Vol 28, No. 2, Summer 2026

University of Tehran Press

Journal of Crops Improvement

Online ISSN: 2345-6957

Homepage: https://jci.ut.ac.ir/

The parameterization and evaluation of the APSIM model to simulation of yield and phenological traits of some wheat, barley and triticale cultivars (Case study: Alborz province)

Sorayya Navid[1] | **Mohammadreza Jahansouz**[2]✉ | **Saeid Soufizadeh**[3]

1. Department of Agronomy and Plant Breeding, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: navid.sorayya@ut.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Agronomy and Plant Breeding, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: jahansuz@ut.ac.ir
3. Department of Agroecology, Environmental Sciences Research Institute, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. E-mail: s_soufizadeh@sbu.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 24 November 2025
Received in revised form
20 February 2026
Accepted 14 April 2026
Published online 22 June 2026

Keywords:
Calibration of model
Crop Models
Genetic coefficients
Model validation of model
Prediction of yield

ABSTRACT

Objective: This study aimed to parameterize and evaluate the APSIM-Wheat and APSIM-Barley sub-models for simulating the yield and phenological traits of wheat, barley, and triticale cultivars in Alborz Province, Iran.

Methods: Model inputs included soil, climatic, plant, and management data. A four-year experiment was conducted to collect the required information. For model parameterization and determination of genetic coefficients, two-year field experiments were performed using a randomized complete block design with 14 treatments (six barley, six wheat, and two triticale cultivars) and three replications—conducted at the Atomic Energy Organization farm (2014–2015) and the Faculty of Agriculture, University of Tehran (2016–2017). Genetic coefficients were identified from field data, and the model was locally calibrated. For model evaluation, farm sampling was carried out during the 2018–2019 and 2019–2020 growing seasons. Under real farming conditions (farmers' management), 30 barley and 30 wheat farms were selected across Alborz Province. A comprehensive questionnaire was used to collect information on farm history, planting, management, and harvesting operations, along with overall farm management practices. Soil and plant samples were also collected to assess crop growth status.

Findings: Simulation of flowering and physiological maturity stages using APSIM-Wheat and APSIM-Barley showed strong agreement between simulated and observed values across all wheat, barley, and triticale cultivars. The model predicted phenological traits with excellent quality and acceptable accuracy, with normalized root mean square error (nRMSE) values below 10%. In both experimental years, nRMSE values for grain and biological yield were below 5% for all cultivars. Additional evaluation metrics (CRM, D-index, and R^2) further confirmed the robustness of the sub-models. Agreement between simulated and observed traits was higher for triticale than for wheat and barley. Among barley cultivars, yield simulations showed better agreement than those for wheat cultivars.

Conclusions: The estimated genetic coefficients and APSIM sub-models can be reliably used to predict phenological dates and yields of the studied cultivars across diverse regions and environmental conditions — including varying moisture regimes, fertilizer levels, and sowing dates — without the need for time-consuming and costly field experiments.

Cite this article: Navid, S., Jahansouz, M., & Soufizadeh, S. (2026). The parameterization and evaluation of the APSIM model to simulation of yield and phenological traits of some wheat, barley and triticale cultivars (Case study: Alborz province). *Journal of Crops Improvement*, 28 (2), 151-168. DOI: https://doi.org/10.22059/jci.2026.406960.2964

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: https://doi.org/10.22059/jci.2026.406960.2964

دوره بیست و هشتم، شماره دوم، تابستان ۱۴۰۵

انتشارات دانشگاه تهران

به زراعی کشاورزی

شاپا الکترونیکی: ۶۹۵۷-۲۳۴۵

Homepage: https://jci.ut.ac.ir/

پارامتریابی و ارزیابی مدل اپسیم جهت شبیه‌سازی عملکرد و صفات فنولوژیک برخی از ارقام گندم، جو و تریتیکاله (مطالعه موردی: استان البرز)

ثریا نوید[۱] | محمدرضا جهانسوز[۲]✉ | سعید صوفی‌زاده[۳]

۱. گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: navid.sorayya@ut.ac.ir
۲. نویسنده مسئول، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: jahansuz@ut.ac.ir
۳. گروه کشاورزی اکولوژیک، پژوهشکده علوم محیطی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: s_soufizadeh@sbu.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقالهٔ پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۰۳
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۲/۰۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۱/۲۵
تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۴/۰۱

کلیدواژه‌ها:
اعتبارسنجی مدل
پیش‌بینی تولید
ضرایب ژنتیکی
کالیبراسیون مدل
مدل‌های زراعی

چکیده

هدف: پژوهش حاضر با هدف بررسی کارایی زیر مدل‌های اپسیم (APSIM-Wheat و APSIM-Barley) جهت برآورد میزان تولید و مراحل فنولوژیک برخی از ارقام گندم، جو و تریتیکاله در استان البرز انجام شد.

روش پژوهش: ورودی‌های زیر مدل‌های اپسیم داده‌های خاکی، اقلیمی، گیاهی و مدیریتی بودند که جهت ثبت اطلاعات مذکور آزمایشی چهار ساله در دو بخش مزرعه‌ای و میدانی انجام شد. جهت پارامتریابی مدل و تعیین ضرایب ژنتیکی ارقام موردمطالعه، آزمایشی دوساله در مزرعه سازمان انرژی اتمی (سال زراعی ۹۴-۱۳۹۳) و دانشکده کشاورزی دانشگاه تهران (سال زراعی ۹۶-۱۳۹۵) در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با ۱۴ تیمار (شش رقم جو، شش رقم گندم و دو رقم تریتیکاله) و سه تکرار انجام شد. با استفاده از داده‌های آزمایش مزرعه‌ای، ضرایب ژنتیکی ارقام شناسایی و مدل بر مبنای آن کالیبره/واسنجی شد. به‌منظور ارزیابی مدل، طی سال‌های زراعی ۱۳۹۷-۱۳۹۸ و ۱۳۹۸-۱۳۹۹ از مزارع کشاورزان نمونه‌برداری انجام شد. در شرایط واقعی کشت (مدیریت کشاورزان)، تعداد ۳۰ مزرعه جو و ۳۰ مزرعه گندم در استان البرز انتخاب گردید. از طریق پرسش‌نامه طیف گسترده‌ای از اطلاعات مشتمل بر تاریخچه مزرعه، عملیات کاشت، داشت، برداشت و چگونگی مدیریت مزرعه ثبت شد. هم‌چنین به‌منظور بررسی وضعیت رشد ارقام در مزارع انتخاب‌شده، از خاک و گیاه نمونه‌برداری شد.

یافته‌ها: نتایج شبیه‌سازی تاریخ گلدهی و بلوغ فیزیولوژیک با استفاده از زیر مدل‌های APSIM-Wheat و APSIM-Barley تطابق بسیار خوبی بین مقادیر شبیه‌سازی‌شده و مشاهده‌شده آزمایش در تمام ارقام موردمطالعه گندم، جو و تریتیکاله نشان داد و مدل توانست با دقت خیلی خوب (nRMSE<10%) تاریخ‌های فنولوژیک را پیش‌بینی کند. در هر دو سال آزمایش مقدار جذر میانگین مربعات نرمال‌شده (nRMSE)، برای صفات عملکردهای دانه و زیست‌توده گندم، جو و تریتیکاله کم‌تر از ۵ درصد بود، لذا مدل اپسیم توانست با دقت خیلی خوب مراحل عملکرد گیاهان را برآورد نماید. سایر شاخص‌های ارزیابی مدل (CRM، D-index و R^2) نیز کارایی زیر مدل‌های مذکور را با کیفیت خوب تأیید کردند. تطابق مقادیر شبیه‌سازی صفات فنولوژیکی و عملکردی ارقام تریتیکاله بیش‌تر از گیاهان گندم و جو بود. تطابق مقادیر شبیه‌سازی‌شده صفات عملکردی نیز در ارقام جو بیش‌تر از گندم بود.

نتیجه‌گیری: بنابر نتایج این بررسی، براساس ضرایب ژنتیکی به‌دست‌آمده، با استفاده از زیرمدل‌های اپسیم می‌توان تاریخ‌های فنولوژیک و عملکرد ارقام را در سطوح مختلف رژیم‌های رطوبتی، کودی، تاریخ کشت‌های مختلف و غیره، در شرایط اقلیمی کالیبره شده بدون اجرای آزمایش‌های زمان‌بر و پرهزینه برآورد نمود. در این راستا استفاده از مدل زراعی اپسیم در پیش‌بینی، سناریوسازی و اتخاذ تصمیم‌های مدیریتی می‌تواند راه‌گشا باشد.

استناد: نوید، ثریا؛ جهانسوز، محمدرضا و صوفی‌زاده، سعید (۱۴۰۵). پارامتریابی و ارزیابی مدل اپسیم جهت شبیه‌سازی عملکرد و صفات فنولوژیک برخی از ارقام گندم، جو و تریتیکاله (مطالعه موردی: استان البرز). *به‌زراعی کشاورزی*، ۲۸ (۲)، ۱۵۱-۱۶۸.
DOI: https://doi.org/10.22059/jci.2026.406960.2964

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

CC BY NC

۱. مقدمه

مدل‌های زراعی موجب افزایش درک کشاورزان و متخصصان از روابط موجود میان گیاه زراعی و محیط پیرامون و کمک به اتخاذ راه‌کارهای مدیریتی مناسب می‌گردند (کیتینگ و همکاران، ۲۰۲۴، اسنگ[1] و همکاران، ۲۰۱۵). مدل‌های زراعی را از این جهت که با استفاده از برخی معادلات به محاسبه سرعت و وضعیت رشد، نمو و تولید زیست‌توده گیاه در طول زمان (کاشت تا برداشت نهایی) می‌پردازند، جزو مدل‌های شبیه‌سازی می‌باشد (دانگ[2] و همکاران، ۲۰۱۴). پژوهش‌گران نیز گزارش کردند که مدل‌های شبیه‌سازی گیاهان زراعی ابزارهای مناسب در اتخاذ تصمیم‌گیری مناسب در سیستم‌های کشاورزی می‌باشند (دیوکتا[3] و همکاران، ۲۰۱۵؛ مارتین[4] و همکاران، ۲۰۱۴). مدل‌های شبیه‌سازی گیاهان زراعی که فرایندهای دخیل در رشد گیاه و تشکیل عملکرد را پیش‌بینی می‌کنند، با اهدافی مانند درک واکنش گیاهان زراعی به تغییرات اقلیمی و خاکی، ارزیابی صفات فیزیولوژیک در بهبود ژنتیکی عملکرد و کمک به تصمیم‌سازی در راستای بهینه‌سازی استفاده از منابع قابل‌دسترس مورداستفاده قرار می‌گیرند (میهرت[5] و همکاران، ۲۰۲۴). از طرفی، با توجه به محدودیت‌های زمانی در استفاده از آزمایش‌های مستقیم زراعی، استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی رشد برای برآورد عملکرد محصولات و هم‌چنین بهبود مدیریت بوم‌نظام‌های کشاورزی می‌تواند به صرفه‌جویی در زمان و هزینه منجر شود (هوکمن[6] و همکاران، ۲۰۱۷). بنابراین در سیستم‌های کشاورزی با توجه به این‌که عملکرد و بهره‌وری گیاهان بسته به شرایط محیطی و آب‌وهوایی متفاوت است، لذا مدل‌های مختلفی ازجمله اپسیم[7] برای تعیین عملکرد و بهینه‌سازی پتانسیل تولید توسعه یافته‌اند (ما[8] و همکاران، ۲۰۱۵).

مدل اپسیم، مدلی مکانیستیک که حاصل تلاش گروهی از متخصصان استرالیایی است که وضعیت یک مزرعه را از نظر شرایط خاکی و گیاهی با جزئیات مناسب و عملکرد و رشدونمو بیش از ۲۰ نوع گیاه را براساس بازه زمانی روزانه شبیه‌سازی کند (هوکمن[9] و همکاران، ۲۰۱۷). این مدل می‌تواند با کمک به بهبود مدیریت ازجمله انتخاب رقم مناسب، تعیین خصوصیات مطلوب گیاهی (تاریخ کشت و تراکم گیاهی)، مدیریت کود نیتروژن، پیش‌بینی اثر تغییر اقلیم بر رشد و عملکرد محصول، موجبات افزایش عملکرد واقعی گیاهان زراعی در اقلیم فعلی و تغییریافته را فراهم گرداند (دی وکتا[10] و همکاران، ۲۰۱۵). بنابراین با استفاده از مدل‌ها و با کمک آمار هواشناسی بلندمدت می‌توان رفتار گیاه را در شرایط بالقوه و تنش شبیه‌سازی نمود و نتایج آن را موردارزیابی قرارداد (رضایی[11] و همکاران، ۲۰۱۵).

پارامترهای مدل‌های بیوفیزیکی را می‌توان به‌عنوان کمیت‌هایی تعریف کرد که در ابتدای هر شبیه‌سازی ارزش‌دهی می‌شوند و در طی شبیه‌سازی تغییر نمی‌کنند (دونالتی[12] و کونفالونیری[13]، ۲۰۱۱). در مدل‌های شبیه‌سازی دو نوع پارامتر وجود دارد؛ پارامترهای گونه‌ای که برای همه ارقام یکسان بوده و دیگری ویژگی‌ها ژنتیکی که برای ارقام مختلف متفاوت می‌باشند (والچ[14] و همکاران، ۲۰۱۱). بسیاری از مدل‌های شبیه‌سازی رشد گیاهی از ضرایب ژنتیکی برای بیان صفات کلیدی ارقام

1. Asseng
2. Dong
3. Devkota
4. Martin
5. Mihret
6. Hochman
7. APSIM
8. Ma
9. Hochman
10. Devkota
11. Rezaei
12. Donateli
13. Confalonieri
14. Wallach

مختلف استفاده می‌کنند. ویژگی‌های ژنتیکی بیانگر این موضوع می‌باشند که این ضرایب مربوط به ژنتیک گیاه بوده و محیط بر روی آن‌ها تأثیری نداشته و تغییر آن‌ها در دامنه خاص خود می‌باشند. این ضرایب به‌طورکلی بیان می‌کنند که چگونه یک رقم خاص به فاکتورهای محیطی پاسخ می‌دهند. با تعیین این ضرایب می‌توان زیرمدل‌های اپسیم را برای شرایط خاص منطقه‌ای بومی‌سازی نمود و به‌عنوان ابزار مدیریتی مناسب، در اختیار برنامه‌ریزان و سیاست‌گذاران قرار داد.

با وجود اهمیت و جایگاه رهیافت مدل‌سازی در ارزیابی میزان تولید و بررسی اثر عوامل مختلف بر میزان تولیدات کشاورزی که مستلزم پایش عوامل ژنتیکی، محیطی و مدیریتی، کمّی‌کردن تأثیر آن‌ها، پیش‌بینی عملکرد قابل‌برداشت و درنهایت آنالیز خلأ عملکرد است، اما استفاده از این دسته از مدل‌ها در ایران چندان موردتوجه جدی قرار نگرفته است. بدین منظور، پژوهش حاضر بر روی گیاهان زراعی گندم[1] و جو[2] که به‌عنوان محصولات استراتژیک نقش مهمی در امنیت غذایی مردم ایران بر عهده دارند انجام شد. گیاه دومنظوره (علوفه و دانه‌ای) تریتیکاله[3] نیز از معدود گیاهانی است که کم‌توقع بوده و در شرایط خشکی، شوری و اراضی حاشیه‌ای عملکرد بالایی تولید می‌کند (ژو[4]، ۲۰۱۸). بنابراین، با توجه به قدرت تحمل بالای گیاه تریتیکاله در مواجهه با تنش‌های محیطی غالب در کشور شامل خشکی، شوری و غیره و هم‌چنین ارزش علوفه‌ای و دانه‌ای آن، لزوم توجه به این گیاه و گنجاندن آن در برنامه الگوی کشت کشور در شرایط تغییر اقلیم به‌عنوان استراتژی سازگاری، می‌تواند باعث پایداری و افزایش تولید در منطقه شود. در این راستا، آزمایش حاضر با هدف بررسی کارایی مدل اپسیم جهت برآورد ظرفیت تولید بالقوه و پیش‌بینی مراحل فنولوژیک ارقام گندم، جو و تریتیکاله، در استان البرز انجام شد.

۲. پیشینهٔ پژوهش

مدل‌سازی گیاهان زراعی یکی از شاخه‌های زراعت و فیزیولوژی گیاهان زراعی است که تاریخچه پیدایش بسیاری از مدل‌های زراعی به دهه ششم قرن بیستم برمی‌گردد. مدل‌های زراعی موجب افزایش درک کشاورزان و متخصصان از روابط موجود میان گیاه زراعی و محیط پیرامون و کمک به اتخاذ راه‌کارهای مدیریتی مناسب می‌گردند (اسنگ[5] و همکاران، ۲۰۱۵). به‌منظور ساخت مدل‌های شبیه‌سازی گیاهان به دانش‌های علوم مختلف نظیر هواشناسی کشاورزی، فیزیک خاک، شیمی خاک، فیزیولوژی گیاهان زراعی نیاز است که تلفیق این علوم درنهایت منجر به ساخت یک مدل در قالب معادلات و روابطی به زبان ریاضی خواهد شد که از این معادلات می‌توان در پیش‌بینی رشد، نمو و عملکرد استفاده نمود. مدل‌های زراعی را از این جهت که با استفاده از برخی معادلات به محاسبه سرعت و وضعیت رشد، نمو و تولید زیست‌توده گیاه در طول زمان می‌پردازند، جزء مدل‌های شبیه‌سازی می‌دانند (کومار[6] و همکاران، ۲۰۲۳).

اپسیم، یک مدل شبیه‌ساز فرایندگرای گیاه و سیستم‌های زراعی است که توسط متخصصان استرالیایی ساخته شده است (برایک[7] و کیبد[8]، ۲۰۲۱). پژوهش‌گران گزارش کردند که رشدونمو گیاه زراعی در مدل اپسیم به‌وسیله ضرایب مختلفی کنترل می‌شوند (جدول ۱) که با تعیین این ضرایب برای ارقام مختلف گیاهان می‌توان از زیرمدل‌های آن به‌عنوان ابزار پیش‌بینی در اتخاذ تصمیم‌های مدیریتی و سیاستی بهره جست (میهرت[9] و همکاران، ۲۰۲۴).

1. *Triticum aestivum* L.
2. *Hordeum vulgar* L.
3. *Triticosecale wittmack*
4. Zhu
5. Asseng
6. Kumar
7. Briak
8. Kebede
9. Mihret

اپسیم مدلی مکانیستیکی بوده که وضعیت یک مزرعه را از نظر شرایط خاکی و گیاهی با جزئیات مناسب شبیه‌سازی کرده و می‌تواند رشدونمو گیاهان مختلف ازجمله گندم و جو را شبیه‌سازی کند (کانفالونیری[1] و همکاران، ۲۰۲۳). این مدل می‌تواند با کمک به بهبود مدیریت در زمینه‌های مختلف، ازجمله انتخاب رقم مناسب، تعیین ویژگی‌های مطلوب گیاهی (تاریخ کشت، تراکم گیاهی)، مدیریت کود نیتروژن، پیش‌بینی اثر تغییراقلیم بر رشد و عملکرد محصول، موجبات افزایش عملکرد واقعی گیاهان زراعی در اقلیم فعلی و تغییریافته را فراهم گرداند (ژانگ[2] و همکاران، ۲۰۲۵).

جدول ۱. ضرایب ژنتیکی ارقام گندم و جو در مدل APSIM

پارامتر	تعریف	مقدار
Vern	حساسیت به ورنالیزاسیون: بسیاری از ارقام گندم و جو به‌ویژه انواع زمستانه برای گذار از رشد رویشی به رشد زایشی به یک دوره دمای پایین نیاز دارند. این پارامترها میزان سرمای موردنیاز و نحوه واکنش گیاه به آن را کنترل می‌کنند.	۱–۰: رقم بهاره (نیاز کم یا بدون نیاز به ورنالیزاسیون) ۲/۵–۱: رقم حدواسط یا اختیاری (نیاز متوسط) ۵–۳: نیاز شدید به ورنالیزاسیون (رقم زمستانه)
Photo	ضریب حساسیت به طول روز: میزان واکنش‌پذیری یک محصول زراعی به طول روز (تعداد ساعات روشنایی) در طول دوره رشد، به‌ویژه پیش از گل‌دهی.	۱–۰: حساسیت کم یا بدون حساسیت (ارقام بهاره) ۲–۱: حساسیت متوسط (گندم‌های حدواسط/اختیاری) ۴–۲: حساسیت زیاد (گندم‌های زمستانه) ۲–۰/۵: حساسیت کم تا متوسط (اکثر ارقام جو)
tt_end_of_juvenile (°C·day)	زمان حرارتی موردنیاز (درجه– روز): بسته به ژنوتیپ و شرایط محیطی متفاوت است. معیاری است که مقدار واحدهای حرارتی تجمع‌یافته موردنیاز برای پیشرفت گیاه از مرحله سبزشدن تا پایان مرحله نونهالی (نوجوانی) را تعیین می‌کند.	گندم: ۰ تا ۱۲۰ درجه –روز گندم بهاره: معمولاً ۸۰ تا ۱۰۰ درجه –روز گندم زمستانه: ۹۰ تا ۱۲۰ درجه –روز جو: ۴۰ تا ۱۰۰ درجه –روز
tt_floral initiation (°C·day)	زمان حرارتی مورد نیاز (درجه– روز): زمان حرارتی موردنیاز برای رسیدن گیاه به مرحله آغازش گل (شروع تشکیل اندام‌های گل) است که به‌شدت به زودرسی رقم و حساسیت آن به طول روز بستگی دارند.	گندم: ۲۰۰ تا ۳۵۰ درجه –روز گندم بهاره: معمولاً ۲۲۰ تا ۳۰۰ درجه –روز گندم زمستانه: ۲۵۰ تا ۳۵۰ درجه –روز جو: ۱۵۰ تا ۳۰۰ درجه –روز
tt_flowering (°C·day)	مقدار زمان حرارتی موردنیاز از مرحله آغازش گل تا گل‌دهی	گندم: ۳۵۰ تا ۵۰۰ درجه –روز گندم بهاره: ۳۵۰ تا ۴۵۰ درجه –روز گندم زمستانه: ۴۰۰ تا ۵۰۰ درجه –روز جو: ۳۰۰ تا ۴۵۰ درجه –روز
tt_start_grain_fill (°C·day)	زمان حرارتی موردنیاز از مرحله گل‌دهی تا آغاز پرشدن دانه.	گندم: ۸۰ تا ۱۲۰ درجه –روز جو: ۶۰ تا ۱۰۰ درجه –روز
tt_end grain_fill (°C·day)	زمان حرارتی موردنیاز از آغاز پر شدن دانه تا زمانی‌که دانه‌ها به رسیدگی فیزیولوژیک برسند.	گندم: ۳۵۰ تا ۵۰۰ درجه –روز جو: ۳۰۰ تا ۴۵۰ درجه –روز
tt_statt_gh_mat (°C·day)	زمان حرارتی موردنیاز از آغاز پرشدن دانه تا رسیدگی فیزیولوژیک.	گندم: ۲۰۰ تا ۳۵۰ درجه –روز جو: ۱۵۰ تا ۳۰۰ درجه –روز
grain_per_gram_stem (grains g^{-1} stem)	تعداد دانه‌های تولیدشده به‌ازای هر گرم ماده خشک ساقه در زمان گل‌دهی.	گندم: ۲۰ تا ۳۵ دانه به ازای هر گرم ساقه جو: ۱۸ تا ۳۰ دانه به ازای هر گرم ساقه تریتیکاله: ۲۲ تا ۳۵ دانه به ازای هر گرم ساقه
potential_grain_growth_rate (mg $grain^{-1}$ day^{-1})	حداکثر سرعتی که هر دانه می‌تواند تحت شرایط بدون محدودیت، ماده خشک را انباشته کند.	گندم: ۱/۲ تا ۲/۲ میلی‌گرم به ازای هر دانه در روز جو: ۱/۰ تا ۱/۸ میلی‌گرم به ازای هر دانه در روز تریتیکاله: ۱/۵ تا ۲/۳ میلی‌گرم به ازای هر دانه در روز
max grain size	حداکثر وزن خشک بالقوه یک دانه (میلی‌گرم به‌ازای هر دانه) که یک رقم می‌تواند به آن دست یابد. این یک صفت ژنتیکی است که حد بالای وزن دانه را در شرایط ایده‌آل تعیین می‌کند.	گندم: ۳۵ تا ۵۵ گرم جو: ۳۰ تا ۴۵ گرم تریتیکاله: ۴۵ تا ۶۰ گرم

1. Confalonieri
2. Zhang

پژوهش‌گران طی بررسی کارایی شش مدل گیاهی (APSIM-Wheat، APSIM-Nwheat، CAT-Wheat، CropSyst، OLEARY-CONNOR و SALUS)، برای پیش‌بینی عملکرد گندم در شرایط تغییر اقلیم گزارش کردند که همه مدل‌ها قادر به پیش‌بینی با دقت مناسب بودند (اولری[1] و همکاران، ۲۰۱۵). برخی دیگر از پژوهش‌گران با استفاده از مدل اپسیم اثرات تاریخ‌های کاشت متغیر را بر آبشویی نیتروژن غلات زمستانه را بررسی کردند (وگلر[2] و همکاران، ۲۰۲۰). گایدون[3] و همکاران (۲۰۱۷)، طی ارزیابی مدل اپسیم در پیش‌بینی سیستم‌های زراعی آسیا گزارش کردند که این مدل می‌تواند یکی از بهترین ابزارهای مدیریتی محسوب شود و می‌تواند در ارزیابی اثر عوامل اقلیمی (تغییرات دما، بارش و غلظت دی‌اکسیدکربن) و مدیریتی (استفاده از عناصر و کودهای مختلف و آب) بر تولیدات محصولات زراعی نقش به‌سزایی ایفا کند. ژائو[4] و همکاران (۲۰۱۴) طی بررسی حساسیت و تأثیر عوامل ژنتیکی (رقم)، محیطی و مدیریتی بر عدم قطعیت آنالیزهای مدل اپسیم در استرالیا گزارش کردند که ارقام مختلف یک گیاه ممکن است در شرایط مختلف آب‌وهوایی و رشدی پاسخ‌های متفاوتی نشان دهند و در بین شاخص‌های موردمطالعه، عملکرد دانه و مراحل فنولوژیک گندم نسبت به ضرایب ژنتیکی بسیار حساس بودند، لذا برای کاهش خطا و عدم قطعیت مدل که ناشی از ضرایب ژنتیکی رقم است، بایستی مدل برای ارقام جدید و شرایط آب‌وهوایی مختلف کالیبره شود.

۳. روش‌شناسی پژوهش

برای پارامتریابی و تعیین ضرایب ژنتیکی ارقام و هم‌چنین ارزیابی مدل، نیاز به داده‌های هواشناسی، خاکی، گیاهی و مدیریتی بود که به این منظور تحقیقی چهارساله، در دو بخش مزرعه‌ای و میدانی انجام شد.

۳. ۱. پارامتریابی زیرمدل‌های اپسیم

جهت پارامتریابی (کالیبراسیون) زیر مدل‌های APSIM-Wheat و APSIM- Barley، ابتدا ورودی‌های زیر مدل‌های مزبور که داده‌های اقلیمی، خاکی، گیاهی و مدیریتی بود، از طریق اجرای آزمایش‌های مزرعه‌ای و میدانی ثبت شد. بدین منظور آزمایش‌های مزرعه‌ای دو ساله در مزرعه سازمان انرژی اتمی (سال زراعی ۹۴-۱۳۹۳) و مزرعه آموزشی- پژوهشی دانشکده کشاورزی دانشگاه تهران (سال زراعی ۹۶-۱۳۹۵)، واقع در کرج انجام شد (جدول ۲).

آزمایش‌ها به‌صورت طرح بلوک‌های کامل تصادفی با ۱۴ تیمار (شش رقم جو، شش رقم گندم و دو رقم تریتیکاله) و سه تکرار انجام شدند (جدول ۳). از متغیرهای دماهای کمینه و بیشینه، بارش و تشعشع استان در بازه زمانی ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۰ به‌عنوان ورودی اقلیمی مدل استفاده شد. در سال دوم آزمایش دماهای کمینه، بیشینه و حداقل دمای مطلق منطقه در طول فصل رشد گیاهان نسبت به سال اول آزمایش کم‌تر و میزان بارش‌ها و مجموع تعداد روزهای یخبندان منطقه بیش‌تر بود که عمده بارش‌ها در سال دوم به‌صورت برف و تگرگ اتفاق افتاد که در میزان تولید و مراحل فنولوژیک ارقام تأثیرگذار بود (جدول ۴). پایه عمق نفوذ ریشه نیز در سه عمق مختلف و از پنج نقطه مزرعه نمونه‌برداری خاک صورت گرفت. براساس نتیجه تجزیه خاک، بافت خاک مزرعه‌های آزمایشی لوم شنی رسی بود (جدول ۵).

1. Oleary
2. Vogeler
3. Gaydon
4. Zhao

جدول ۲. مختصات جغرافیایی مزارع موردمطالعه در آزمایش‌های زراعی

آزمایش	طول جغرافیایی (درجه)	عرض جغرافیایی (درجه)	ارتفاع از سطح دریا (متر)
۱۳۹۳–۹۴	۳۵/۸۴	۵۱/۳۰	۱۲۹۷
۱۳۹۵–۹۶	۳۵/۸۰	۵۰/۵۷	۱۳۱۲

جدول ۳. ارقام موردمطالعه در تحقیق حاضر

گیاه	رقم	گیاه	رقم	گیاه	رقم
گندم	پیشگام (شاهد و غالب در منطقه) بهار، پارسی، پیشتاز، سیروان سیوند (مناسب کشت منطقه)	جو	بهمن، ریحان و یوسف (شاهد و غالب در منطقه) فجر ۳۰ و ریحان ۰۳ (مناسب کشت منطقه) رودشت (رقم اصلاح‌شده با دانش هسته‌ای)	تریتیکاله	جوانیلو و سناباد (مناسب کشت منطقه)

جدول ٤. اطلاعات هواشناسی مزرعه‌های موردمطالعه در طول فصل رشد

سال	متغیرهای اقلیمی	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	طول رشد
۱۳۹۳–۹۴	دمای کمینه روزانه (درجه سانتی‌گراد)	۱۱/۱	۴/۵	۲/۵	−۰/۲	۲/۲	۰/۷	۸/۰	۱۲/۴	۱۷/۵	۲۰/۸	۶/۵
	دمای بیشینه روزانه (درجه سانتی‌گراد)	۲۴/۸	۱۴/۹	۱۰/۵	۹/۸	۱۱/۹	۱۲/۸	۱۹/۴	۲۷/۵	۳۴/۰	۳۷/۲	۱۸/۴
	متوسط دمای روزانه (درجه سانتی‌گراد)	۱۸/۰	۹/۷	۶/۵	۴/۸	۷/۰	۶/۸	۱۳/۷	۲۰/۰	۲۵/۸	۲۹/۰	۱۲/۵
	حداقل دمای مطلق روزانه (درجه سانتی‌گراد)	۵/۴	−۱/۰	−۲/۲	−۷/۲	−۴/۹	−۵/۹	۰/۲	۳/۶	۱۱/۰	۱۴/۱	−۰/۱
	مجموع بارش (میلی‌متر)	۵/۰	۲۱/۵	۲۶/۱	۷/۶	۱۶/۹	۱۸/۸	۳۵/۲	۲/۰	۷/۰	۳/۰	۱۴۰/۱
	تعداد روزهای یخبندان	۰/۰	۱/۰	۴/۰	۱۳/۰	۷/۰	۱۲/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۳۷/۰
۱۳۹۵–۹۶	دمای کمینه روزانه (درجه سانتی‌گراد)	۱۱/۵	۷/۲	−۱/۷	−۰/۲	−۱/۶	۲/۱	۷/۸	۱۲/۸	۱۶/۴	۱۹/۶	۶/۹
	دمای بیشینه روزانه (درجه سانتی‌گراد)	۲۵/۸	۱۹/۳	۸/۶	۹/۲	۶/۱	۱۳/۴	۱۷/۸	۲۶/۶	۳۳/۰	۳۵/۷	۱۸/۹
	متوسط دمای روزانه (درجه سانتی‌گراد)	۱۸/۶	۱۳/۳	۳/۵	۴/۵	۲/۲	۷/۷	۱۲/۸	۱۹/۷	۲۴/۷	۲۷/۷	۱۲/۹
	حداقل دمای مطلق روزانه (درجه سانتی‌گراد)	۴/۹	۱/۱	−۱۱/۰	−۴/۷	−۷/۶	−۶/۹	−۰/۴	۳/۳	۱۱/۲	۱۴/۹	۰/۰
	مجموع بارش (میلی‌متر)	۰/۰	۳/۲	۵/۰	۳۹/۰	۴۴/۸	۱۹/۹	۳۷/۴	۵۳/۹	۰/۰	۰/۸	۲۰۲/۰
	تعداد روزهای یخبندان	۰/۰	۰/۰	۲۰/۰	۱۷/۰	۱۹/۰	۱۰/۰	۱/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۶۷/۰

جدول ۵. اطلاعات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه‌های موردمطالعه

سال	عمق (سانتی‌متر)	شوری (دسی‌زیمنس بر متر)	اسیدیته (میلی اکی‌والان در کیلوگرم)	فسفر (میلی اکی‌والان در کیلوگرم)	پتاسیم (میلی اکی‌والان در کیلوگرم)	نیتروژن (درصد)	کربن آلی (درصد)	وزن مخصوص ظاهری (گرم در سانتی‌متر مکعب)	شن (درصد)	رس (درصد)	سیلت (درصد)	بافت
۱۳۹۴–۹۵	۰–۳۰	۱/۴	۷/۸	۱۷/۳	۳۵۳/۰	۰/۰۶	۱/۱	۱/۳	۶۱/۶	۲۴/۱	۱۴/۳	لوم شنی رسی
	۳۰–۶۰	۱/۲	۷/۸	۱۵/۲	۳۳۳/۰	۰/۰۳	۰/۹	۱/۶	۶۲/۲	۲۲/۲	۱۵/۶	لوم شنی رسی
	۳۰–۹۰	۱/۳	۷/۸	۱۳/۵	۲۸۹/۰	۰/۰۳	۰/۸	۱/۳	۶۲/۲	۲۲/۲	۱۵/۶	لوم شنی رسی
۱۳۹۵–۹۶	۰–۳۰	۲/۷	۸/۴	۲۱/۲	۲۹۲/۰	۰/۰۷	۱/۹	۱/۳	۲۸/۰	۳۳/۰	۳۹/۰	لوم شنی رسی
	۳۰–۶۰	۳/۰	۸/۳	۱۸/۳	۲۸۱/۰	۰/۰۴	۰/۴	۱/۳	۲۶/۰	۳۴/۰	۴۰/۰	لوم شنی رسی
	۳۰–۹۰	۱/۵	۸/۴	۱۷/۳	۲۵۴/۰	۰/۰۴	۰/۲	۱/۱	۲۶/۰	۴/۰	۴۰/۰	لوم شنی رسی

در هر دو سال آزمایش برای عملیات آماده‌سازی زمین، ابتدا خاک دیسک‌زنی و تسطیح شد و سپس با استفاده از فاروئر جوی و پشته‌ها احداث گردید. هر واحد آزمایشی دارای ۱۲ خط کاشت به طول شش متر با فاصله ۱۵/۵ سانتی‌متر و فاصله حدود ۱/۵ سانتی‌متر روی ردیف بود. سایر اطلاعات مدیریتی و زراعی مزرعه‌های موردمطالعه در قالب جدول (۶) ارائه شده است.

جدول ٦. اطلاعات مدیریتی و زراعی مزرعه‌های موردمطالعه

پارامتر مدیریتی	شرایط بهینه
عملیات آماده‌سازی زمین	نیمه دوم شهریورماه
تاریخ کشت	سال اول آزمایش ۲۳ مهرماه و سال دوم اواسط آبان‌ماه (۱۵ آبان)، به‌صورت دستی
روش کاشت	دستی و هیرم‌کاری
تراکم کشت	۴۰۰ (بوته در متر مربع)
مقدار کود مصرفی پایه	۱۵۰ اوره، ۱۰۰ فسفات آمونیوم و ۱۰۰ سوپر فسفات تریپل (کیلوگرم در هکتار)
مقدار کود مصرفی سرک	۱۵۰ کود اوره کیلوگرم در هکتار (در اوایل ساقه‌دهی)
کل نتیروژن مصرفی	۱۳۸ (کیلوگرم در هکتار)
روش آبیاری	غرقابی
تعداد دور آبیاری	۷ بار (خاک‌آب، سبز آب، پنج آب، ساق آب، خوشه آب، گل آب، دان‌آب)
کل حجم آبیاری	۳۸۰۰ (متر مکعب در هکتار)
روش کنترل علف‌های هرز	وجین دستی
معیار رسیدگی فیزیولوژیک	سخت و سفت شدن بذور و طلایی‌رنگ شدن بیش از ۵۰ درصد بوته‌ها
تاریخ برداشت	یک هفته پس از رسیدگی فیزیولوژیک
تاریخ رسیدگی فیزیولوژیک	سال اول آزمایش ۲۷ خردادماه و سال دوم آزمایش در ۱۵ تیرماه

در انتهای فصل رشد یک هفته پس از رسیدگی فیزیولوژیک تمامی ارقام موردمطالعه، از چهار ردیف وسط هر واحد آزمایشی حدود یک متر از سطح خاک کف‌بر شده و بلافاصله به آزمایشگاه منتقل گردید. بوته‌های موردنظر جهت اندازه‌گیری وزن خشک به‌مدت ۴۸ ساعت در آون با دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند و درنهایت با ترازوهای دیجیتالی عملکرد زیستی و عملکرد دانه ارقام توزین گردیدند. در نهایت، در پژوهش حاضر مدل برای ۱۴ رقم با توجه به اطلاعات جمع‌آوری‌شده از آزمایش مزرعه‌ای واسنجی شد. بدین منظور با استفاده از روش آزمون‌وخطا که یک روش مرسوم برای تعیین ضرایب ژنتیکی محسوب می‌شود، ابتدا صفات فنولوژیک و در سپس عملکرد ارقام برآورد شد (چن[1] و همکاران، ۲۰۱۰). روز تا گلدهی، روز تا رسیدگی فیزیولوژیک و عملکردهای دانه و زیستی صفاتی بودند که از آن‌ها برای ارزیابی مدل استفاده شد.

۳. ۲. ارزیابی زیرمدل‌های اپسیم

جهت ارزیابی مدل اپسیم در شرایط واقعی (مدیریت مزرعه توسط کشاورزان)، از داده‌های آزمایش‌های میدانی استفاده شد. به‌منظور جمع‌آوری داده‌های خاکی، گیاهی و مدیریتی در شرایط واقعی، تعداد ۳۰ مزرعه جو و ۳۰ مزرعه گندم در شهرستان نظرآباد واقع در استان البرز (تنکمان، احمدآباد، نجم‌آباد، خرم‌آباد و گازورسنگ)، انتخاب و در سال‌های زراعی ۹۸-۱۳۹۷ و ۹۹-۱۳۹۸ اقدام به تکمیل پرسش‌نامه و نمونه‌برداری گیاهی و خاکی شد. در بخش پرسش‌نامه نیز اقدام به جمع‌آوری طیف گسترده‌ای از اطلاعات مشتمل بر تاریخچه مزرعه، عملیات کاشت، داشت و برداشت و چگونگی مدیریت مزرعه شد. هم‌چنین

1. Chen

به‌منظور بررسی وضعیت رشد ارقام در مزارع انتخاب‌شده، از خاک و گیاه نمونه‌برداری شد. اندازه‌گیری‌های مربوط به خاک عبارتند از بافت خاک (درصد رس، سیلت و شن)، جرم مخصوص ظاهری، ضریب نگهداری آب در خاک، اسیدیته، ظرفیت تبادل کاتیونی، میزان ماده آلی، قابلیت هدایت الکتریکی و غلظت‌های نیتروژن معدنی، فسفر و پتاسیم. اندازه‌گیری‌های گیاهی نیز شامل یادداشت‌برداری‌های مراحل اصلی فنولوژیکی در گیاه (سبزشدن، گلدهی و برداشت نهایی) و وزن خشک اندام هوایی به تفکیک هر اندام بودند. به این منظور، نمونه‌برداری‌های تخریبی از دو مرحله مهم گلدهی و برداشت نهایی، صورت گرفت. در هر یک از مراحل نمونه‌برداری، یک مترمربع از هر زمین برداشت و به آزمایشگاه منتقل گردید و همانند بخش زراعی اندازه‌گیری‌های لازم صورت گرفت.

مقایسه بین نتایج شبیه‌سازی‌شده با مقادیر مشاهده‌شده جهت تعیین صحت مدل، مهم‌ترین و حیاتی‌ترین گام در بررسی کارایی مدل می‌باشد (اندرزیان[1] و همکاران، ۲۰۱۱). برای ارزیابی کارکرد مدل، می‌باید نتایج شبیه‌سازی‌شده توسط مدل با داده‌های مشاهده‌شده (واقعی) که از آزمایش‌ها به‌دست آمده‌اند، مقایسه شوند تا میزان صحت و اعتبار مدل سنجیده شود. بدین منظور با استفاده از داده‌های آزمایش سال اول مدل واسنجی گردید. پس از آن مدل برای سال دوم اجرا و مراحل رشد، نمو و عملکرد گیاهان زراعی موردمطالعه شبیه‌سازی شد، سپس نتایج شبیه‌سازی‌شده با داده‌های مشاهده‌شده مقایسه و اعتبار مدل با آزمون‌های آماری و رگرسیونی ارزیابی شد. در این آزمایش عملکردهای دانه و زیستی، تاریخ گلدهی و تاریخ رسیدگی فیزیولوژیک به‌عنوان صفات موردارزیابی برای اعتبارسنجی مدل APSIM در نظر گرفته شدند. برای این منظور از ضریب تبیین[2] (R^2) و سایر شاخص‌های ارزیابی مدل استفاده شد (جدول ۷).

جدول ۷. شاخص‌های مورد هدف برای ارزیابی مدل APSIM

شاخص	رابطه
رابطه ۱) *nRMSE*[3] درصد تفاوت نسبی بین مقادیر مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده نسبت به میانگین داده‌های مشاهده‌شده را نشان می‌دهد (بنایان[4] و همکاران، ۲۰۰۹).	$nRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(E_i - M_i)^2}{n}} \times \frac{100}{M}$
رابطه ۲) *CRM*[5]، شاخصی است که بیش‌تر[6] یا کم‌تر[7] بودن مقادیر شبیه‌سازی شده توسط مدل را نسبت به مقادیر مشاهده‌شده یا واقعی نشان می‌دهد. منفی‌بودن این شاخص به معنای بیش‌تربودن و مثبت بودن آن به معنای کم‌تربودن مقادیر شبیه‌سازی‌شده از مقادیر مشاهده‌شده است (لاگو[8] و گرین[9]، ۱۹۹۱).	$CRM = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} E_i}{\sum_{i=1}^{n} M_i}$
رابطه ۳) D-index شاخص تطابق بوده و چنانچه مقادیر شبیه‌سازی‌شده برابر با مقادیر مشاهده‌شده باشد، مقدار D-index=1[10] و اگر مقادیر شبیه‌سازی‌شده برای تمامی داده‌ها برابر با میانگین داده‌های مشاهده‌شده باشد، مقدار D-index=0 خواهد بود (ویلموت[11]، ۱۹۸۲).	$D-index = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(E_i - M_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(\lvert E_i - \bar{M}\rvert + \lvert M_i - \bar{M}\rvert)^2}$

در روابط بالا، *Ei* و *Mi* مقادیر شبیه‌سازی‌شده و مشاهده‌شده، *n* تعداد مشاهدات و *M* میانگین داده‌های مشاهده‌شده می‌باشند.

1. Andarzian
2. Coefficient of Determination
3. Normalized Root Mean Square Error
4. Bannayan
5. Coefficient of Residual Mass
6. Overestimation
7. Underestimation
8. Loague
9. Green
10. Agreement Index
11. Willmott

۴. یافته‌های پژوهش

۴. ۱. پارامتریابی و ارزیابی زیرمدل‌های اپسیم برای شبیه‌سازی تاریخ‌های فنولوژیک

نتایج پارامتریابی و ارزیابی زیرمدل‌های اپسیم نشان داد که در گیاه جو در سال اول آزمایش مقدار شاخص ضریب جرمی خطا (CRM) برای شبیه‌سازی تاریخ گلدهی و رسیدگی فیزیولوژیک مثبت (برآورد کم‌تر مدل نسبت به مقادیر مشاهده‌شده) و در سال دوم منفی (برآورد بیش‌تر مدل نسبت به مقادیر مشاهده‌شده) بود (جدول‌های ۸ و ۹، شکل ۱). درخصوص پارامتریابی مدل برای تاریخ گلدهی گیاهان گندم و تریتیکاله نتایج نشان داد که در سال اول آزمایش مقدار CRM مثبت (برآورد کم‌تر مدل نسبت به مقادیر مشاهده‌شده) و در سال دوم آزمایش منفی (برآورد بیش‌تر مدل نسبت به مقادیر مشاهده‌شده) بود (جدول ۸). هم‌چنین مقدار شاخص CRM برای رسیدگی فیزیولوژیک گندم و تریتیکاله در هر دو سال آزمایش منفی (برآورد بیش‌تر مدل نسبت به مقادیر مشاهده‌شده) بود.

نتایج ارزیابی مدل نیز نشان داد که مقدار CRM برای شبیه‌سازی تاریخ‌های گلدهی و رسیدگی فیزیولوژیک در سال اول آزمایش مثبت و در سال دوم منفی بود. براساس نتایج پارامتریابی مدل در سال اول و دوم آزمایش، مقدار عددی شاخص ضریب هم‌خوانی (D-index) برای تاریخ گلدهی ارقام گندم به‌ترتیب ۰/۹۸ و ۰/۹۴، ارقام تریتیکاله به‌ترتیب ۰/۹۹ و ۰/۹۹ و جو به‌ترتیب ۰/۹۷ و ۰/۸۸ بود. در سال‌های آزمایش، مقدار D-index برای تاریخ رسیدگی فیزیولوژیک گیاه گندم به‌ترتیب ۰/۹۳ و ۰/۸۵، تریتیکاله ۰/۹۵ و ۰/۹۹ و جو ۰/۸۹ و ۰/۸۵ بود که نشان‌دهنده تطابق بین داده‌های شبیه‌سازی و مشاهده‌شده می‌باشد. به‌طور متوسط در گیاهان زراعی در هر دو سال آزمایش، بین مقادیر شبیه‌سازی‌شده تاریخ‌های فنولوژیک با مقدار مشاهده‌شده اختلاف چندانی وجود نداشت که میزان تطابق داده‌های تاریخ‌های فنولوژیک گلدهی و رسیدگی فیزیولوژیک در گیاهان تریتیکاله و گندم بیش‌تر از جو بود. مقدار ضریب R^2 نیز تأییدکننده این امر بود. هم‌چنین در هر دو سال آزمایش مقدار جذر میانگین مربعات نرمال‌شده (nRMSE) برای صفات فنولوژیک گلدهی و رسیدگی فیزیولوژیک گیاهان زراعی گندم، جو و تریتیکاله کم‌تر از پنج درصد بود.

۴. ۲. پارامتریابی و ارزیابی مدل اپسیم برای شبیه‌سازی عملکردهای دانه و زیستی

در هر دو سال آزمایش نتایج پارامتریابی زیرمدل‌های اپسیم نشان داد که در گیاه جو و تریتیکاله، مقدار شاخص ضریب جرمی خطا (CRM) برای شبیه‌سازی عملکرد دانه و عملکرد زیستی مثبت (برآورد کم‌تر مدل نسبت به مقدار مشاهده‌شده) بود (جدول‌های ۱۰ و ۱۱ و شکل ۲). در گیاه گندم نیز مدل عملکرد دانه را کم‌تر (CRM مثبت) و عملکرد زیستی را بیش‌تر (CRM منفی) از مقدار مشاهده‌شده برآورد نمود. برخلاف بخش پارامتریابی، ارزیابی مدل در شرایط واقعی نشان داد که مدل عملکردهای دانه و زیستی گیاهان گندم و جو را نسبت به مقادیر مشاهده‌شده، بیش‌تر (CRM منفی) برآورد نمود. بنابراین، نتایج نشان داد که مدل اپسیم در اکثر موارد عملکرد گیاهان موردمطالعه را به‌طور جزئی کم‌تر از مقدار مشاهده‌شده برآورد کرد.

نتایج پارامتریابی مدل نشان داد که در سال‌های اول و دوم آزمایش مقدار عددی شاخص ضریب هم‌خوانی (D-index) عملکرد دانه ارقام گندم به‌ترتیب ۰/۸۶ و ۰/۹۴، ارقام تریتیکاله ۰/۹۱ و ۰/۹۷ و جو به‌ترتیب ۰/۹۶ و ۰/۹۴ بود. در سال‌های آزمایش، مقدار D-index نیز برای عملکرد زیستی گیاه گندم به‌ترتیب ۰/۷۵ و ۰/۹۲، تریتیکاله ۰/۹۹ و جو ۰/۹۲ و ۰/۹۶ بود که نشان‌دهنده تطابق بین داده‌های شبیه‌سازی و مشاهده‌شده می‌باشد. بنابراین، به‌طورکلی نتایج ارزیابی مدل در شرایط آزمایشی نشان می‌دهد مدل اپسیم مقادیر عملکرد دانه در گیاهان گندم، جو و تریتیکاله و مراحل فنولوژیک را با دقت خوبی شبیه‌سازی نموده است، به‌طوری‌که بین متغیرهای شبیه‌سازی‌شده و مشاهده‌شده اختلاف معنی‌داری از لحاظ آماری وجود نداشت.

جدول ۸. پارامتریابی مدل اپسیم برای شبیه‌سازی تاریخ‌های فنولوژیک (روز پس از کاشت) ارقام گندم، جو و تریتیکاله

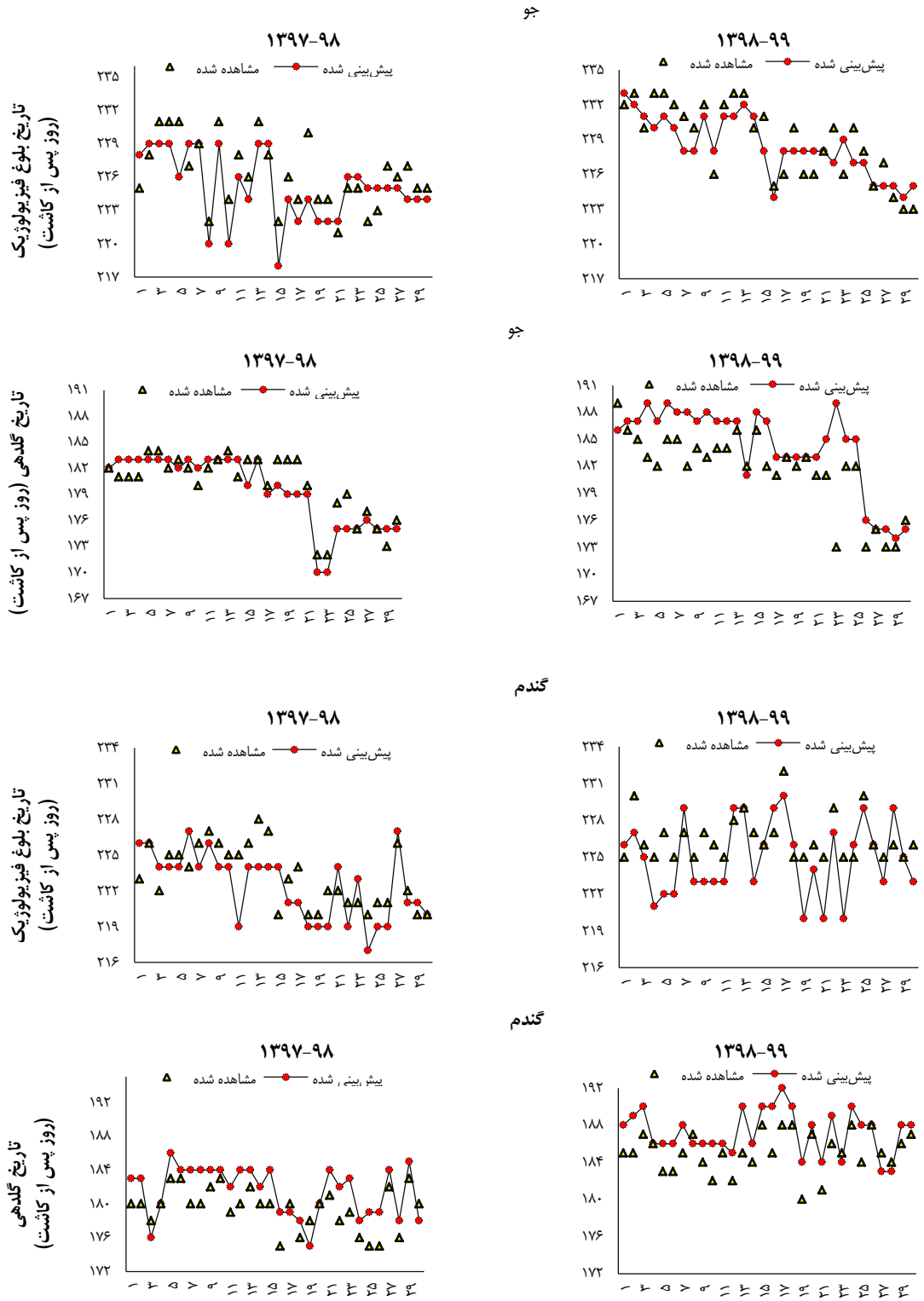
گیاه	رقم	سال ۹۴-۱۳۹۳				سال ۹۶-۱۳۹۵			
		گلدهی		بلوغ فیزیولوژیک		گلدهی		بلوغ فیزیولوژیک	
		Obs	Pre	Obs	Pre	Obs	Pre	Obs	Pre
گندم	بهار	۱۸۷	۱۸۷	۲۲۲	۲۲۴	۱۸۶	۱۸۶	۲۲۳	۲۲۲
	پارسی	۱۸۲	۱۸۲	۲۱۹	۲۱۹	۱۸۷	۱۸۷	۲۲۲	۲۲۲
	پیشتاز	۱۹۰	۱۸۹	۲۲۷	۲۲۷	۱۸۵	۱۸۶	۲۲۱	۲۲۱
	پیشگام	۱۸۷	۱۸۷	۲۲۳	۲۲۵	۱۸۸	۱۸۷	۲۲۲	۲۲۱
	سیروان	۱۹۰	۱۸۹	۲۲۶	۲۲۵	۱۸۵	۱۸۶	۲۱۷	۲۱۹
	سیوند	۱۸۷	۱۸۷	۲۲۰	۲۲۲	۱۸۵	۱۸۵	۲۲۰	۲۱۹
	میانگین	۱۸۷	۱۸۷	۲۲۳	۲۲۴	۱۸۶	۱۸۶	۲۲۱	۲۲۱
	nRMSE (%)	۰/۱۵		۰/۳۲		۰/۱۹		۰/۲۶	
	CRM	+۰/۰۰۱		۰/۰۰۳		−۰/۰۰۳		−۰/۰۰۱	
	D-index	۰/۹۸		۰/۹۳		۰/۹۴		۰/۸۵	
	R^2	۰/۹۹		۰/۹۱		۰/۸۶		۰/۸۲	
تریتیکاله	جوانیلو	۱۸۹	۱۸۹	۲۲۵	۲۲۷	۱۸۷	۱۸۷	۲۲۱	۲۲۲
	سناباد	۱۹۰	۱۸۹	۲۲۶	۲۲۷	۱۸۶	۱۸۷	۲۲۲	۲۲۲
	میانگین	۱۸۹	۱۸۹	۲۲۶	۲۲۷	۱۸۶	۱۸۷	۲۲۱	۲۲۲
	nRMSE (%)	۰/۱۴		۰/۱۷		۰/۰۸		۰/۰۶	
	CRM	+۰/۰۰۲		−۰/۰۰۵		−۰/۰۰۲		۰–/۰۰۲	
	D-index	۰/۹۹		۰/۹۵		۰/۹۹		۰/۹۹	
	R^2	۰/۹۸		۰/۹۹		۰/۹۶		۰/۹۶	
جو	بهمن	۱۸۶	۱۸۷	۲۲۷	۲۲۶	۱۸۱	۱۸۳	۲۲۳	۲۲۱
	یوسف	۱۷۸	۱۷۷	۲۲۲	۲۲۲	۱۷۴	۱۷۶	۲۱۹	۲۲۰
	ریحان	۱۸۱	۱۸۲	۲۲۴	۲۲۳	۱۷۸	۱۸۰	۲۱۹	۲۱۹
	ریحان ۰۳	۱۷۸	۱۷۷	۲۲۰	۲۲۲	۱۷۵	۱۷۶	۲۱۷	۲۱۹
	فجر ۳۰	۱۷۸	۱۷۷	۲۲۲	۲۲۳	۱۷۴	۱۷۶	۲۱۷	۲۱۸
	رودشت	۱۸۳	۱۸۲	۲۲۴	۲۲۳	۱۷۸	۱۸۰	۲۱۹	۲۱۸
	میانگین	۱۸۱	۱۸۰	۲۲۳	۲۲۳	۱۷۷	۱۷۹	۲۱۹	۲۱۹
	nRMSE (%)	۰/۲۹		۰/۲۴		۰/۵۳		۰/۳۲	
	CRM	+۰/۰۰۲		+۰/۰۰۸		−۰/۰۱		−۰/۰۰۰۲	
	D-index	۰/۹۷		۰/۸۹		۰/۸۸		۰/۸۵	
	R^2	۰/۹۸		۰/۸۶		۰/۹۹		۰/۹۰	

Obs: مقدار مشاهده شده، Pre: مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل، nRMSE: جذر میانگین مربعات نرمال‌شده، CRM: ضریب جرمی خطا که علامت مثبت و منفی به‌ترتیب نشان‌دهنده برآورد کم‌تر و بیش‌تر مدل نسبت به مقادیر مشاهده‌شده است، D-index: شاخص ضریب هم‌خوانی و R^2: ضریب تبیین.

جدول ۹. ارزیابی مدل اپسیم برای شبیه‌سازی تاریخ‌های گلدهی و رسیدگی فیزیولوژیک (روز پس از کاشت) گندم و جو

گیاه	شاخص	سال ۹۸-۱۳۹۷				سال ۹۹-۱۳۹۸			
		گلدهی		بلوغ فیزیولوژیک		گلدهی		بلوغ فیزیولوژیک	
		Obs	Pre	Obs	Pre	Obs	Pre	Obs	Pre
جو	Mean	۱۸۰/۰۷	۱۷۹/۴۷	۲۲۶/۲۷	۲۲۵/۱۳	۱۸۱/۵۳	۱۸۴/۲۳	۲۲۸/۹۳	۲۲۷/۴۳
	nRMSE (%)	۱/۲۳		۱/۲۲		۲/۵۹		۰/۹۳	
	CRM	+۰/۰۰۳		+۰/۰۰۵		−۰/۰۱۵		+۰/۰۰۲	
	D-index	۰/۹۲		۰/۸۲		۰/۷۹		۰/۸۸	
	R^2	۰/۸۸		۰/۷۹		۰/۷۵		۰/۸۲	
گندم	Mean	۱۷۹/۴۷	۱۸۱/۵۰	۲۲۳/۲۷	۲۲۲/۴۳	۱۸۵/۱۰	۱۸۷/۲۳	۲۲۶/۵۰	۲۲۴/۹۳
	nRMSE (%)	۱/۷۶		۱/۱۹		۱/۶۹		۱/۳۷	
	CRM	−۰/۰۱۱		+۰/۰۰۴		−۰/۰۱۱		+۰/۰۰۷	
	D-index	۰/۷۹		۰/۷۸		۰/۷۵		۰/۷۶	
	R^2	۰/۷۵		۰/۷۵		۰/۷۶		۰/۷۵	

Obs: مقدار مشاهده شده، Pre: مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل، Mean: میانگین ارقام، nRMSE: جذر میانگین مربعات نرمال شده، CRM: ضریب جرمی خطا که علامت مثبت و منفی به‌ترتیب نشان‌دهنده برآورد کم‌تر و بیش‌تر مدل نسبت به مقادیر مشاهده‌شده است، D-index: شاخص ضریب هم‌خوانی و R^2: ضریب تبیین.



شکل ۱. مقادیر مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده تاریخ‌های گلدهی و رسیدگی فیزیولوژیک گیاهان گندم و جو در مزارع موردمطالعه در استان البرز و در سال‌های مختلف آزمایش

جدول ۱۰. پارامتریابی مدل اپسیم برای شبیه‌سازی عملکرد دانه و زیستی (کیلوگرم در هکتار) ارقام جو، گندم و تریتیکاله

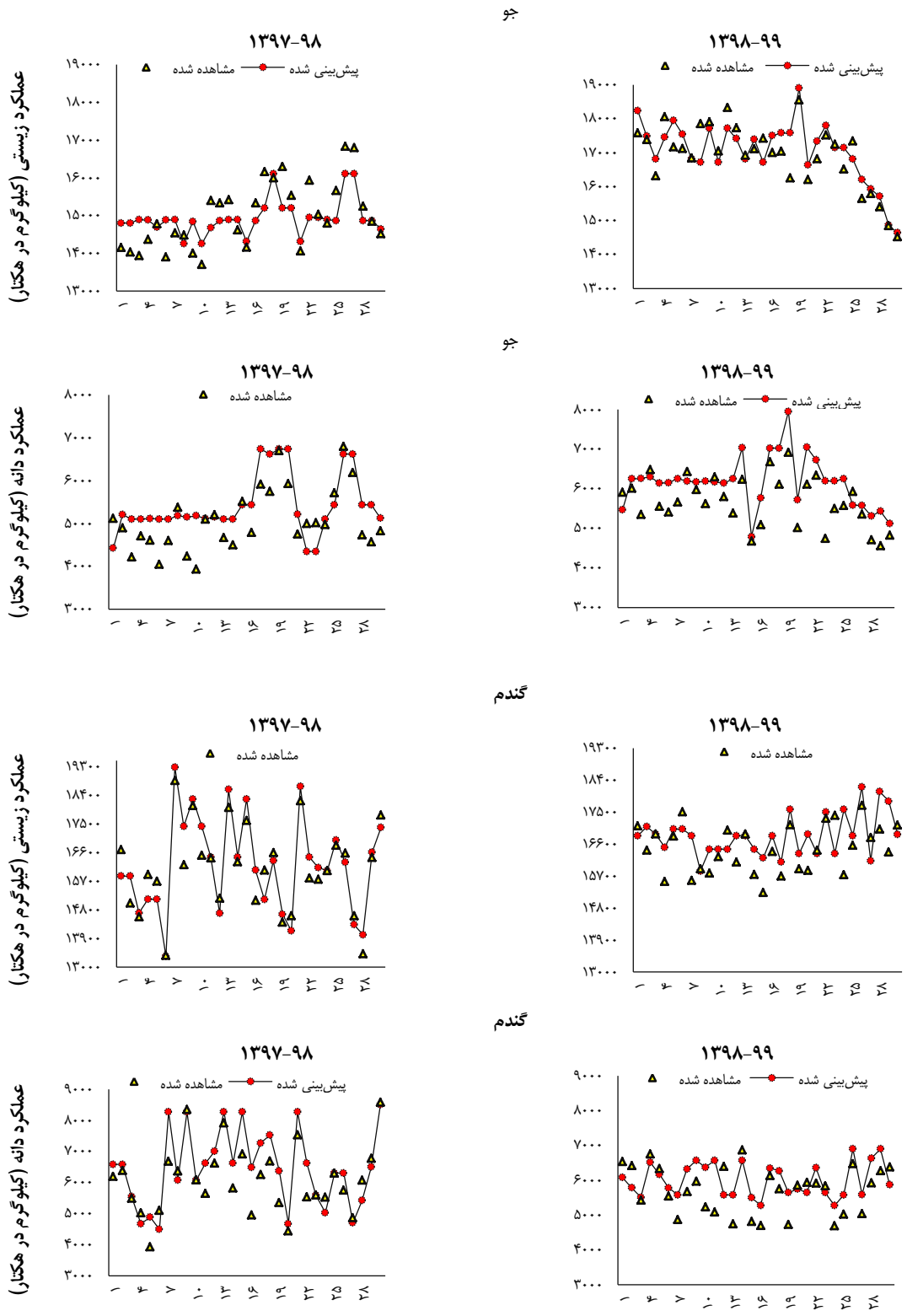
گیاه	رقم	سال ۹۴-۱۳۹۳				سال ۹۶-۱۳۹۵			
		عملکرد دانه		عملکرد زیستی		عملکرد دانه		عملکرد زیستی	
		Obs	Pre	Obs	Pre	Obs	Pre	Obs	Pre
گندم	بهار	۶۵۴۴	۵۴۸۸	۱۶۰۸۹	۱۶۳۷۶	۷۳۲۱	۷۰۵۷	۱۶۷۳۹	۱۷۲۵۵
	پارسی	۶۲۹۹	۶۴۱۵	۱۵۷۸۴	۱۵۷۹۷	۸۱۵۶	۷۸۶۵	۱۷۳۲۸	۱۷۵۵۷
	پیشتاز	۷۱۳۲	۶۴۸۰	۱۴۹۰۹	۱۵۴۵۷	۷۴۳۷	۶۶۱۲	۱۵۹۶۵	۱۶۳۶۴
	پیشگام	۷۰۱۶	۶۸۴۱	۱۵۴۷۹	۱۶۰۷۲	۷۲۹۶	۷۱۹۵	۱۶۳۸۵	۱۶۷۹۶
	سیروان	۵۱۸۴	۵۷۲۳	۱۳۲۴۳	۱۳۶۶۱	۷۱۳۰	۶۴۵۱	۱۶۶۳۲	۱۶۸۲۹
	سیوند	۷۶۲۲	۶۸۰۴	۱۵۴۶۱	۱۵۸۶۰	۸۲۸۱	۷۴۸۵	۱۸۰۱۲	۱۸۰۵۳
	میانگین	۶۴۸۳	۶۲۹۲	۱۵۱۶۱	۱۵۵۳۷	۷۶۰۴	۷۱۱۱	۱۶۸۴۴	۱۷۱۴۲
	nRMSE (%)	۳/۷۹		۱/۱۳		۳/۵۸		۱/۰۰	
	CRM	+۰/۰۲		−۰/۰۲		+۰/۰۶		−۰/۰۱	
	D-index	۰/۸۶		۰/۹۴		۰/۷۵		۰/۹۲	
	R^2	۰/۹۰		۰/۹۷		۰/۸۳		۰/۹۸	
تریتیکاله	جوانیلو	۶۵۴۲	۶۲۲۷	۱۶۷۵۱	۱۶۵۳۴	۷۷۷۰	۷۱۸۷	۱۷۶۲۰	۱۶۹۸۱
	سناباد	۷۲۷۴	۶۶۲۷	۱۶۶۴۹	۱۶۵۳۵	۸۰۶۲	۷۴۸۵	۱۸۷۲۷	۱۷۹۳۶
	میانگین	۶۹۰۸	۶۴۲۷	۱۶۷۰۱	۱۶۵۳۴	۷۹۱۷	۷۳۳۶	۱۸۱۷۴	۱۷۴۵۸
	nRMSE (%)	۲/۱۲		۰/۳۰		۲/۱۱		۱/۱۴	
	CRM	+۰/۰۶		+۰/۰۰۹		+۰/۰۷		+۰/۰۳	
	D-index	۰/۹۱		۰/۹۹		۰/۹۷		۰/۹۹	
	R^2	۰/۹۹		۰/۹۹		۱/۰۰		۱/۰۰	
جو	بهمن	۶۳۰۱	۶۵۷۱	۱۳۰۱۳	۱۳۸۱۷	۵۰۱۴	۵۴۵۵	۱۵۰۸۹	۱۵۵۱۲
	یوسف	۵۵۲۱	۵۲۷۳	۱۲۲۲۹	۱۲۷۳۷	۴۶۰۸	۴۱۵۰	۱۴۰۳۸	۱۴۴۴۴
	ریحان	۶۷۳۵	۶۹۷۴	۱۵۰۲۱	۱۵۷۲۸	۵۵۳۸	۵۶۱۷	۱۶۷۷۹	۱۷۲۴۴
	ریحان ۰۳	۷۵۷۷	۷۲۹۴	۱۵۶۰۸	۱۵۸۷۶	۷۱۱۹	۶۷۹۵	۱۷۲۲۱	۱۷۷۸۳
	فجر ۳۰	۷۶۷۲	۷۲۹۴	۱۵۰۰۴	۱۵۶۷۶	۷۰۰۰	۶۵۹۵	۱۷۶۹۰	۱۷۹۸۳
	رودشت	۷۱۸۷	۶۹۷۴	۱۴۸۷۶	۱۵۷۲۸	۵۸۷۲	۵۳۱۷	۱۶۳۴۱	۱۷۰۴۴
	میانگین	۶۸۳۳	۶۷۳۰	۱۴۲۹۲	۱۴۹۲۷	۵۸۵۹	۵۶۵۵	۱۶۱۹۴	۱۶۶۶۸
	nRMSE (%)	۲/۰۲		۲/۳۲		۰/۴۶		۱/۵۱	
	CRM	+۰/۰۱		−۰/۰۴		+۰/۰۳		−۰/۰۲	
	D-index	۰/۹۶		۰/۹۲		۰/۹۴		۰/۹۶	
	R^2	۰/۹۳		۰/۹۸		۰/۹۲		۰/۹۹	

Obs: مقدار مشاهده‌شده، Pre: مقدار پیش‌بینی‌شده توسط مدل، nRMSE: جذر میانگین مربعات نرمال‌شده، CRM: ضریب جرمی خطا که علامت مثبت و منفی به‌ترتیب نشان‌دهنده برآورد کم‌تر و بیش‌تر مدل نسبت به مقادیر مشاهده‌شده است، D-index: شاخص ضریب هم‌خوانی و R^2: ضریب تبیین.

جدول ۱۱. ارزیابی مدل اپسیم برای شبیه‌سازی عملکرد دانه و زیستی (کیلوگرم در هکتار) گیاهان گندم و جو

گیاه	شاخص	سال ۹۸-۱۳۹۷				سال ۹۹-۱۳۹۸			
		عملکرد دانه		عملکرد زیستی		عملکرد دانه		عملکرد زیستی	
		Obs	Pre	Obs	Pre	Obs	Pre	Obs	Pre
جو	Mean	۵۰۸۰/۸۳	۵۴۱۶/۹۰	۱۴۹۹۷/۵۶	۱۴۹۳۰/۸۷	۵۶۶۸/۱۲	۶۱۳۸/۵۸	۱۶۹۱۹/۲۸	۱۷۰۴۳/۲۲
	nRMSE (%)	۱۳/۵۲		۴/۴۷		۱۳/۹۶		۳/۵۰	
	CRM	−۰/۰۶۰		+۰/۰۰۴		−۰/۰۸		−۰/۰۷	
	D-index	۰/۸۰		۰/۷۸		۰/۷۶		۰/۹۱	
	R^2	۰/۷۵		۰/۷۶		۰/۷۳		۰/۸۴	
گندم	Mean	۶۰۸۲/۴۵	۶۴۵۸/۵۲	۱۶۰۹۴/۴۴	۱۶۲۰۷/۶۵	۵۷۱۴/۰۰	۶۰۰۵/۷۸	۱۶۴۷۷/۴۴	۱۶۸۳۸/۹۹
	nRMSE (%)	۱۳/۳۴		۳/۹۱		۱۲/۱۴		۵/۰۲	
	CRM	−۰/۰۶۰		−۰/۰۰۷		−۰/۰۵		−۰/۰۲۲	
	D-index	۰/۸۹		۰/۹۷		۰/۷۱		۰/۷۰	
	R^2	۰/۸۵		۰/۹۳		۰/۷۵		۰/۷۲	

Obs: مقدار مشاهده‌شده، Pre: مقدار پیش‌بینی‌شده توسط مدل، Mean: میانگین ارقام، nRMSE: جذر میانگین مربعات نرمال‌شده، CRM: ضریب جرمی خطا که علامت مثبت و منفی به‌ترتیب نشان‌دهنده برآورد کم‌تر و بیش‌تر مدل نسبت به مقادیر مشاهده‌شده است، D-index: شاخص ضریب هم‌خوانی و R^2: ضریب تبیین.



شکل ۲. مقادیر مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده عملکرد دانه و زیستی گندم و جو در مزارع موردمطالعه استان البرز در سال‌های مختلف آزمایش

۵. بحث

نتایج شبیه‌سازی تاریخ‌های گلدهی و بلوغ فیزیولوژیک با استفاده از زیر مدل‌های APSIM-Wheat و APSIM-Barley تطابق بسیار خوبی بین مقادیر شبیه‌سازی‌شده و مشاهده‌شده‌ی آزمایش در تمام ارقام موردمطالعه گندم، جو و تریتیکاله نشان داد و مدل توانست باکیفیت عالی و دقت قابل‌قبولی (nRMSE< 10%) تاریخ‌های فنولوژیک (گلدهی و رسیدگی فیزیولوژیک) را پیش‌بینی کند. پیش‌بینی نمو فنولوژیک یا مراحل نموی گیاه اهمیت زیادی دارد چون تولید و توزیع ماده خشک در مدل‌های شبیه‌سازی زراعی تا حدود زیادی تحت تأثیر زمان وقوع مراحل فنولوژی می‌باشد.

ارزیابی کارکرد هر مدل مستلزم اجراهای مختلف مدل و تغییر ضرایب مؤثر بر خروجی‌هاست. استفاده از ضرایب باعث می‌شود که نتایج حاصله متناسب با شرایط اقلیمی- زراعی منطقه موردمطالعه باشد. با توجه به تغییرات عوامل متعدد در شرایط مزرعه‌ای، نتایج ارزیابی زیرمدل‌های اپسیم نشان داد که در شرایط واقعی اگرچه مدل اپسیم تاریخ‌های گلدهی و رسیدگی فیزیولوژیک ارقام را تا حدودی بیش‌تر یا کم‌تر از مقادیر مشاهده‌شده برآورد نمود، اما با توجه به این‌که مقدار جذر میانگین نرمال‌شده (nRMSE) تاریخ‌های گلدهی و رسیدگی فیزیولوژیک گیاهان کم‌تر از ۱۰ درصد بود و میزان تطابق هم‌خوانی (D-index) داده‌های شبیه‌سازی‌شده و مشاهده‌شده بیش‌تر از ۰/۷۵ درصد بود، لذا زیرمدل‌های اپسیم توانست همانند شرایط بدون تنش (آزمایش‌های تحقیقاتی)، در شرایط واقعی (آزمایش‌های میدانی) نیز تاریخ‌های فنولوژیک گلدهی و رسیدگی فیزیولوژیک گیاهان گندم و جو را باکیفیت عالی شبیه‌سازی کند.

به‌طورکلی، تطابق مقادیر شبیه‌سازی صفات فنولوژیک (گلدهی و رسیدگی فیزیولوژیک) و عملکرد (دانه و زیستی) ارقام تریتیکاله بیش‌تر از گیاهان گندم و جو بود. برخلاف صفات فنولوژیک، تطابق مقادیر شبیه‌سازی‌شده صفات عملکردی نیز در ارقام جو بیش‌تر از گندم بود. در هر دو سال آزمایش مقدار جذر میانگین مربعات نرمال‌شده (nRMSE) برای صفات عملکردهای دانه و زیستی گیاهان زراعی گندم، جو و تریتیکاله کم‌تر از پنج درصد (nRMSE< 5%) بود و مدل توانست همانند صفات فنولوژیک، عملکرد گیاهان موردمطالعه را باکیفیت عالی و دقت قابل‌قبولی پیش‌بینی کند.

نتایج ارزیابی زیرمدل‌های اپسیم در شرایط واقعی نشان داد که در هر دو سال آزمایش، در مزرعه‌های موردمطالعه استان البرز، مقدار ضریب هم‌خوانی (D-index) داده‌های مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده بیش‌تر از ۰/۷۰ بود، لذا مدل اپسیم در شرایط واقعی نیز همانند شرایط بدون تنش عملکرد گیاهان گندم و جو را به‌طور جزئی بیش‌تر برآورد کرد. در شرایط واقعی مقدار جذر میانگین نرمال‌شده (nRMSE) مدل اپسیم برای عملکرد دانه گیاهان گندم و جو در بازه ۱۰ تا ۲۰ درصد و برای عملکرد زیستی کم‌تر از ۱۰ درصد بود، لذا مدل توانست که در شرایط واقعی عملکرد دانه گیاهان زراعی گندم و جو را باکیفیت قابل‌قبول (خوب) و عملکرد زیستی را باکیفیت عالی شبیه‌سازی نماید.

بنایان[1] و هوگنبوم[2] اظهار داشتند که اگر جذر میانگین مربعات خطا کم‌تر از ۱۰ درصد باشد، شبیه‌سازی به ایده‌آل‌ترین (عالی) شکل، بین بازه ۱۰ تا ۲۰ درصد، شبیه‌سازی قابل‌قبول (خوب)، در بازه ۲۰ تا ۳۰ درصد، کیفیت شبیه‌سازی معمولی و اگر این مقدار بیش‌تر از ۳۰ درصد باشد، نشانگر ضعف مدل در شبیه‌سازی می‌باشد (کیفیت ضعیف). پژوهش‌گران، مدل‌های APSIM–Wheat و CERES–Wheat را برای گندم پاییزه در پاکستان در شرایط دیم برای پنج رقم گندم در پاکستان کالیبره و ارزیابی کردند (احمد[3] و همکاران، ۲۰۱۶). هردوی این مدل‌ها توانستند که تاریخ‌های فنولوژیک گلدهی و رسیدگی، شاخص سطح برگ، عملکرد دانه و ماده خشک کل را با درجه عالی (nRMSE<10)، پیش‌بینی کنند و مقادیر اندازه‌گیری‌شده این شاخص‌ها در آزمایش مزرعه‌ای با مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط مدل تطابق

1. Bannayan
2. Hoogenboom
3. Ahmed

داشت (D-Index= 0.8). برخی دیگر از پژوهش‌گران نیز کارایی مدل اپسیم را در پیش‌بینی تاریخ‌های فنولوژیک گندم و جو تأیید کردند (دسیوا[1] و همکاران، ۲۰۲۱، خیر[2] و همکاران، ۲۰۲۰). پژوهش‌گران در پژوهشی گزارش کردند که مدل اپسیم توانست زمان گلدهی و رسیدگی فیزیولوژیکی را به‌ترتیب با جذر میانگین مربعات خطا ۳/۷ و ۳/۱ روز با دقت بالایی شبیه‌سازی کند (آرایا و همکاران، ۲۰۱۵). پژوهش‌گران مختلفی نیز کارایی مدل اپسیم را در پیش‌بینی عملکرد گیاهان گندم و جو عالی برآورد کردند (هائو[3] و همکاران، ۲۰۲۱، گایدون[4] و همکاران، ۲۰۱۷، ژنگ[5] و همکاران، ۲۰۱۴). باسو و همکاران (۲۰۱۳) نیز با استفاده از زیرمدل گندم که برای تریتیکاله سازگار شده بود (APSIM-Triticale) توانستند رشدونمو، رشد رویشی، عملکرد و پویایی آب خاک تریتیکاله را با کیفیت عالی شبیه‌سازی کنند.

۶. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

نتایج پارامتریابی مدل زیرمدل‌های اپسیم نشان داد که در سال‌های آزمایش، مقدار جذر میانگین مربعات نرمال‌شده (nRMSE)، برای صفات عملکرد دانه و زیستی و صفات فنولوژیک تاریخ گلدهی و رسیدگی فیزیولوژیک کم‌تر از ۱۰ درصد بود که تأییدکننده توانمندی بالای مدل اپسیم در شبیه‌سازی مراحل فنولوژیک و عملکرد گیاهان زراعی گندم، جو و تریتیکاله می‌باشد. هم‌چنین سایر شاخص‌های ارزیابی مدل ازجمله nRMSE، CRM، D-index و R^2 نیرومندی مدل مذکور را تأیید کردند. هم‌چنین توانمندی زیرمدل‌های مذکور در شبیه‌سازی، در شرایط واقعی (میدانی) نیز باکیفیت عالی به اثبات رسید.

بنابراین، با توجه به دست‌یابی به ضرایب ژنتیکی برخی از ارقام گندم و جو که سطح زیر کشت قابل‌توجهی در ایران دارند، با استفاده از زیرمدل‌های اپسیم (APSIM-Wheat و APSIM-Barley)، می‌توان تاریخ‌های فنولوژیک گلدهی و رسیدگی فیزیولوژیک و عملکردهای دانه و زیستی گیاهان گندم و جو را در سناریوهای مختلف اقلیمی و مدیریتی (سطوح مختلف رژیم‌های رطوبتی، کودی، تاریخ کشت‌های مختلف و غیره) استان البرز بدون اجرای آزمایش‌های زمان‌بر و پرهزینه برآورد نمود. هم‌چنین به‌کارگیری مدل اپسیم در دست‌یابی به تولید پایدار و صرفه‌جویی اقتصادی نهاده‌های کشاورزی در منطقه می‌تواند کارگشا باشد و دورنمایی از شرایط تولید گیاهان گندم و جو را در اختیار کشاورزان، مدیران و برنامه‌ریزان قرار دهد. از سویی دیگر، با توجه به این‌که در استان البرز معیشت کشاورزان وابستگی زیادی به تولید غلاتی همچون گندم و جو دارد. لذا کاهش عمده عملکرد می‌تواند تولید را غیراقتصادی نموده و موجب افزایش نیاز به واردات این محصولات خواهد شد. استفاده از مدل‌های گیاهان زراعی همچون اپسیم در برنامه‌ریزی‌های مدیریتی در شرایط بحران نقش داشته و می‌تواند جهت کاهش اثرات نامطلوب تغییرات اقلیمی از مدل‌ها برای اتخاذ تصمیم‌های مدیریتی مانند انتخاب تاریخ کشت مناسب، انتخاب ارقام مقاوم به تنش‌های محیطی و برنامه‌ریزی آبیاری بهینه استفاده کرد.

۷. تشکر وقدردانی

از حمایت‌های پرسنل محترم دانشکده کشاورزی دانشگاه تهران و مزرعه پژوهشی سازمان انرژی اتمی، تشکر و قدردانی می‌گردد.

1. Desiva
2. Kheir
3. Hao
4. Gaydon
5. Zheng

۸. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

۹. منابع

Ahmed, M., Akram, M.N., Asim, M., Aslam, M., Hassan, F., Higgins, S., Stockle, C., & Hoogenboom, 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.

Andarzian, B., Bannayan, M., Steduto, P., Mazrae, H., Barati, M.E., Barati, M.A., & Rahnama, A. (2011). Validation and testing of the AquaCrop model under full and deficit irrigated wheat production in Iran. *Agricultural Water Management*, *100*(1), 1-8.

Araya, A., Hoogenboom, G., Luedeling, E., Hadgue, K.M., Kisekkaf, I., & Martorano, L.G. (2015). Assessment of maize growth and yield using crop models under present and future climate in southwestern Ethiopia. *Agricultural and forest Meteorology*, *214*, 252-265.

Asseng, S., Zhu, Y., Wang, E., & Zhang, W. (2015). Crop modelling climate change impact and adaptation. *Nature Climate Change*, *5*, 143-147.

Bannayan, M., Hoogenboom, G., & Crout, N.M.J. (2009). Photothermal impact on maize performance: a simulation approach. *Ecological Modeling*, *180*, 277-290.

Bannayan, M., Hoogenboom, G., & Crout, N.M.J. (2009). Photothermal impact on maize performance: a simulation approach. *Ecological Modeling*, *180*, 277-290.

Bassu, S., Asseng, S., Giunta, F., & Motzo, R. (2013). Optimizing triticale sowing densities across the Mediterranean Basin. *Field Crops Research*, *144*, 167-178.

Bento, V.A., Ribeiro, A.F.S., Russo, A., Gouveia, C.M., Cardoso, R.M., & Soares, P.M.M. (2021). The impact of climate change in wheat and barley yields in the Iberian Peninsula. *Scientific Reports*, *11*, 15484.

Briak, H., & Kebede, F. (2021). Wheat (*Triticum aestivum* L.) adaptability evaluation in a semi-arid region of Central Morocco using APSIM model. *Scientific Reports*, *11*, 24092.

Chen, C., Wang, E., & Yu, Q. (2010). Modelling the effects of climate variability water management on crop *water productivity and water balance in the China Plain. Agricultural Water Management*, *97*(8), 1175-1184.

Confalonieri, R. (2023). Modeling triticale growth and yield under Mediterranean conditions using APSIM-Triticale. *Agronomy*, *13*(10), 2521.

Desilva, S. H., Takahashi, T., & Okada, K. (2021). Evaluation of APSIM – Wheat to simulate the response of yield and grain protein content to nitrogen application on an Andosol. *Plant Production Science*, *3*(5), 50-63.

Devkota, K.P., Hoogenboom, G., Boote, K.J., Singh, U., Lamers, J.P.A., Devkota, M., & Vlek, P.L.G. (2015). Simulating the impact of water saving irrigation and conservation agriculture practices for rice–wheat systems in the irrigated semi-arid drylands of Central Asia. *Agricultural and Forest Meteorology*, *214*, 266-280.

Donatelli, M., & Confalonieri, R. (2011). Biophysical models for cropping system simulation, in: Flichman, G. (Eds). *Bio-Economic Models Applied to Agricultural Systems*, pp, 59-87.

Dong, C., Hu, D., Fu, Y., Wang, M., & Liu, H. (2014). Analysis and optimization of the effect of light and nutrient solution on wheat growth and development using an inverse system model strategy. *Computers and Electronics in Agriculture*, *109*, 221-231.

Gaydon, D.S., Wang, E., Poulton, P.L., Ahmad, B., Ahmed, F., Akhter, S., Ali, I., Amarasingha, R., Chaki, A.K., & Chen, C. (2017). Evaluation of the APSIM model in cropping systems of Asia. *Field Crops Research*, *204*, 52-75.

Hao, S., Ryo, D., Western, A., Perry, E., Bogena, H., Jan, H., & Franssen, H. (2021). Performance of a wheat yield prediction model and factors influencing the performance. *Agricultural Systems*, *194*, 103-225.

Hochman, Z., Gobbett, D., Horan, H., & Garcia, J.N. (2017). Data rich yield gap analysis of wheat in Australia. *Field Crops Research*, *197*, 97-106.

Keating, B.A., Carberry, P.S., Hammer, G.L., Probert, M.E., Robertson, M.J., Holzworth, D., Huth, N.I., & Smith, C.J. (2024). An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. *European Journal of Agronomy*. *18*(3), 267-288.

Keir, A.M.S., Ding, Z., Feike, T., & Elnashar, A. (2020). Wheat crop modelling for higher production. *Systems Modeling*, 179-202.

Kumar, U., Hansen, E., Thomsen, I., & Vogeler, I. (2023). Performance of APSIM to simulate the dynamics of winter wheat growth, phenology, and nitrogen uptake from early growth stages to maturity in Northern Europe. *Plants*, *12*(5), 986.

Loague, K., & Green, R.W. (1991). Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: overview and application. *Journal of Contaminant Hydrology*, *7*, 51-73.

Ma, Y., Feng, S., & Song, X. (2015). Evaluation of optimal irrigation scheduling and groundwater recharge at representative sites in the North China Plain with SWAP model and field experiments. *Agriculture Journal*, *116*, 125-136.

Martin, M.M., Olesen, J.E., & Porter, J.R. (2014). A genotype, environment and management analysis of adaption in winter wheat to climate change in Denmark. *Agricultural and Forest Meteorology*, *187*, 1-13.

Mihret, Y.C., Ketsela, G.M., & Mintesinot, S.M. (2024). Implementation and application of APSIM for crop modelling in Ethiopia: A comprehensive review. *Heliyon*, *10*(10), e31612.

Oleary, G.J., Christy, B., Nuttall, J., Huth, N., Cammarano, D., Stockle, C., Basso, B., Shcherbak, I., Fitzgerald, G., Luo, Q., Farre-Codina, I., Palta, J., & Asseng, S. (2015). Response of wheat growth, grain yield and water use to elevate CO_2 under a free-air CO_2 enrichment (FACE) experiment and modelling in a semi-arid environment. *Global Change Biology*, *21* (7), 2670-2686.

Rezaei, E.E., Siebert, S., & Ewert, F. (2015). Intensity of heat stress in winter wheat phenology compensates for the adverse effect of global warming. *Environmental Research Letters*, *10* (2), 12-24.

Safer, G.A., & Savin, R. (2023). Comparative performance of barley and wheat across a wide range of yielding conditions. Does barley outyield wheat consistently in low-yielding conditions? *European Journal of Agronomy*, *143*, 1-8.

Vogeler, I., Jensen, J.L., Thomsen, I.K., Labouriau, R., & Hansen, E.M. (2021). Fertiliser N rates interact with sowing time and catch crops in cereals and affect yield and nitrate leaching. *European Journal of Agronomy*, *124*, 126244.

Wallach, D., Buis, S., Lecharpentier, P., Bourges, J., Clastre, P., Launay, M., Bergez, J.E., Guerif, M., Soudais, J., & Justes, E. (2011). A package of parameter estimation methods and implementation for the STICS crop-soil model. *Environmental Modelling and Software*, *26*, 386-394.

Willmott, C.J. (1982). Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *63*, 1309-1313.

Zhang, Y., Ai, P., Ma, Y., Fu, Q., & Ma, X. (2025). Global sensitivity analyses of the APSIM-Wheat model at different soil moisture levels. *Plants*, *14*(17), 2608.

Zhao, G., Bryan, B., & Song, X. (2014). Sensitivity and uncertainty analysis of the APSIM-Wheat model: Interaction between cultivar, environment and management parameters. *Ecological Modelling*, *279*, 1-11.

Zheng, B., Chenu, K., Doherty, A., Doherty, T., & Chapman, L. (2014). The APSIM-Wheat module. apsru australia. pp. 1-44.

Zhu, F. (2018). Triticale: Nutritional composition and food uses. *Food Chemistry*, *241*, 468-479.