132	165	165	13354	13965	4944	4883

[§] تاریخ کاشت اول (۱۰ آبان)، تاریخ کاشت دوم (۲۰ آبان)، تاریخ کاشت سوم (۳۰ آبان)، تاریخ کاشت چهارم (۱۰ آذر)، تاریخ کاشت پنجم (۲۰ آذر)، تاریخ کاشت ششم (۳۰ آبان) و تاریخ کاشت هفتم (۱۰ دی)

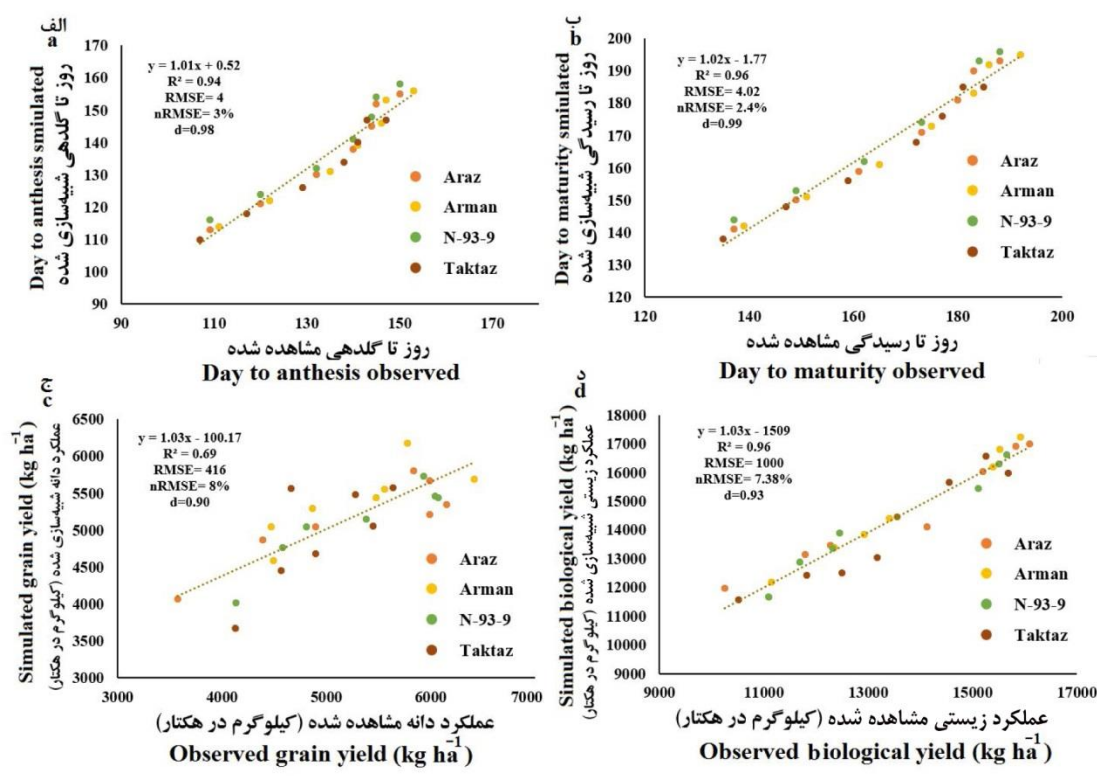
[§] SD1 (01 November), SD2 (11 November), SD3 (21 November), SD4 (1 December), SD5 (11 December), SD6 (21 December) and SD7 (31 December)

شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری مصرف آب ... / فراست سجادی و همکاران

جدول ۶- مقادیر شاخص‌های آماری مدل برای صفات فنولوژیک و عملکرد در ژنوتیپ‌های مختلف گندم نان.

Table 6. Values of model statistical indices for phenological traits and yield in different bread wheat genotypes.

رقم	صفت	RMSE	nRMSE	d	R ²	CRM
آراز Araz	روز تا گلدهی Day to anthesis	3.78	2.81	0.98	0.95	-0.01
	روز تا رسیدگی Day to maturity	3.78	2.26	0.99	0.97	-0.01
	عملکرد زیستی Biological yield	1125.36	8.24	0.92	0.95	-0.07
	عملکرد دانه Grain yield	516.76	9.82	0.87	0.80	0.02
آرمان Arman	روز تا گلدهی Day to anthesis	3.25	2.38	0.99	0.95	-0.01
	روز تا رسیدگی Day to maturity	3.25	1.91	0.99	0.97	-0.01
	عملکرد زیستی Biological yield	1070.21	7.75	0.91	0.99	-0.08
	عملکرد دانه Grain yield	416.36	7.86	0.85	0.64	-0.02
N-93-9	روز تا گلدهی Day to anthesis	5.69	4.24	0.98	0.95	-0.04
	روز تا رسیدگی Day to maturity	5.69	3.40	0.99	0.97	-0.03
	عملکرد زیستی Biological yield	968.70	7.23	0.93	0.96	-0.07
	عملکرد دانه Grain yield	367.21	6.96	0.91	0.86	0.04
تکتاز Taktaz	روز تا گلدهی Day to anthesis	2.90	2.20	0.98	0.96	-0.01
	روز تا رسیدگی Day to maturity	2.90	1.76	0.99	0.99	-0.01
	عملکرد زیستی Biological yield	806.30	6.04	0.95	0.92	-0.07
	عملکرد دانه Grain yield	343.76	6.95	0.90	0.71	-0.05



شکل ۱- مقادیر شبیه‌سازی شده در مقابل مقادیر مشاهده شده در صفات روز تا گلدهی، روز تا رسیدگی، عملکرد دانه و عملکرد زیستی در چهار ژنوتیپ گندم نان.

Fig. 1. Simulated values versus observed values in day to anthesis, day to maturity, grain yield and biological yield in four bread wheat genotypes.

است مقدار RMSE را برای روز تا گلدهی، روز تا رسیدگی و عملکرد دانه به ترتیب ۲/۳۳، روز، ۲/۲۵ و ۵۶۸ کیلوگرم در هکتار گزارش کردند (۲۴). اندرزیان و همکاران (۲۰۱۵) برای گندم رقم چمران در شرایط اقلیمی استان خوزستان با مدل CERES-Wheat به پیش‌بینی مراحل فنولوژیکی و عملکرد پرداختند و nRMSE را برای روز تا گلدهی، روز تا رسیدگی و عملکرد دانه را به ترتیب ۳، ۲ و ۱۱/۸ درصد گزارش کردند (۹). در مطالعه دیگری که در استان گلستان روی چهار رقم گندم نان کوه‌دشت، شیروودی، تجن و زاگرس انجام شده است نتایج حاصل از شبیه‌سازی مراحل فنولوژیکی و عملکرد دانه نشان داده که مقادیر RMSE برای روز تا گلدهی و روز تا رسیدگی به ترتیب ۲/۴ و ۷/۵ روز و برای

شبیه‌سازی تولید ماده خشک احتمالاً بخش مرکزی هر مدل شبیه‌سازی است که خود تحت تأثیر مدل‌سازی نمو فنولوژیک و تغییرات سطح برگ نیز قرار می‌گیرد (۳۳ و ۳۴). با استفاده از مدل CERES-Wheat در مطالعات متعددی مراحل فنولوژی ارقام تجاری گندم مناطق با خطای کم‌تر از ۱۰ درصد شبیه‌سازی شده است (۳۵ و ۳۶). بنایان و همکاران (۲۰۰۳) شبیه‌سازی مراحل فنولوژیکی گندم زمستانه آمریکا را با مدل CERES-Wheat انجام دادند و به جذر میانگین مربعات خطا ۷/۱ روز برای تاریخ گلدهی و ۱۰ روز برای رسیدگی برداشت دست یافتند (۳۷). فلاح و همکاران (۲۰۲۱) با استفاده از مدل Nwheat برای رقم تجن که در دهه هفتاد شمسی در استان گلستان به‌طور گسترده کشت می‌شده

بر اساس عملکرد دانه و عملکرد زیستی را به ترتیب با حداکثر با اختلاف ۱/۲۶ و ۳/۳۷ کیلوگرم در هکتار بر میلی‌متر شبیه‌سازی کرد (جدول ۸).

به‌طور کلی آمارهای d و R^2 نیز در ارقام مختلف در محدوده قابل‌قبولی بودند (جدول ۸). در صحت‌سنجی بهره‌وری مصرف آب مبتنی بر عملکرد دانه و عملکرد زیستی مقادیر $nRMSE$ به ترتیب ۶/۲۱ و ۷/۵۳ درصد و مقادیر $RMSE$ نیز در به ترتیب ۰/۹۳ و ۲/۹۱ کیلوگرم در هکتار بر میلی‌متر بود. شاخص‌های آماری d و R^2 نیز نسبتاً در محدوده قابل‌قبولی قرار داشتند (شکل ۲). با استفاده از مدل CERES-Wheat بهره‌وری مصرف آب در تیمارهای مختلف آبیاری ۱۲/۸۰، ۱۱/۳ و ۸/۳۱ کیلوگرم در هکتار بر میلی‌متر برای رقم چمران در شرایط آب و هوایی اهواز گزارش شده است (۳۸). در شرایط آب و هوایی مشهد نیز بهره‌وری آب با استفاده از مدل CERES-Wheat مورد مطالعه قرار گرفته و کارایی مطلوب مدل مذکور در شبیه‌سازی فرایند رشد و تأثیر آب بر عملکرد گندم گزارش شده است (۲۵). اثرات مدیریت آب بر عملکرد ارقام گندم بهاره در کانادا با استفاده از مدل Nwheat مورد بررسی قرار گرفته است و بیان شده که ۴۰۰ میلی‌متر آب ورودی به مزرعه (مجموع بارش و آبیاری) جهت دستیابی به حداکثر عملکرد در منطقه مورد بررسی نیاز است (۳۹).

عملکرد ۶۶۸ کیلوگرم در هکتار بوده است (۲۶). لازم به ذکر است ارقام مذکور با توجه به معرفی ارقام پر عملکرد جدید، دیگر در سطح استان گلستان کشت نمی‌شوند. در مطالعه دل‌قندی و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از مدل CERES-Wheat در صفت عملکرد زیستی رقم گندم چمران مقادیر $nRSME$ و R^2 به ترتیب پنج درصد و ۰/۹۰ گزارش شد (۳۸) که حدود آن با نتایج آزمایش ما مطابقت داشت. در یک آزمایش دو ساله با استفاده از کاربرد سطوح مختلف کود نیتروژن، عملکرد دانه و عملکرد زیستی گندم نان شبیه‌سازی شده است. بر این اساس در عملکرد دانه مقادیر شاخص‌های آماری مقادیر $nRMSE$ ، d و R^2 به ترتیب ۱۳ درصد، ۰/۹۶ و ۰/۹۰ بود و برای صفت عملکرد زیستی به ترتیب هفت درصد، ۰/۹۹ و ۰/۹۶ بود (۲۳) که این یافته‌ها نیز با نتایج پژوهش حاضر در توافق است.

بهره‌وری مصرف آب: مقادیر شبیه‌سازی و مشاهده شده بهره‌وری مصرف آب بر اساس عملکرد زیستی و عملکرد دانه چهار رقم گندم نان با استفاده از مدل واسنجی شده DSSAT-Nwheat در جدول ۷ ارائه شده است. در شبیه‌سازی بهره‌وری مصرف آب بر اساس عملکرد دانه و عملکرد زیستی مقادیر $nRMSE$ در ارقام مختلف زیر ۱۰ درصد بود که نشان از کارکرد خوب مدل در شبیه‌سازی این صفت بوده است. مدل Nwheat بهره‌وری مصرف آب

جدول ۷- مقادیر شبیه‌سازی و مشاهده شده بهره‌وری مصرف آب بر اساس عملکرد زیستی و عملکرد دانه چهار ژنوتیپ گندم نان با استفاده از مدل DSSAT-Nwheat.

Table 7. Simulated and observed values of water productivity based on biological yield and grain yield in the four bread wheat genotypes using DSSAT-Nwheat model.

رقم/لاین Cultivar/Line	تاریخ کاشت [§] Sowing Date [§]	بهره‌وری مصرف آب عملکرد زیستی (kg ha ⁻¹ mm ⁻¹) Water productivity based on biological yield (kg ha ⁻¹ mm ⁻¹)		بهره‌وری مصرف آب عملکرد دانه (kg ha ⁻¹ mm ⁻¹) Water productivity based on grain yield (kg ha ⁻¹ mm ⁻¹)	
		مشاهده شده Observed	شبیه‌سازی شده Simulated	مشاهده شده Observed	شبیه‌سازی شده Simulated
آراز Araz	اول (SD1)	41.1	43.4	14.9	14.8
	دوم (SD2)	42.6	45.5	16.1	15.3
	سوم (SD3)	41.4	43.7	16.8	14.7
	چهارم (SD4)	41.6	41.6	17.7	15.8
	پنجم (SD5)	36.6	40.1	14.6	15.0
	ششم (SD6)	35.7	39.9	13.3	14.8
	هفتم (SD7)	33.2	38.8	11.6	12.2
	میانگین Mean	38.9	41.8	15.0	14.7
آرمان Arman	اول (SD1)	40.7	44.0	14.8	15.4
	دوم (SD2)	41.8	45.2	17.3	16.3
	سوم (SD3)	41.9	44.1	15.2	15.1
	چهارم (SD4)	39.5	42.4	16.1	16.0
	پنجم (SD5)	38.5	41.2	14.5	15.8
	ششم (SD6)	37.4	40.6	14.6	15.3
	هفتم (SD7)	36.1	39.5	13.6	14.9
	میانگین Mean	39.4	42.4	15.1	15.5
N-93-9	اول (SD1)	40.0	42.5	15.2	14.7
	دوم (SD2)	41.7	43.8	16.3	14.9
	سوم (SD3)	41.2	42.1	16.5	15.9
	چهارم (SD4)	36.7	40.9	15.9	15.2
	پنجم (SD5)	36.7	39.8	14.3	14.8
	ششم (SD6)	35.4	39.1	13.9	14.4
	هفتم (SD7)	36.0	37.9	13.4	13.0
	میانگین Mean	38.2	40.9	15.1	14.7
تکتاز Taktaz	اول (SD1)	40.1	40.8	11.9	13.1
	دوم (SD2)	41.0	44.6	14.2	14.1
	سوم (SD3)	39.6	42.7	15.4	15.3
	چهارم (SD4)	38.8	38.4	16.0	14.9
	پنجم (SD5)	37.2	37.3	14.6	14.4
	ششم (SD6)	35.8	37.7	13.9	13.5
	هفتم (SD7)	34.1	37.6	13.4	12.9
	میانگین Mean	38.1	39.9	14.2	14.0

[§] تاریخ کاشت اول (۱۰ آبان)، تاریخ کاشت دوم (۲۰ آبان)، تاریخ کاشت سوم (۳۰ آبان)، تاریخ کاشت چهارم (۱۰ آذر)، تاریخ کاشت پنجم (۲۰ آذر)، تاریخ کاشت ششم (۳۰ آبان) و تاریخ کاشت هفتم (۱۰ دی)

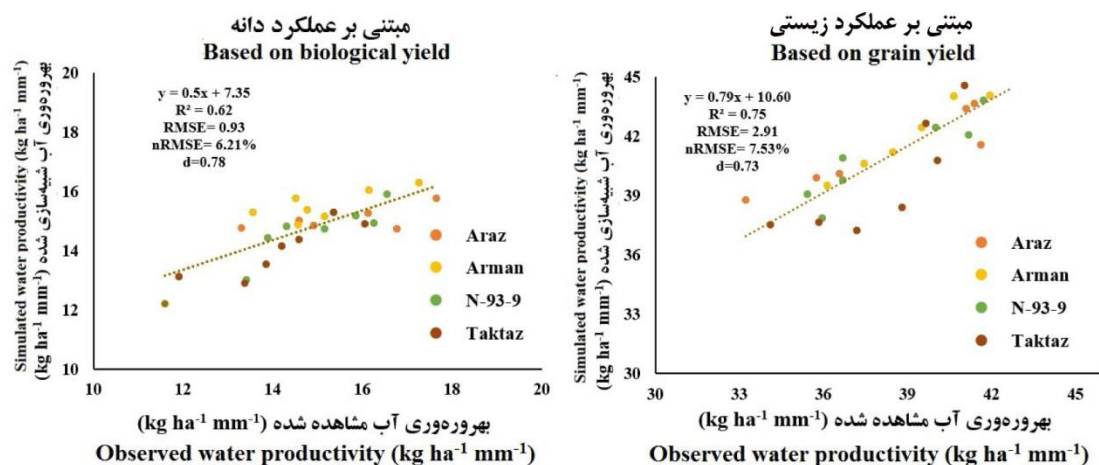
[§] SD1 (01 November), SD2 (11 November), SD3 (21 November), SD4 (1 December), SD5 (11 December), SD6 (21 December) and SD7 (31 December)

شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری مصرف آب ... / فراست سجادی و همکاران

جدول ۸- مقادیر شاخص‌های آماری مدل برای بهره‌وری مصرف آب بر اساس عملکرد زیستی و عملکرد دانه چهار ژنوتیپ گندم نان با استفاده از مدل DSSAT-Nwheat

Table 8. Values of model statistical indices for water productivity based on biological yield and grain yield in the four bread wheat genotypes using DSSAT-Nwheat model.

رقم/لاین Cultivar/Line	بهره‌وری مصرف آب مبتنی بر Water productivity based on	RMSE	nRMSE	d	R ²	CRM
آراز Araz	عملکرد زیستی Biological yield	3.37	8.65	0.93	0.83	-0.08
	عملکرد دانه Grain yield	1.26	8.38	0.87	0.68	0.02
آرمان Arman	عملکرد زیستی Biological yield	3.06	7.76	0.89	0.95	-0.08
	عملکرد دانه Grain yield	0.93	6.05	0.69	0.86	-0.18
N-93-9	عملکرد زیستی Biological yield	2.82	7.37	0.91	0.83	-0.07
	عملکرد دانه Grain yield	0.71	4.70	0.80	0.72	0.02
تکتاز Taktaz	عملکرد زیستی Biological yield	2.32	6.08	0.91	0.68	-0.05
	عملکرد دانه Grain yield	0.67	4.75	0.99	0.77	0.01



شکل ۲- مقادیر شبیه‌سازی شده در مقابل مقادیر مشاهده شده برای بهره‌وری مصرف آب بر اساس عملکرد زیستی و عملکرد دانه چهار ژنوتیپ گندم نان.

Fig. 2. Simulated values versus observed values for water productivity based on biological yield and grain yield in the four bread wheat genotypes.

ناشی از اختلاف در تاریخ کاشت‌های مختلف بود به‌دست آمد. ارقام مورد مطالعه در این پژوهش جدیدترین ارقام معرفی شده توسط مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر برای اقلیم گرم و مرطوب شمال کشور از جمله استان گلستان هستند و در طبقات بذری مختلف در حال تکثیر هستند و چند سال آینده نسبت قابل توجهی از سطح زیر کشت گندم را در استان گلستان به خود اختصاص خواهند داد. بنابراین به‌نظر می‌رسد نتایج این پژوهش برای تصمیم‌سازان بخش کشاورزی برای گسترش سطح زیر کشت ارقام مذکور می‌تواند بسیار مفید و کاربردی باشد.

نتیجه‌گیری کلی

نتایج این پژوهش به‌طور کلی نشان داد که مدل DSSAT-Nwheat با کارایی مناسبی قادر به شبیه‌سازی مراحل فنولوژی روز تا گلدهی ($R^2=0/94$, $d=0/98$, $nRMSE=1/3$) و روز تا رسیدگی ($R^2=0/99$, $d=0/99$, $nRMSE=1/2/4$) عملکرد دانه ($R^2=0/69$, $d=0/90$, $nRMSE=1/8$) عملکرد زیستی ($R^2=0/96$, $d=0/93$, $nRMSE=1/7/38$) و کارایی مصرف آب بر مبنای عملکرد دانه ($R^2=0/62$, $d=0/78$, $nRMSE=1/6/21$) و بر مبنای عملکرد زیستی ($R^2=0/75$, $d=0/73$, $nRMSE=1/7/53$) در چهار رقم آراز، آرمان، N-93-9 و تکتاز بود. این کارایی مناسب مدل تحت شرایط متفاوت اقلیمی که

منابع

1. Food and Agriculture Organization (FAO) 2019: Available <http://www.fao.org/faostat/en/#home>. Last accessed 2 May 2022.
2. Ghaffari, A. and Jalal Kamali, M. 2013. Wheat Productivity in Islamic Republic of Iran: Constraints and opportunities. p 98-11. In R. Paroda., S. Dasgupta., B. Mal., S.S Singh., M. L. Jat. and G. Singh (eds.) Proceedings of the Regional Consultation on Improving Wheat Productivity in Asia, Bangkok, Thailand.
3. Ahmadi, K., Abadzadeh, H., Hatami, F., Mohammadnia Afrozi, S., Esfandyaripour, A. and Abas Taghani, R. 2022. Agricultural Statistics in Crop Season 2019-2020. Publications Ministry of Jihad-e-Agriculture. Tehran, Iran. 89p. (In Persian)
4. Asseng, S., Ewert, F., Martre, P., Rötter, R.P., Lobell, D.B., Cammarano, D., Kimball, B., Ottman, M.J., Wall, G. and White, J.W. 2015. Rising temperatures reduce global wheat production. Nat. Clim. Chang. 5: 143.
5. IPCC. 2018. Global Warming of 1.5 °C: An IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5 °C Above Pre-industrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways, in the Context of Strengthening the Global Response to the Threat of Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty, Intergovernmental Panel on Climate Change. 616p.
6. Semenov, M.A. and Stratonovitch, P. 2013. Designing high-yielding wheat ideotypes for a changing climate. Food Energy Secur. 2: 185-196.
7. Farooq, M., Bramley, H., Palta, J.A. and Siddique, K.H. 2011. Heat stress in wheat during reproductive and grain-filling phases. Crit. Rev. Plant. Sci. 30: 491-507.
8. Farooq, M., Hussain, M. and Siddique, K. H. 2014. Drought stress in wheat during flowering and grain-filling periods. Crit. Rev. Plant. Sci. 33: 331-349.
9. Andarzian, B., Hoogenboom, G., Bannayan, M., Shirali, M. and Andarzian, B. 2015. Determining optimum sowing date of wheat using CSM-CERES-Wheat model. J. Saudi. So. Agric. Sci. 14: 189-199.
10. Kalateh-Arabi, M., Sheikh, F., Soqi, H. and Hivehchie, J. 2011. Effects of sowing date on grain yield and its components of two bread wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars in Gorgan in Iran. Seed Plant Prod. J. 27: 285-296. (In Persian)

11. Soughi, H., Khodarahmi, M., Jafarby, J. and Nazari M. 2021. Yield Analysis of New Bread Wheat Cultivars Based on Agro-Climatic Indices under Different Sowing Dates in Gonbad. *J. Plant Prod.* 28: 1. 185-211. (In Persian)
12. Jones. 2019. Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) Version 4.7.5 (<https://DSSAT.net>). DSSAT Foundation, Gainesville, Florida, USA.
13. Basso, B., Liu, L. and Ritchie, J.T. 2016. A comprehensive review of the CERES-wheat,-maize and-rice models' performances. *Advan in agronomy.* 136: 27-132.
14. Oteng-Darko, P., Yeboah, S., Addy, S., Amponsah, S. and Danquah, E.O. 2013. Crop modeling: A tool for agricultural research—A review. *E3 J. Agric. Res. Dev.* 2: 1. 1-6.
15. Reynolds, M., Kropff, M., Crossa, J., Koo, J., Kruseman, G., Molero Milan, A. and Tonnang, H. 2018. Role of modelling in international crop research: overview and some case studies. *Agronomy.* 8: 12. 291.
16. Kassie, B.T., Asseng, S., Porter, C.H. and Royce, F.S. 2016. Performance of DSSAT-Nwheat across a wide range of current and future growing conditions. *Eur. J. Agron.* 81: 27-36.
17. Hoogenboom, G., Porter, C., Shelia, V., Boote, K., Singh, U., White, J., Hunt, L., Ogoshi, R., Lizaso, J. and Koo, J. 2017. Decision support system for agrotechnology transfer (DSSAT) version 4.7 (<https://DSSAT.net>). DSSAT Foundation, Gainesville, Florida. USA.
18. Jones. 2019. Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) Version 4.7.5 (<https://DSSAT.net>). DSSAT Foundation, Gainesville, Florida, USA.
19. Rauff, K.O. and Bello, R. 2015. A review of crop growth simulation models as tools for agricultural meteorology. *Agric. Sci.* 6: 1098.
20. White, J.W., Hoogenboom, G., Kimball, B.A. and Wall, G.W. 2011. Methodologies for simulating impacts of climate change on crop production. *Field Crop Res.* 124: 357-368.
21. Hussain, J., Khaliq, T., Ahmad, A. and Akhtar, J. 2018. Performance of four crop model for simulations of wheat phenology, leaf growth, biomass and yield across planting dates. *PloS one* 13, e0197546.
22. Zheng, Z., Cai, H., Yu, L. and Hoogenboom, G. 2017. Application of the CSM-CERES-Wheat Model for yield prediction and planting date evaluation at Guanzhong Plain in Northwest China. *Agron. J.* 109: 1. 204-217.
23. Mehrabi, F. and Sepaskhah, A.R. 2020. Winter wheat yield and DSSAT model evaluation in a diverse semi-arid climate and agronomic practices. *Inter. J. Plant Prod.* 14: 2. 221-243.
24. Fallah, M.H., Nezami, A., Khazaie, H.R. and Mahallati, M.N. 2021. Evaluation of DSSAT-Nwheat Model across a Wide Range of Climate Conditions in Iran. *J. Agroecol.* 12: 4. 561-580. (In Persian)
25. Saadati, Z., Delbari, M., Amiri, E., Panahi, M., Rahimian, M.H. and Ghodsi, M. 2016. Assessment of CERES-Wheat model in simulation of varieties of wheat yield under different irrigation treatments. *J. Water Soil Res. Conserv. (WSRCJ).* 5: 3. 73-85. (In Persian)
26. Mahru, A.H., Soltani, A., Galeshi, S. and Kalate-Arabi, M. 2010. Estimates of genetic coefficients and evaluation of model DSSAT for Golestan province. *Elec. J. Crop Prod.* 3: 2. 229-253. (In Persian)
27. Soltani, A. 2008. *Mathematical Modeling in Field Crops.* Ferdowsi University Press. Mashhad, Iran. 175p. (In Persian)
28. Yang, J., Yang, J.Y., Liu, S. and Hoogenboom, G. 2014. An evaluation of the statistical methods for testing the performance of crop models with observed data. *Agric. Syst.* 127: 81-89.
29. Elsheikh, A.H., Sharshir, S.W., Abd Elaziz, M., Kabeel, A., Guilan, W. and Haiou, Z. 2019. Modeling of solar energy systems using artificial neural network: A comprehensive review. *Solar Energy.* 180: 622-639.

30. Röhl, G., Memic, E. and Graeff-Hönninger, S. 2020. Implementation of an automatic time-series calibration method for the DSSAT wheat models to enhance multi-model approaches. *Agron. J.* 112: 3891-3912.
31. Ritchie, J.T., Singh, U., Godwin, D.C. and Bowen, W.T. 1998. Cereal growth, development and yield. In: Tsuji, G.Y., Hoogenboom, G. Thornton, P.K. (Eds.). *Understanding Options for Agricultural Production*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 79-98.
32. Jamieson, P., Porter, J. and Wilson, D. 1991. A test of the computer simulation model ARCWHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand. *Field Crop Res.* 27: 337-340.
33. Soltani, A., Hammer, G.L., Torabi, B., Robertson, M.J. and Zeinali, E. 2006. Modeling chickpea growth and development: phenological development. *Field Crop Res.* 99: 1-13.
34. Khalil Aghdam, A. 2019. Prediction of Phenology, Phyllochron and Leaf Area in Wheat (cv. Sardari). *J. Plant Prod.* 26: 2. 85-99. (In Persian)
35. Kiani, A., Koocheki, A.R., Nassiri Mahallati, M. and Banayan, M. 2004. CERES-Wheat model evaluation at two different climatic in Khorasan province, II Phenology and growth parameter simulation. *J. Desert.* 9: 125-142. (In Persian)
36. Sar, K. and Mahdi, S.S. 2019. Evaluation and Performance of CERES-Wheat DSSAT v4. 6 Model for Growth, Development and Yield in Southern Bihar. *Indian J. Ecol.* 46: 217-219.
37. Bannayan, M., Crout, N.M.J. and Hoogenboom, G. 2003. Application of the CERES-Wheat model for within-season prediction of winter wheat yield in the United Kingdom. *Agron J.* 95: 114-125.
38. Delghandi, M., Andarzian, B., Broomandnasab, S., Massah Bovani, A. and Javaheri, E. 2014. Valuation 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). *J. Water Soil.* 28: 1. 82-91. (In Persian)
39. Jing, Q., McConkey, B., Qian, B., Smith, W., Grant, B., Shang, J. and Luce, M.S. 2021. Assessing water management effects on spring wheat yield in the Canadian Prairies using DSSAT wheat models. *Agric. Water Manage.* 244: 106591.