

Evaluating the accuracy of AquaCrop7.1 crop model and investigating the effect of changing the planting date on the performance of rainfed wheat in different climates of Iran

Marzieh Bagheri Khaneghahi¹ , Aboutaleb Hezarjaribi^{2*} , Mohammad Ismaeil Kamali³ ,
Fatemeh Zamani⁴ 

¹ Department of Water Engineering, Faculty of Water and Soil, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Golestan, Iran.

^{2*} Department of Water Engineering, Faculty of Water and Soil, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Golestan, Iran.

³ Department of Soil and Water Research, Golestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Gorgan, Golestan, Iran.

⁴ Department of Computer Engineering, Faculty of Electrical and Computer Engineering, Noshirvani University of Technology, Babol, Mazandaran, Iran.

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 14 December 2024

Revised 13 January 2025

Accepted 14 March 2025

Published online 28 June 2025

Keywords:

Climate,
Simulation,
Product yield,
Rainfed,
Calibration,
Cultivation date.

ABSTRACT

Objective: The aim of this research is to achieve the appropriate accuracy of the AquaCrop7 model in predicting the yield of rainfed wheat and also the effect of planting date on crop yield in different climatic regions (Gorgan, Mashhad, Shiraz, Ahvaz, Kermanshah, and Urmia).

Methods: First, daily climate data for the statistical period (1991-2020) was obtained from the synoptic stations of the National Meteorological Organization. Crop yield data was also obtained from the Agricultural Jihad Organization and conventional planting dates from regional information. Then the obtained was fed into the AquaCrop model. After recalibration and evaluation of the accuracy of the model based on the conventional planting date, the crop's yield under early and late planting dates was also obtained and compared with the yield under the conventional planting date.

Results: The results of rainfed wheat yield simulation indicated the acceptable accuracy of the model (with high R^2 values and low NRMSE values) in crop yield modeling. Also, the yield of the model crop in the mentioned cities was from 2.52, 1.09, 1.28, 0.83, 1.53, and 1.29 tons per hectare on the date of conventional cultivation to 2.721, 1.349, 1.45, 1.217, 1.742 and 1.683 tons per hectare in the early planting date. Therefore, based on the planting dates, the highest yield was related to the early planting date.

Conclusions: The AquaCrop7 model is an effective tool for water management, planning of rainfed wheat planting, and determining the optimal planting time in the study areas.

*Corresponding author, E-mail: Hezab10@yahoo.com

Cite this article: Bagheri Khaneghahi, M., Hezarjaribi, A., Kamali, M.I., & Zamani, F. (2024). Evaluating the accuracy of AquaCrop7.1 crop model and investigating the effect of changing the planting date on the performance of rainfed wheat in different climates of Iran. *Journal of New Approaches in Water Engineering and Environment*, <http://doi.org/10.22034/nawee.2025.493925.1122>



© The Author(s).

DOI: <http://doi.org/10.22034/nawee.2025.493925.1122>

Publisher: Gonbad Kavous University.



ارزیابی دقت مدل گیاهی AquaCrop7.1 و بررسی اثر تغییر تاریخ کشت بر عملکرد گندم دیم در اقلیم‌های متفاوت ایران

مرضیه باقری خانقاهی^۱، ابوطالب هزارجریبی^۲، محمد اسماعیل کمالی^۳، فاطمه زمانی^۴

^۱ گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گلستان، ایران.

^۲ گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گلستان، ایران.

^۳ بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان گلستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، گرگان، گلستان، ایران.

^۴ گروه مهندسی کامپیوتر، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل، مازندران، ایران.

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	هدف: هدف از این پژوهش، دستیابی به دقت مناسب مدل AquaCrop7 در پیش‌بینی عملکرد محصول گندم دیم و همچنین تأثیر تاریخ کشت بر عملکرد محصول در مناطق مختلف اقلیمی (گرگان، مشهد، شیراز، اهواز، کرمانشاه و ارومیه) می‌باشد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۰۴	مواد و روش‌ها: ابتدا اطلاعات اقلیمی روزانه برای دوره آماری (۲۰۲۰-۱۹۹۱) از ایستگاه‌های سینوپتیک سازمان هواشناسی کشور اخذ شد. داده‌های عملکرد محصول نیز از سازمان جهاد کشاورزی و تاریخ‌های کشت مرسوم از اطلاعات منطقه‌ای تهیه شد. سپس اطلاعات مورد نیاز در مدل Aqua Crop لحاظ گردید و پس از واسنجی و ارزیابی دقت مدل براساس تاریخ کشت مرسوم، عملکرد محصول تحت تاریخ کشت زودهنگام و دیرهنگام نیز بدست آمد و با عملکرد تحت تاریخ کشت مرسوم مقایسه شد.
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۰/۲۴	نتایج: نتایج شبیه‌سازی عملکرد گندم دیم حاکی از دقت قابل قبول مدل (با مقادیر زیاد R^2 و مقادیر کم NRMSE) در مدل‌سازی عملکرد محصول بود. همچنین عملکرد محصول مدل در شهرهای نامبرده به‌ترتیب از ۲/۵۲، ۱/۰۹، ۱/۲۸، ۰/۸۳، ۱/۵۳ و ۱/۲۹ تن بر هکتار در تاریخ کشت مرسوم به ۲/۷۲۱، ۱/۳۴۹، ۱/۴۵، ۱/۲۱۷، ۱/۷۴۲ و ۱/۶۸۳ تن بر هکتار در تاریخ کشت زودهنگام رسید. لذا براساس تاریخ‌های کشت، بالاترین عملکرد محصول مربوط به تاریخ کشت زودهنگام بود.
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۲۴	نتیجه‌گیری: مدل AquaCrop7 به عنوان ابزاری مؤثر برای مدیریت آب و برنامه‌ریزی کشت گندم دیم و تعیین زمان بهینه کشت در مناطق مطالعاتی می‌باشد.
تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۴/۰۷	
کلیدواژه‌ها:	
اقلیم	
شبیه‌سازی	
عملکرد محصول	
دیم	
واسنجی	
تاریخ کشت	

*نویسنده مسئول ، Email: Hezab10@yahoo.com

استناد: باقری خانقاهی، مرضیه؛ هزارجریبی، ابوطالب؛ کمالی، محمد اسماعیل؛ و زمانی، فاطمه. (۱۴۰۴). ارزیابی دقت مدل گیاهی AquaCrop7.1 و

بررسی اثر تغییر تاریخ کشت بر عملکرد گندم دیم در اقلیم‌های متفاوت ایران. *رویکردهای نوین در مهندسی آب و محیط زیست*،

<http://doi.org/nawee.2025.493925.1122>

© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه گنبد کاووس.



مقدمه

از اثرات منفی تغییرات آب‌وهوایی و خشکسالی، می‌توان به کاهش عملکرد محصولات به ویژه در مناطق اقلیمی خشک و نیمه‌خشک اشاره نمود. افزایش دما و بالا رفتن غلظت دی‌اکسید کربن باعث گرم‌تر شدن کره زمین شده و گیاهان C3 مانند گندم را تحت تأثیر قرار می‌دهد. لذا مدیریت صحیح مزارع برای تأمین امنیت غذایی و کشاورزی پایدار ضرورت دارد و هر اقدامی برای افزایش عملکرد محصولات به خصوص محصولات راهبردی نظیر گندم با توجه به منابع محدود آب و خاک حیاتی است (Ahmadi et al, 2017; Mustafa et al, 2020). براساس آمارهای FAO، در ایران سطح زیر کشت گندم حدود ۶/۱۹ میلیون هکتار است که کل تولید آن به ۱۴ میلیون تن می‌رسد و میانگین بهره‌وری آن حدود ۲/۲۵ تن در هکتار است (FAO, 2023). استفاده از نرم‌افزارهای مدل‌سازی محصولات محدودیت‌های موجود در تحقیقات میدانی را کاهش می‌دهد و به‌عنوان روشی مقرون‌به‌صرفه و ابزاری توانمند برای تعیین کمیت محصول و بهره‌وری، ارزیابی نیاز آبی سیستم‌های کشاورزی و درک فعل‌وانفعالات بین خاک، گیاه و اتمسفر اهمیت زیادی دارد (Araya A et al, 2022., Jorge et al, 2020). ابزارهای مدل‌سازی محصولات می‌توانند بر پایه کربن، آب یا تشعشع (RUE) باشند. در کشت دیم، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، مهم‌ترین عامل محدودکننده عملکرد میزان آب قابل دسترس گیاه است. بنابراین، برای دستیابی به مقادیر عملکرد با دقت مناسب، باید از مدل‌هایی استفاده شود که عملکرد را به‌عنوان تابعی از میزان آب در دسترس محاسبه کنند (Steduto et al, 2009). یکی از مدل‌های مناسب برای شبیه‌سازی محصولات کشاورزی به‌ویژه گندم، مدل AquaCrop می‌باشد (Zhang et al., 2022)؛ که توسط سازمان غذا و کشاورزی (FAO) توسعه یافته است. مدل AquaCrop عملکرد محصول، تولید زیست‌توده و استفاده کارآمد از آب را شبیه‌سازی می‌کند و با استفاده از داده‌های اقلیمی می‌تواند برای تدوین دستورالعمل‌های تاریخ کشت محصولات زراعی نظیر گندم به کشاورزان و کارشناسان ترویج کشاورزی کمک کند (Raes et al, 2018). برای استفاده از این مدل برای یک محصول خاص، باید آن را با استفاده از داده‌های مزرعه‌ای و سوابق آب‌وهوایی واسنجی و صحت‌سنجی نمود، تا کارایی و دقت مدل بررسی گردد (He et al, 2015). مقایسه شاخص‌های آماری بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده عملکرد دانه گندم طی دو سال متوالی در منطقه حمیدیه استان خوزستان نشان داد که ضریب تبیین (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) و شاخص توافقی (d) به ترتیب برابر با ۰/۹، ۰/۱۴، و ۰/۸۹ بوده و این نتایج نشان‌دهنده کارایی مناسب مدل در شبیه‌سازی عملکرد گندم در طول دو سال متوالی است (امداد و همکاران، ۱۳۹۷). جرعه‌نوش و همکاران (۱۴۰۳) با ارزیابی مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد گندم در قزوین بیان کردند که این مدل توانسته است زیست‌توده را با دقت بیشتری نسبت به عملکرد شبیه‌سازی کند. همچنین در مرحله واسنجی، مقادیر ضریب باقیمانده (CRM)، NRMSE و شاخص توافقی (d) برای زیست‌توده به ترتیب ۰/۱۵-، ۰/۱۷ و ۹۲ درصد به دست آمد. این مقادیر در مرحله صحت‌سنجی برای زیست‌توده به ترتیب ۰/۱-، ۰/۲۴ و ۹۲ درصد و برای عملکرد به ترتیب ۰/۰۳-، ۰/۰۶ و ۸۰ درصد گزارش شد. (Zhang et al, 2022) هم در مطالعه‌ای به مدل‌سازی با AquaCrop جهت یافتن آبیاری بهینه گندم زمستانه برای بهبود عملکرد دانه و بهره‌وری آب با چندین سناریو، این مدل را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که مدل AquaCrop مدل قابل اعتمادی برای آشکار کردن رشد و تولید محصول در شرایط کمبود آب بوده است. تحقیقات نشان می‌دهد که تاریخ کشت زود هنگام بر عملکرد محصول و ویژگی‌های فیزیولوژیکی گیاه تأثیر معنی‌داری دارد (قمری و همکاران، ۱۴۰۱ و Shahin et al, 2023). خسروی و همکاران (۱۴۰۱) در بررسی اثرات تاریخ کشت بر عملکرد گندم آبی در خرم‌آباد نشان دادند که تاریخ کشت ۱۵ مهرماه به دلیل کشت زود هنگام و حادث شدن مراحل رشدی با دماهای پایین‌تر از تحمل گیاه و تاریخ کشت ۳۰ آبان به دلیل تأخیر در زمان کشت سبب کاهش عملکرد دانه گردید. در این پژوهش، به دلیل

تنظیم دقیق برخی از فرآیندهای شبیه‌سازی و هماهنگی پارامترهای محصول و وجود تفاوت‌هایی در برخی بخش‌های نسخه جدید مدل AquaCrop7 نسبت به نسخه‌های قبل‌تر، که توسط فائو در سال ۲۰۲۳ اعلام شده است، واسنجی و صحت‌سنجی نسخه جدید مدل صورت گرفت. همچنین از آنجا که در مطالعات گذشته، واسنجی مدل در شرایط کشت دیم و نیز با داده‌های مشاهداتی کم، کمتر صورت گرفته است، لذا با این شرایط پژوهش حاضر برای برخی مناطق اقلیمی ایران برای شبیه‌سازی محصول گندم دیم در تاریخ‌های کشت دیرهنگام، مرسوم و زودهنگام انجام شد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در مقیاس مزرعه و با رویکرد تجربی می‌باشد که به ارزیابی دقت مدل گیاهی AquaCrop به منظور شبیه‌سازی عملکرد محصول گندم دیم براساس تاریخ کشت مرسوم برای شهرهایی با اقلیم‌های متفاوت (گرگان، مشهد، شیراز، اهواز، کرمانشاه و ارومیه) در سال‌های زراعی ۲۰۲۰-۱۹۹۱ می‌پردازد. همچنین اثر تاریخ کشت مرسوم، زودهنگام (۱۵ روز زودتر از تاریخ مرسوم) و دیرهنگام (۱۵ روز دیرتر از تاریخ مرسوم) بر عملکرد محصول مورد بررسی قرار می‌گیرد.

معرفی مناطق مورد مطالعه

اطلاعات طول و عرض جغرافیایی، ارتفاع از سطح دریا و نوع اقلیم براساس دسته‌بندی دمارتن برای مناطق مطالعاتی در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱- اطلاعات طول و عرض جغرافیایی، ارتفاع از سطح دریا و وضعیت اقلیمی ایستگاه‌های سینوپتیک مطالعاتی (مآخذ:

ایستگاه‌های سازمان هواشناسی کشور)

نام شهر	نوع اقلیم	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع از سطح دریا (متر)
گرگان	مدیترانه‌ای	۵۴° ۳۴'	۳۶° ۸۴'	۱۳۳
مشهد	خشک	۵۹° ۳۸'	۳۶° ۱۶'	۹۸۵
شیراز	نیمه‌خشک	۵۲° ۵۳'	۲۹° ۵۹'	۱۵۱۹
اهواز	خشک	۴۸° ۳۲'	۳۱° ۱۵'	۱۱
کرمانشاه	نیمه‌خشک	۴۷° ۰۹'	۳۴° ۲۱'	۱۳۱۸/۶
ارومیه	نیمه‌خشک	۴۵° ۵'	۳۷° ۴۰'	۱۳۲۸

معرفی مدل AquaCrop

مدل AquaCrop بر اساس فرآیندهای بیوفیزیکی پیچیده توسعه یافته و با توجه به مقدار آب مصرفی به شبیه‌سازی رشد گیاهان پرداخته است (Steduto et al., 2009). از مزایای اصلی این مدل، این است که برای شبیه‌سازی واکنش عملکرد محصولات به آب، به تعداد نسبتاً کمی داده‌های ورودی نیاز دارد و از شفافیت، سادگی، دقت بالا در نتایج و استحکام کافی برخوردار است (Doorenbos et al., 1979; Jin et al, 2020, Vanuytrecht et al, 2014). به‌طور کلی این مدل از رابطه ۱ پیروی می‌کند (Doorenbos et al., 1979).

$$\frac{(Y_x - Y_a)}{Y_x} = K_y \frac{(ET_x - ET_a)}{ET_x} \quad \text{رابطه (۱)}$$

در رابطه ۱، Y_x و Y_a به ترتیب نشان‌دهنده مقدار بیشینه و واقعی عملکرد محصول هستند، ET_x و ET_a به ترتیب مقدار بیشینه و واقعی تبخیر-تعرق گیاه را نشان می‌دهند، K_y ضریب نسبی میزان کاهش محصول نسبت به کاهش تبخیر-تعرق است. دو تفاوت عمده که این مدل را از سایر مدل‌ها متمایز می‌کند عبارتند از: ۱- تفکیک تبخیر و تعرق (ET) به دو بخش

تبخیر از خاک (E) و تعرق از سطح گیاه (Tr) (رابطه ۲). ۲- استفاده از شاخص سطح سایه‌انداز (CC) به جای شاخص سطح برگ (LAI)، که از مصرف غیرتولیدی آب از طریق تبخیر جلوگیری می‌کند.

$$Tr = K_s \times CC \times K_c \times ET_0 \quad \text{رابطه ۲}$$

که در آن، K_s و K_c به ترتیب ضرایب تنش آبی و گیاهی، ET_0 تبخیر و تعرق گیاه مرجع (میلیمتر) و CC توسعه پوشش تاج گیاه از زمان جوانه‌زنی تا رسیدن به مقدار بیشینه پوشش تاج (درصد) می‌باشد (رابطه ۳).

$$CC = CC_0 e^{CGC.t} \quad \text{رابطه ۳}$$

که در آن، CC_0 پوشش تاج اولیه (درصد)، CGC ضریب رشد پوشش تاج (day^{-1}) و t زمان (day) است. پارامترهای مهم که در مدل AquaCrop مورد بررسی قرار می‌گیرد، شامل عملکرد محصول (Y) و زیست توده (B) برحسب کیلوگرم (روابط ۴ و ۵)، شاخص بهره‌وری نرمال آب برحسب کیلوگرم بر مترمکعب (WP^*) و شاخص برداشت پایه (HI_0) می‌باشد. در رابطه ۵، f_{HI} ضریبی است که شاخص برداشت پایه را متعادل می‌سازد و به کمبود آب، دمای هوا، زمان و شدت تنش در طول چرخه رشد محصول بستگی دارد (Raes et al., 2009).

$$B = WP^* \times \sum_{i=1}^n \left(\frac{Tr}{ET_0} \right) \quad \text{رابطه ۴}$$

$$Y = f_{HI} \times HI_0 \times B \quad \text{رابطه ۵}$$

داده‌های مورد استفاده در پژوهش

داده‌های ورودی مدل AquaCrop7 شامل چهار بخش اصلی است: داده‌های اقلیمی، داده‌های خاک، اطلاعات گیاهی و اطلاعات مدیریتی (آبیاری و مزرعه).

داده‌های هواشناسی: به منظور استفاده از این مدل، ابتدا داده‌های اقلیمی روزانه از سازمان هواشناسی کشور برای ایستگاه‌های سینوپتیک منتخب در دوره آماری (۲۰۲۰-۱۹۹۱) گردآوری شد. مهم‌ترین داده‌های اقلیمی مورد نیاز برای مدل شامل دمای حداکثر (T_{max}) و دمای حداقل (T_{min}) برحسب درجه سانتیگراد، بارش (Rain) برحسب میلیمتر و تبخیر-تعرق مرجع (ET_0) برحسب میلیمتر بر روز می‌باشد. ET_0 با استفاده از پارامترهای هواشناسی دما، تابش، سرعت باد و رطوبت به روش فائوپنمن-مانتیث در نرم‌افزار Excel محاسبه شد (Allen et al., 1991). تمامی داده‌های اقلیمی روزانه به صورت فایل Notepad وارد نرم افزار شد. اطلاعات میانگین مقادیر برخی پارامترهای اقلیمی در دوره آماری ۳۰ ساله برای مناطق مطالعاتی در جدول ۲ آمده است.

جدول ۲- میانگین دمای حداکثر، دمای حداقل، بارش و تبخیر تعرق مرجع در دوره آماری (۱۹۹۱-۲۰۲۰) برای مناطق مطالعاتی

نام شهر	دمای حداکثر ($^{\circ}\text{C}$)	دمای حداقل ($^{\circ}\text{C}$)	بارش (میلیمتر)	تبخیر تعرق مرجع (میلیمتر بر روز)
گرگان	۲۳/۶۲	۱۲/۵۹	۵۰۵/۶۹	۴/۱
مشهد	۲۲/۴۷	۹/۳۶	۲۳۷/۷	۶/۱۸
شیراز	۲۶/۴۶	۱۰/۷۸	۳۱۳/۸۶	۶/۳۹
اهواز	۳۳/۷۶	۱۹/۴	۲۱۰/۰۹	۸/۷۲
کرمانشاه	۲۳/۹۷	۷/۱۴	۴۰۹/۳۳	۶/۶۹
ارومیه	۱۸/۴۶	۵/۳۵	۳۱۴/۳۶	۴/۴۹

اطلاعات خاک: در این پژوهش، اطلاعات بافت خاک غالب منطقه از گزارش‌های مراکز تحقیقات کشاورزی اخذ شد. نوع بافت خاک، رطوبت ظرفیت زراعی، نقطه پژمردگی دائم و نیز رطوبت اشباع برای شهرهای مطالعاتی در جدول ۳ آمده است.

جدول ۳- اطلاعات خاک مناطق مطالعاتی

نام شهر	نوع بافت خاک	درصد رطوبت ظرفیت زراعی	درصد رطوبت نقطه پژمردگی	درصد رطوبت اشباع
گرگان	لوم رس شنی	۳۰	۱۴	۴۹
مشهد	لوم سیلتی	۲۵	۱۲	۴۱
شیراز	لوم رس سیلتی	۳۲	۱۵	۴۵
اهواز	لوم رسی	۳۸	۲۳	۴۸
کرمانشاه	لوم شنی	۲۸	۱۰	۴۲
ارومیه	لوم رسی	۳۵	۱۶	۵۰

اطلاعات محصول: در این پژوهش، اطلاعات عملکرد گندم دیم برای مناطق مطالعاتی در دوره آماری (۲۰۲۰-۱۹۹۱) از گزارش‌های سامانه وزارت جهاد کشاورزی تهیه شد. همچنین با توجه به اطلاعات منطقه‌ای، تاریخ کشت مرسوم گندم برای مناطق مطالعاتی گرگان، مشهد، شیراز، اهواز، کرمانشاه و ارومیه به ترتیب ۲۰ آذر، ۱۰ آبان، ۲۰ آبان، ۳۰ آبان، ۱۰ آبان و ۳۰ مهر در نظر گرفته شد. داده‌های گیاهی به دو دسته ثابت و غیرثابت تقسیم می‌شوند. داده‌های ثابت توسط توسعه‌دهندگان مدل تعیین شده‌اند و تحت تأثیر شرایط مختلف تغییر نکرده و برای یک گیاه مشخص همواره ثابت هستند. داده‌های غیرثابت بسته به شرایط محیطی، مدیریت مزرعه و مناطق اقلیمی حتی برای یک گیاه مشخص، تغییر کرده و می‌بایست از طریق انجام آزمایش‌های مزرعه‌ای به دست آیند (Andarzian, et al., 2011). برخی اطلاعات مورد نیاز گیاه گندم، ثابت می‌باشد (جدول ۴) و برخی دیگر با استفاده از فرآیند واسنجی با مقداری تغییرات برای مناطق مطالعاتی تنظیم شد (سلطانی و سیستانی، ۱۴۰۳؛ امداد و تافته، ۱۳۹۹).

جدول ۴- اطلاعات ورودی ثابت گیاه گندم در مناطق مطالعاتی

Parameters	Unit	Value
(T _{Base})	C ⁰	30
(T _{upper})	C ⁰	0
(Root deepening)	m	1.07
(Kc _{Tr})	-	1.1
weight of 1000-grains	gr	40
Seeding	Cm ² /plant	5
Plant density	Plants/m ²	17.4
(P _{upper})	-	0.25
(P _{lower})	-	0.55

اطلاعات مدیریتی: در این پژوهش، شبیه‌سازی عملکرد محصول گندم تحت شرایط کشت دیم (بدون آبیاری)، خاک مناسب، میزان رواناب و نفوذ عمقی صفر انجام گردید.

آنالیز حساسیت، واسنجی و صحت‌سنجی مدل

به طور معمول قبل از اقدام به واسنجی مدل، می‌بایست آنالیز حساسیت مدل نسبت به تغییرات پارامترهای ورودی بررسی شود (جرعه نوش و همکاران، ۱۳۹۸). بر طبق نتایج پژوهش‌های پیشین، از تغییر پارامترهایی که درجه حساسیت مدل به آن کم بود، صرف نظر شد و در این پژوهش فقط برخی پارامترهای گیاهی که درجه حساسیت مدل به آن بالا بوده است،

تغییر یافت (به جدول ۵ در بخش نتایج و بحث مراجعه شود) (سلطانی سیستانی و همکاران، ۱۴۰۳). هدف از واسنجی مدل، تنظیم برخی ورودی‌های گیاهی (جدول ۵ در بخش نتایج و بحث) به گونه‌ای می‌باشد که مقادیر پیش‌بینی شده پارامترهای خروجی نرم افزار نظیر عملکرد محصول توسط مدل با مقادیر مشاهداتی آن حداقل اختلاف را داشته باشند. تغییرات پارامترهای ورودی باید در محدوده مجاز طبق دستورالعمل‌های مدل باشد و نباید به اندازه‌ای گسترده باشد که دقت نتایج تنها در شرایط خاص معتبر باشد و با تغییر شرایط، مدل نتایج نامناسبی ارائه دهد (Allen et al., 1998). صحت‌سنجی در اصل آزمودن مستقل مدل است، در مرحله‌ای که برآوردهای مدل با داده‌هایی که در واسنجی استفاده نشده است، آزموده می‌شود. هدف از صحت‌سنجی مدل اطمینان از کیفیت و ظرفیت برآوردهای مدل به وسیله مقایسه با داده‌های مزرعه‌ای است. به همین منظور در این پژوهش از دوره آماری ۳۰ ساله، سال‌های آماری ۱۹۹۱، ۱۹۹۵، ۱۹۹۹، ۲۰۰۳، ۲۰۰۷، ۲۰۱۱، ۲۰۱۵ و ۲۰۱۹ برای واسنجی و مابقی سال‌های آماری برای صحت‌سنجی به صورت تصادفی انتخاب گردید. از آنجا که تنها پارامتر مشاهداتی موجود عملکرد محصول بود، لذا واسنجی و صحت‌سنجی مدل فقط براساس عملکرد محصول گندم دیم در سال‌های آماری صورت گرفت. در نهایت، می‌بایست خطای نسبی بین عملکرد مشاهداتی از مزرعه و عملکرد شبیه‌سازی شده حداقل گردد.

شاخص‌های آماری

در این پژوهش، برای ارزیابی کارایی مدل از چندین شاخص آماری استفاده شده است. ضریب تبیین (R^2) یکی از مهمترین معیارهای ارزیابی ارتباط میان مقادیر پیش‌بینی و اندازه‌گیری شده می‌باشد که به صورت بی‌بعد نمایش داده می‌شود. مقدار R^2 ، بین عدد صفر تا ۱ متغیر است و هرچه مقدار آن به یک نزدیکتر باشد، نشان‌دهنده همبستگی قوی و برازش ایده‌آل داده‌ها می‌باشد. ریشه میانگین مربعات خطای نرمال (NRMSE) عدم اطمینان مدل را نشان می‌دهد که مقدار ۱۰ درصد، ۱۰ تا ۲۰ درصد و ۲۰ تا ۳۰ درصد به ترتیب نشانگر وضعیت عالی، مناسب و متوسط مدل در شبیه‌سازی است و زمانی که مقدار این ضریب بیش از ۳۰ درصد باشد، نشان‌دهنده عدم اطمینان از مدل است. ضریب باقیمانده CRM یک شاخص بدون بعد بوده و بیانگر تمایل مدل برای بیش‌برآورد (مقادیر منفی) و یا کم‌برآورد (مقادیر مثبت) در مقایسه با اندازه‌گیری‌ها می‌باشد (Legates and McCabe, 1999; Willmott, 1982). در معادلات شاخص‌های نامبرده (روابط ۶ تا ۸)، O_i و P_i به ترتیب مقادیر مشاهدات و برآوردها، (\bar{O}) و (\bar{P}) میانگین مقادیر و n تعداد مشاهدات است. در این پژوهش تعداد مشاهدات در مرحله واسنجی ۸ سال و در مرحله صحت‌سنجی ۲۲ سال می‌باشد.

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O})]^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2 \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad \text{رابطه (۶)}$$

$$NRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \times \frac{100}{\bar{O}} \quad \text{رابطه (۷)}$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad \text{رابطه (۸)}$$

تغییر تاریخ کشت

تغییر تاریخ کشت و تغییر اقلیم قادر به تأثیرگذاری بر فنولوژی گیاه هستند. با این حال، در مطالعاتی که هدف اصلی آن‌ها تحلیل فنولوژی نیست و تمرکز بر بررسی اثرات مستقل تاریخ کشت یا تغییر اقلیم بر رشد و عملکرد محصول است، معمولاً طول دوره رشد گیاه ثابت فرض می‌شود. این رویکرد امکان بررسی تأثیر مستقیم این عوامل را بدون پیچیدگی‌های ناشی از تغییرات فنولوژیک فراهم می‌کند. بنابراین، در این پژوهش طول دوره رشد ثابت در نظر گرفته شد و پس از ارزیابی دقت مدل

AquaCrop7.1 و شبیه‌سازی عملکرد محصول بر اساس تاریخ کشت مرسوم در مناطق مطالعاتی، اثر تغییر تاریخ کشت بررسی شد. تغییر تاریخ کشت شامل ۱۵ روز زودتر و ۱۵ روز دیرتر از تاریخ مرسوم بود و میانگین عملکرد محصول مدل طی سال‌های زراعی محاسبه شد. با توجه به تاریخ کشت مرسوم، تاریخ کشت زود هنگام برای شهرهای مطالعاتی گرگان، مشهد، شیراز، اهواز، کرمانشاه و ارومیه به ترتیب ۵ آذر، ۲۵ مهر، ۵ آبان، ۱۵ آبان، ۲۵ مهر و ۱۵ مهر بود. تاریخ کشت دیر هنگام نیز برای شهرهای مطالعاتی به ترتیب ۵ دی، ۲۵ آبان، ۵ آذر، ۱۵ آذر، ۲۵ آبان و ۱۵ آبان بود. در نهایت عملکرد بدست آمده از تاریخ کشت مرسوم با عملکرد بدست آمده از تاریخ کشت زود هنگام و دیر هنگام مقایسه شد.

نتایج و بحث

همانطور که در بخش مواد و روش‌ها در این مقاله گفته شد، برخی داده‌های ورودی گیاهی در فرایند واسنجی مدل تغییر یافت و تنظیم شد. به ازای مقادیر پارامترهای گیاهی که در جدول ۵ آمده است، عملکرد محصول خروجی از مدل و عملکرد مشاهداتی از مزرعه (بر اساس تاریخ کشت مرسوم)، کمترین اختلاف را دارند. سپس دقت مدل با بررسی شاخص‌های آماری ارزیابی شد.

جدول ۵- اطلاعات ورودی واسنجی شده گیاه در مناطق مطالعاتی

Parameters	Unit	Gorgan	Mashhad	Shiraz	Ahvaz	Kermanshah	Urmia
(CCo)	%	0.87	0.87	0.88	0.88	0.88	0.88
(CCx)	%	80	81	81	80	82	82
(CGC)	%/days	5.5	5.4	5	8.3	5.6	3.3
(CDC)	%/days	9.7	8.8	9.1	10	7.2	10
Canopy desline	days	30	33	28	28	39	28
(to emergence)	days	16	11	24	10	15	18
(To maturity)	days	187	202	196	144	210	245
(to Flowering)	days	147	138	167	100	153	201
(to maximum canopy cover)	days	139	122	145	96	132	185
(to maximum rooting depth)	days	115	100	133	95	121	147
To start of canopy senescence	days	158	150	180	115	170	216
Duration of flowering	days	11	13	12	12	15	13
(Length building up HIo)	days	41	45	45	43	56	68
(HIo)	%	30	32	23	24	26	28
(WP*)	gr/m ²	13	17	11	10	13	12

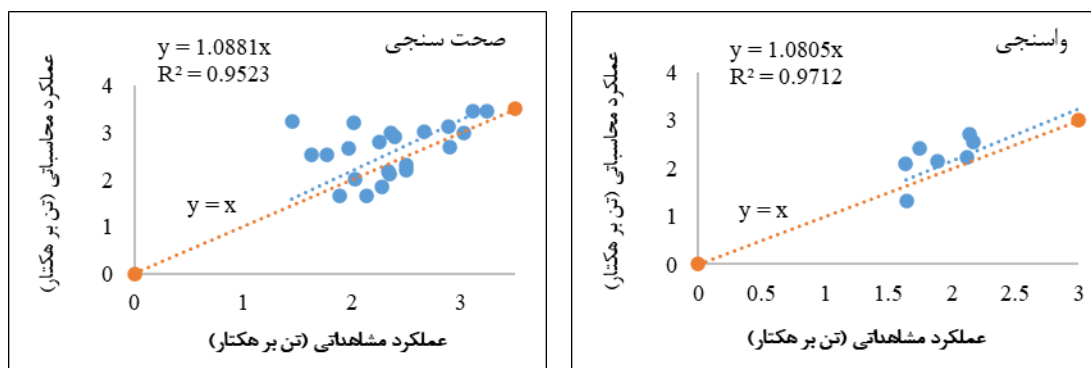
ارزیابی دقت مدل

شاخص‌های آماری بر اساس عملکرد محصول برای تمامی شهرهای مطالعاتی در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی در جدول ۶ ارائه شده است. در این پژوهش مقادیر ریشه میانگین مربعات خطای نرمال (NRMSE) برای تمامی شهرها در هر دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی مدل کمتر از ۳۰ درصد است که نشان از مطمئن بودن مدل در شبیه‌سازی عملکرد محصول می‌باشد. بیشترین میزان NRMSE متعلق به شهر اهواز (واسنجی) و مشهد (صحت‌سنجی) می‌باشد. همچنین کمترین میزان NRMSE متعلق به شهر گرگان (واسنجی) و ارومیه (صحت‌سنجی) می‌باشد. همچنین میزان شاخص R^2 برای تمامی شهرها بالای ۹۵ درصد می‌باشد که بر اساس مطالعات و گزارش‌های انجام شده در نرم‌افزار AquaCrop، هر چه مقدار همبستگی به ۱ نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده عملکرد بهتر و دقت بالاتر مدل است (Raes et al., 2012; Steduto et al., 2009). همچنین مقدار منفی آماره ضریب باقیمانده (CRM) نیز تمایل به بیش‌برآوردی مدل در مقایسه با مقادیر مشاهداتی را تأیید می‌نماید.

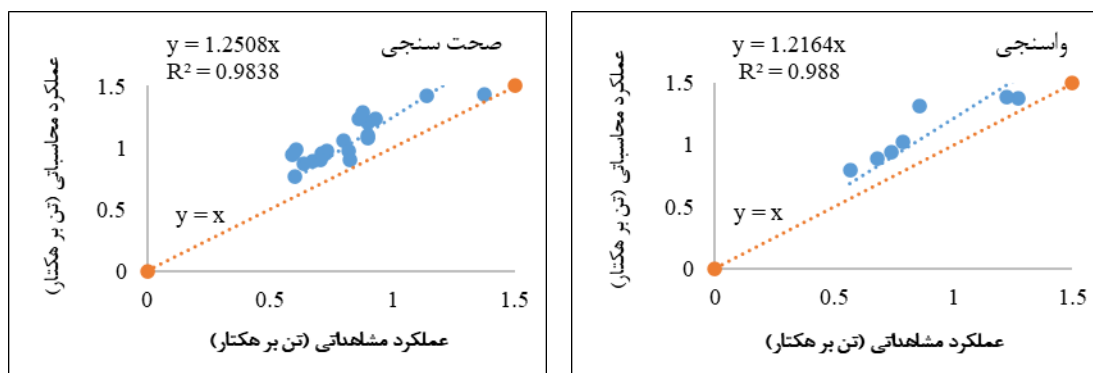
جدول ۶- مقادیر شاخص‌های آماری حاصل از واسنجی و صحت‌سنجی مدل Aqua crop بر اساس عملکرد محصول در شهرهای

مطالعاتی				
نام شهر	مراحل ارزیابی	R ²	NRMSE	CRM
گرگان	واسنجی	۰/۹۷	۲۰/۷۸	-۰/۱
	صحت‌سنجی	۰/۹۵	۲۶/۴۱	-۰/۱۱
مشهد	واسنجی	۰/۹۸	۲۶/۵۴	-۰/۲۴
	صحت‌سنجی	۰/۹۸	۳۰	-۰/۲۸
شیراز	واسنجی	۰/۹۶	۲۶/۵۶	-۰/۱۴
	صحت‌سنجی	۰/۹۶	۲۴/۰۲	-۰/۰۹
اهواز	واسنجی	۰/۹۸	۲۹/۸	۰/۲۹
	صحت‌سنجی	۰/۹۵	۲۰/۸۴	۰/۰۲۶
کرمانشاه	واسنجی	۰/۹۷	۲۸/۷	-۰/۲۲
	صحت‌سنجی	۰/۹۵	۲۱/۴۹	-۰/۰۴
ارومیه	واسنجی	۰/۹۶	۲۷/۹۳	۰/۲۳
	صحت‌سنجی	۰/۹۷	۱۷/۰۲	۰/۰۷۵

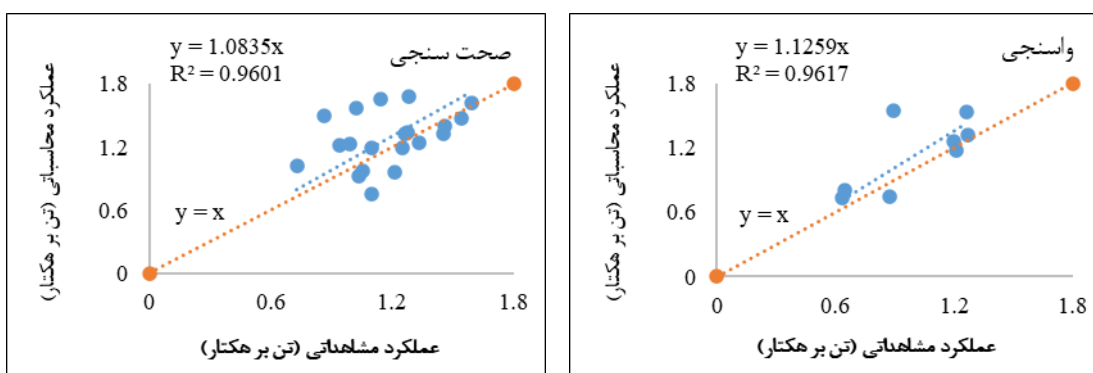
نمودار پراکندگی مقادیر مشاهداتی و محاسباتی طی مراحل واسنجی و صحت‌سنجی برای محصول گندم در شهرهای گرگان، مشهد، شیراز و کرمانشاه، در شکل (۱، ۲، ۳ و ۴) آورده شده است. بالا بودن مقادیر R² در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی در تمامی ایستگاه‌های مطالعاتی، نشان‌دهنده نزدیک بودن مقادیر محاسباتی مدل و مقادیر مشاهداتی مزرعه و پراکندگی ناچیز آنها حول یک خط (y=x) و برازش خوب مدل است. برخی پژوهش‌ها ضرایب تبیین کمتر و برخی بیشتری را برای شبیه‌سازی عملکرد با مدل AquaCrop گزارش کرده‌اند که این تفاوت احتمالاً می‌تواند به دلیل تفاوت در نوع گیاه مورد بررسی، شرایط اقلیمی و یا مدیریت زراعی-آبیاری باشد (توراج زاده و همکاران، ۱۴۰۳). همانطور که در نمودارها مشخص است، مقایسه بین مقادیر مشاهداتی مزرعه و محاسباتی مدل برای شبیه‌سازی عملکرد محصول گندم در این شهرها در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی تمایل به بیش‌برآوردی دارد.



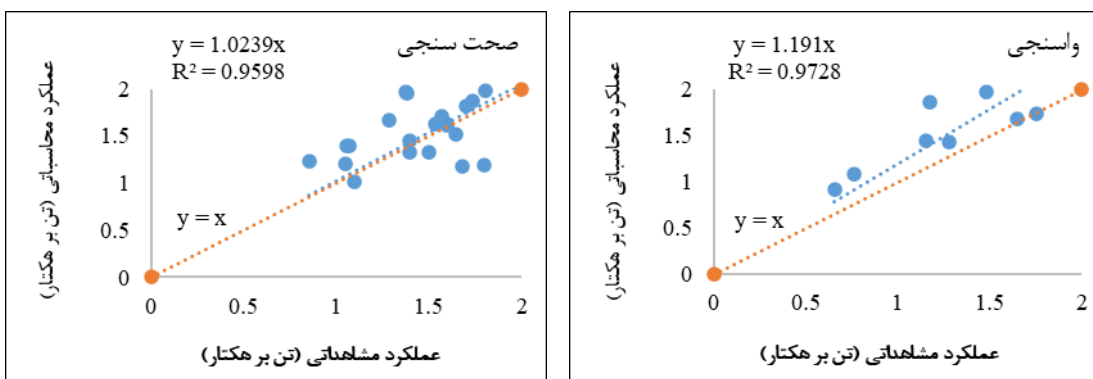
شکل ۱- نمودار مقایسه عملکرد مشاهداتی از مزرعه و محاسباتی از مدل برای محصول گندم در شهر گرگان



شکل ۲- نمودار مقایسه عملکرد مشاهداتی از مزرعه و محاسباتی از مدل برای محصول گندم دیم در شهر مشهد



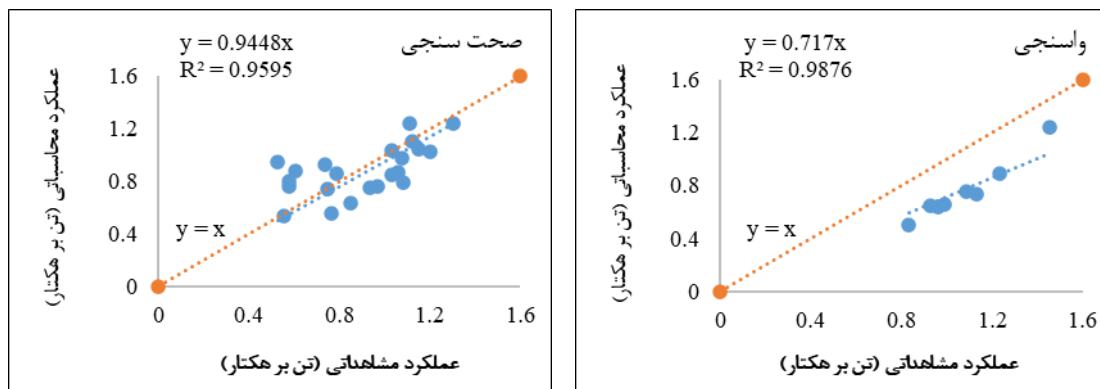
شکل ۳- نمودار مقایسه عملکرد مشاهداتی از مزرعه و محاسباتی از مدل برای محصول گندم دیم در شهر شیراز



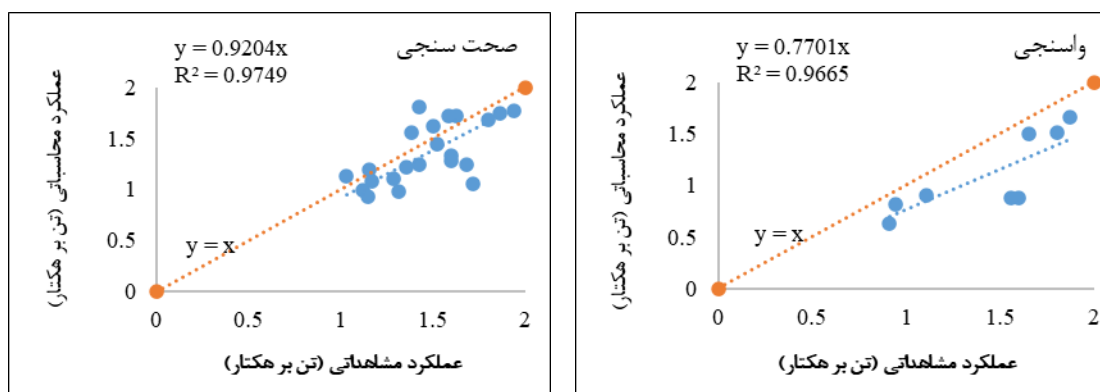
شکل ۴- نمودار مقایسه عملکرد مشاهداتی از مزرعه و محاسباتی از مدل برای محصول گندم دیم در شهر کرمانشاه

مقایسه عملکردهای به دست آمده از مدل و عملکردهای اندازه گیری شده در مراحل واسنجی و صحت سنجی در مزارع شهر اهواز و ارومیه (شکل های ۵ و ۶) نشان از کم برآوردی ناچیز مدل در پیش بینی عملکرد محصول دارد. این کم برآوردی می تواند ناشی از دلایل مختلفی باشد، از جمله مقادیر برخی پارامترهای ورودی، شرایط محلی خاص مزرعه، یا محدودیت های مدل در شبیه سازی دقیق برخی فرایندها مانند تنش های آب و دما. مطالعات پیشین نشان داده اند که مدل AquaCrop معمولاً در شرایطی که داده های ورودی دقیق و کالیبره نشده باشند، عملکرد محصول را کمتر از مقدار واقعی پیش بینی می کند (Steduto

(et al., 2009; Raes et al., 2012). این موضوع به حساسیت بالای مدل نسبت به پارامترهایی مانند ضریب تبخیر و تعرق، ظرفیت نگهداری آب خاک و پارامترهای گیاهی بستگی دارد (Hsiao et al., 2009). با این حال، عملکرد دقیق تر مدل در شرایطی که واسنجی مناسب انجام گرفته باشد، بارها تأیید شده است. در این مطالعات، زمانی که از داده‌های محلی دقیق و مناسب استفاده شده است، تفاوت میان عملکرد شبیه‌سازی شده و واقعی به میزان قابل توجهی کاهش یافته است (Heng et al., 2009). در نمودارهای شکل ۵ و ۶ نیز بهترین معادله رگرسیونی رسم گردید و مقادیر بالای شاخص R^2 تایید شد.



شکل ۵- نمودار مقایسه عملکرد مشاهداتی از مزرعه و محاسباتی از مدل برای محصول گندم در شهر اهواز

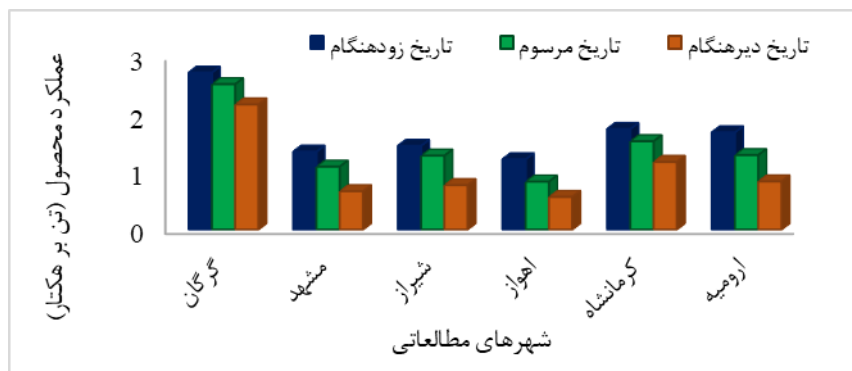


شکل ۶- نمودار مقایسه عملکرد مشاهداتی از مزرعه و محاسباتی از مدل برای محصول گندم در شهر ارومیه

در این پژوهش، میانگین مقادیر مشاهداتی عملکرد محصول در تاریخ کشت مرسوم به ترتیب برابر با ۲/۲۷، ۰/۸۶، ۱/۱۵۲، ۰/۹۴، ۱/۴ و ۱/۵۳ تن بر هکتار بوده است. در مقایسه، مقادیر شبیه‌سازی شده توسط مدل AquaCrop در تاریخ کشت مرسوم برای شهرهای مذکور به ترتیب برابر با ۲/۵۲، ۱/۰۹، ۱/۲۸، ۰/۸۳، ۱/۵۳ و ۱/۲۹ تن بر هکتار برآورد شده است. لذا بیشترین درصد اختلاف بین مقادیر مشاهداتی و شبیه سازی شده متعلق به شهر مشهد (۲۷/۳۸ درصد) و کمترین مقدار اختلاف متعلق به شهر کرمانشاه (۹/۰۸ درصد) می‌باشد. نتایج پژوهش حاضر با نتایج پژوهش علیزاده دیزج و ابراهیمیان (۱۳۹۶)، مجرد و همکاران (۱۳۹۷) و سلطانی سیستانی و همکاران (۱۴۰۳)، همخوانی داشت.

ارزیابی اثر تغییر تاریخ کشت بر عملکرد محصول

نتایج عملکرد حاصل از تاریخ کشت مرسوم و تاریخ کشت زود هنگام و دیر هنگام، برای مناطق مطالعاتی در طی سال‌های آماری به صورت نمودار در شکل ۷ آمده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، عملکرد در تاریخ کشت زود هنگام، بیشتر از عملکرد در تاریخ مرسوم و عملکرد در تاریخ مرسوم بیشتر از عملکرد در تاریخ کشت دیر هنگام شد. در تاریخ کشت زود هنگام عملکرد محصول برای شهرهای گرگان، مشهد، شیراز، اهواز، کرمانشاه و ارومیه به ترتیب برابر با ۲/۷۲۱، ۱/۳۴۹، ۱/۴۵، ۱/۲۱۷، ۱/۷۴۲ و ۱/۶۸۳ تن بر هکتار بدست آمد. تاریخ کشت زود هنگام با شرایط اقلیمی مساعدتر، شامل دمای بهینه و بارش کافی در طول دوره رشد، همراه بودند. این شرایط موجب افزایش فتوسنتز، توسعه بهتر سیستم ریشه‌ای، بهره‌وری بالاتر مواد آلی و رطوبت خاک شد. علاوه بر این، نتایج نشان می‌دهد که کشت زود هنگام فرصت طولانی‌تری برای رشد برگ و شاخه‌ها، افزایش تراکم و سطح برگ و بهبود توسعه ساختار گیاه فراهم کرد که نهایتاً به عملکرد بالاتر محصول منجر گردید. در شرایط کشت دیر هنگام، عملکرد گیاه کاهش یافت، که علت آن می‌تواند عدم دریافت کافی تابش خورشیدی به دلیل تراکم سایه‌انداز برگ‌ها، کاهش دمای مناسب در مراحل اولیه رشد، بهره‌برداری کم از منابع آب و مواد مغذی و محدود شدن فرصت رشد ریشه باشد. بایگی و همکاران (۱۳۹۶) نیز در پژوهشی اعلام کردند که عملکرد گندم در نیشابور تحت تاریخ کشت ۲۰ مهر نسبت به تاریخ کشت ۲۰ آبان و ۲۰ آذر دارای بیشترین مقدار است؛ که نتایج پژوهش حاضر با آن مطابقت داشت. اما طی پژوهش یوسفی و همکاران (۱۳۹۷) در استان خراسان شمالی، تاریخ کشت ۱۰ آبان بهتر از تاریخ کشت ۱۰ مهر و ۱۰ آذر معرفی شد و دلیل آن درجه حرارت مطلوب، رطوبت بیشتر خاک و استقرار مناسب گیاه گندم در تاریخ کشت منتخب بود.



شکل ۷- نمودار مقایسه میانگین عملکرد گندم در دوره آماری ۳۰ ساله تحت تاریخ کشت‌های مرسوم، زود هنگام و دیر هنگام در شهرهای مطالعاتی

نتیجه‌گیری

این مطالعه با در اختیار داشتن اطلاعات اقلیمی روزانه (دمای بیشینه و کمینه، بارش و تبخیر-تعرق مرجع) و اطلاعات عملکرد محصول گندم در طی سال‌های آماری ۱۹۹۱ تا ۲۰۲۰ در مزارع شهرهای گرگان، مشهد، شیراز، اهواز، کرمانشاه و ارومیه، ارزیابی دقت نسخه هفتم مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد محصول گندم بر اساس تاریخ کشت مرسوم را مورد هدف قرار داد. همچنین عملکرد محصول در تاریخ کشت زود هنگام و دیر هنگام نیز شبیه‌سازی شد و در نهایت عملکردهای تاریخ‌های مختلف مورد مقایسه قرار گرفت. طبق تحلیل آماری دقت مدل، اختلاف بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده

در تمامی شهرها کمتر از ۳۰ درصد بود. مقدار ضریب تبیین در تمامی شهرها در هر دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی بالای ۹۵ درصد بوده است، که بیانگر دقت قابل قبول مدل در پیش‌بینی عملکرد محصول است. مقادیر منفی CRM در شهرهای گرگان، مشهد، شیراز و کرمانشاه نشان از بیش‌برآوردی مدل بود، اما مقادیر مثبت CRM در دو شهر اهواز و ارومیه به کم‌برآوردی مدل اشاره داشت. نتایج این پژوهش نشان داد که تاریخ کشت زود هنگام و یا دیر هنگام می‌تواند بر عملکرد محصول تأثیرگذار باشد. در شرایط تاریخ کشت زود هنگام، عملکردهای محصول نسبت به شرایط تاریخ کشت مرسوم افزایش یافت. این نتایج می‌تواند به کشاورزان و مدیران کمک کند تا تصمیمات آگاهانه‌تری در مورد مدیریت منابع آب، انتخاب تاریخ کشت و استراتژی‌های کشاورزی بگیرند. همچنین توسعه مدل‌های دقیق‌تر و بهبود عوامل واسنجی می‌تواند به افزایش کارایی این ابزار در مدیریت پایدار منابع کشاورزی کمک کند.

منابع

- امداد، م.، تافته، آ.، غالبی، س. ۱۳۹۷. اعتبارسنجی مدل آکواکراپ در شبیه‌سازی عملکرد گندم متأثر از تعداد نوبت‌های آبیاری. *نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)*. ۳۲(۳): ۴۷۳-۴۶۳.
- امداد، م.، تافته، آ. ۱۳۹۹. مقایسه کارایی مدل *Aquacrop* و *Saltmed* در شبیه‌سازی عملکرد گندم و شوری خاک در حمیدیه خوزستان. *مجله پژوهش آب/ایران*. ۱۴(۱): ۱۶۳-۱۵۳.
- بایگی، ز.، سیف‌زاده، س.، شیرانی‌راد، ا. ح.، ولدآبادی، س. ع.، جعفرنژاد، ا. ۱۳۹۶. بررسی اثرات تاریخ کاشت بر شاخص‌های رشد و عملکرد و اجزای عملکرد ارقام گندم بهاره در نیشابور. *نشریه پژوهش‌های کاربردی زراعی*. ۳۰(۲): ۱۸-۱.
- توراج زاده، ا.، پیری، ح.، براتی، م. ۱۴۰۳. تحلیل حساسیت و ارزیابی مدل آکوکراپ در شبیه‌سازی بهره‌وری مصرف آب و عملکرد کینوا تحت مدیریت‌های مختلف مقدار و شوری آب آبیاری و کاربرد بیوجار و نانوبیوجار. *نشریه علمی پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*. ۳۱(۱): ۲۵-۱.
- جرعه‌نوش، م.، ه.، برومندنسب، س.، ناصری، ع.، پاک پرور، م.، تقواییان، ص. ۱۳۹۸. ارزیابی مدل آکوکراپ در شبیه‌سازی عملکرد گندم و تعیین تاریخ کشت در استان فارس. *مدیریت آب و آبیاری*. ۹(۱): ۹۵-۱۰۷.
- جرعه‌نوش، م.، اگدرنژاد، ا.، شاه‌رخ‌نیا، م.، ابراهیمی‌پاک، ن. ۱۴۰۳. ارزیابی مدل *AquaCrop* برای شبیه‌سازی عملکرد گیاه گندم تحت سناریوهای مختلف مدیریت زراعی در قزوین. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*. ۴(۱): ۱۶-۱. DOI: 10.22098/mmws.2023.12533.1248
- خسروی، ح.، اکبری، ن.، دانشور، م.، علی‌اکبرپور، ا.، رحیمی‌مقدم، س. ۱۴۰۱. بررسی اثرات تاریخ کاشت و رقم بر صفات فیزیولوژیک و عملکرد دانه گندم آبی (*Triticum aestivum L.*) در شرایط آب و هوایی خرم‌آباد. *مجله فیزیولوژی گیاهان زراعی*. ۱۴(۵۵): ۵۶-۳۹.
- سلطانی سیستانی، م.، انصاری، ح.، داوری، ک.، ناقدی‌فر، س. م. ۱۴۰۳. ارزیابی مناطق مناسب کاشت گیاه گندم، ذرت، چغندر قند و گوجه‌فرنگی در اقلیم‌های مختلف ایران با توجه به اثرات تغییر اقلیم به کمک نرم‌افزار آکوکراپ، *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*. ۵۵(۸): ۱۴۵۰-۱۴۳۳.

- علیزاده دیزج، ا.، ابراهیمیان، ح. ۱۳۹۶. بررسی اثر آبیاری تکمیلی و تاریخ کاشت بر بهره وری فیزیکی و اقتصادی آب مصرفی گیاهان گندم و جو در شرایط دیم ارومیه. نشریه زراعت دیم/ایران. ۶(۲): ۲۴۷-۲۶۸.
- قمری، ع.، خرمی وفا، م.، نصرتی، ا.، ذوالنوریان، ح. ۱۴۰۰. اثر تاریخ کاشت بر عملکرد دو رقم سیب زمینی در شرایط آب و هوایی کرمانشاه. نشریه علوم گیاهان زراعی ایران. ۵۳(۴): ۱۶۴-۱۴۹.
- مجرد، ف.، فرهادی، ب.، الفتی، ژ. ۱۳۹۷. شبیه سازی عملکرد و تعیین تاریخ کاشت گندم دیم و آبی بر مبنای عوامل اقلیمی و محیطی در استان کرمانشاه با مدل آکواکراپ. نشریه علمی و پژوهشی جغرافیا و برنامه ریزی. ۲۲(۶۶): ۲۷۱-۲۵۱.
- یوسفی مقدم، ر.، خرم دل، س.، بنایان اول، م.، نصیری محلاتی، م. ۱۳۹۷. مقایسه ارقام قدیم و جدید گندم دیم در واکنش به تغییر تاریخ کاشت. نشریه پژوهش های کاربردی زراعی. ۳۱(۲): ۷۲-۴۶.

- Alizadeh Dizaj, A., Ebrahimian, H. 2018. Effect of supplementary irrigation and planting date on the physical and economic water productivity of wheat and barley plants under Urmia dryland conditions. *Irrigation Dryland Agronomy Journal*. 6(2): 247-262(In Persian).
- Andarzian, B., Bannayan, M., Steduto, P., Mazraeh, H., Barati, M. E., Barati, M. A and Rahnema, 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.
- Ahmadi, K., Gholizadeh, H., Ebadzadeh, H., Hosseinpour, R., Abdshah, H., Kazemian, A., & Rafiei, M. 2017. Agricultural statistics (crops). *Ministry of Agriculture* 1: 5-20(In Persian).
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M. 1998. Crop Evapotranspiration – Guidelines for Computing Crop Water Requirements. *FAO Irrigation and Drainage*. Paper No. 56, FAO, Rome.
- Allen, R.G., Pruitt, W.O. 1991. FAO-24 Reference evapotranspiration factors. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 117(5): 758-773.
- Araya, A., Vara Prasad, P., Ciampitti, IA., Rice, CW., Gowda, PH. 2022. Using crop simulation models as tools to quantify effects of crop management practices and climate change scenarios on wheat yields in northern Ethiopia. Enhancing agricultural research and precision management for subsistence farming by integrating system models with experiments 20(1): 29-47.
- Baygi, Z., Saifzade, S., Shirani Rad, A.H., Valadabad, S.A., Jafarinejad, A. 2017. Effects of planting date on growth indices and yield and yield components of spring wheat cultivars in Neyshabur. *Applied Field Crops Research*. 30(2): 1-18 (In Persian).
- Doorenbos, J., Kassam, A.H., Bentvelsen, C.L.M.V., Branscheid, J.M.G.A., Plusje, M., Smith, G.A. Uittenbogard, and Vanderwal, H.K. 1979. Yield response to water. *Irrigation and Drainage*. Paper No. 33. FAO, Rome, Italy, 193 pp.
- Emdad, M.R., Tafteh, A., Ghalebi, S. 2018. Validation of Aquacrop model for simulating wheat yield in different irrigation events. *Journal of Water and Soil*. 32(3): 463-473(In Persian).
- Emdad, M.R., Tafteh, A., & Ebrahimipak, N. 2022. Efficiency of Aquacrop Model in Simulating Yield of Quinoa in Different Deficit Irrigation Managements. *Journal of Water and Soil*. 36 (3): 319-331. [In Persian].
- Ghamari, A., Khoramivafa, M., Nosratti, I., Zolnuriyan, H. 2023. Effects of planting date on two cultivars of potato yield in Kermanshah climatic conditions. *Iranian Journal Of Field Crop Science*. 53(4): 149-164 (In Persian).
- He, B., Li, X., Quan, X., Qiu, S. 2015. Estimating the aboveground dry biomass of grass by assimilation of retrieved LAI into a crop growth model. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens*. 8: 550-561.

- Hsiao, T.C., Heng, L.K., Steduto, P., & Raes, D. 2009. AquaCrop—The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: II. Main Algorithms and Software Description. *Agronomy Journal*, 101(3): 438–447.
- Heng, L.K., Hsiao, T.C., Evett, S., Howell, T., & Steduto, P. 2009. Validating the FAO AquaCrop Model for Irrigated and Water Deficient Field Maize. *Agronomy Journal*. 101(3): 488–498.
- Jorenush, M.H., Boroomand Nasab, S., Naseri, A.A., Pakparvar, M., Taghvaeian, S. 2019. AquaCrop evaluation to simulate wheat production and planting date in Fars province. *Journal of Water and Irrigation Management*. Conservation. 9(1): 95-107(In Persian).
- Jorenush, M.H., Egdernezhad, A., Shahrokh Nia, M.A., Ebrahimipak, N.A. 2024. Evaluation of AquaCrop model for simulation of Wheat plant (Triticum) yield under different scenarios of agricultural management in Qazvin. *Water and Soil Management and Modeling*. 4(2): 1-16.
- Jin, X., Li, Z., Feng, H., Ren, Z., & Li, S. 2020. Estimation of maize yield by assimilating biomass and canopy cover derived from hyperspectral data into the AquaCrop model. *Agricultural Water Management*. 227, 105846.
- Khosravi, H., Akbari, N., Daneshvar, M., Akbarpour, O A., Rahimi moghadam, S. 2022. Investigation of the effects of planting date and cultivar on physiological traits and grain yield of irrigated wheat (*Triticum aestivum* L.) in Khorramabad climate. *Crop Physiology Journal*. 14(55): 39-56 (In Persian).
- Legates, D.R., McCabe, G.J. 1999. Evaluating the use of “goodness-of fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Research*. 35: 233–241.
- Mojarrad, F., Farhadi, B., Olfati, ZH. 2019. Simulation of Yield and Determination of Planting Date of Rainfed and Irrigated Wheat Based on Climatic and Environmental Factors in Kermanshah Province by AquaCrop Model. *Journal of Geography and Planning*. 22(66). 251-271(In Persian).
- Mustafa, M., Mabhaudhi, T., Avvari, M.V., Massawe, F. 2020. Transition toward sustainable food systems: A holistic pathway toward sustainable development. In *Food Security and Nutrition*; Galanakis, C., Ed.; Academic Press: London, UK; pp. 44–45.
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C., & Fereres, E. 2009. AquaCrop—The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: II. *Main Algorithms and Software Description*. *Agron. J.*, 101: 438-447.
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C., & Fereres, E. 2012. AquaCrop Version 4.0 – Reference Manual. FAO, Rome.
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C., & Fereres, E. 2018. , Chapter 1: FAO crop-water productivity model to simulate yield response to water: AquaCrop: Version6.0-6.1: Reference manual (pp. 19). *Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome*.
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C., & Fereres, E. 2018. Chapter 2: User Guide. In *AquaCrop Version 6.0-6.1* (pp. 314). FAO. Reference Manual. *Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome*.
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C., & Fereres, E. 2018. Chapter 3: Calculation Procedures. In *AquaCrop Version 6.0-6.1* (pp. 141). FAO. Reference Manual. *Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome*.
- Shahin. M.G, Saady, H.S., El-Bially, M.E., Abd El-Momen, W.R., El-Gabry, Y.A., Abd El-Samad, G.A., Sayed, A.N. 2023. Physiological and Agronomic Responses and Nutrient Uptake of Soybean Genotypes Cultivated Under Various Sowing Dates. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 23: 5145–5158.
- Soltani Sistani, M., Ansari, H., Davari, K., & Naghedifar, S.M.R. 2024. Assessment of suitable areas for cultivation of wheat, corn, sugar beet, and tomato in different climates of Iran considering the climate change effects using AquaCrop model, *Iranian Journal of Soil and Water Research*. 55 (8): 1433-1450 (In Persian).
- Steduto, P., Hsiao, T. C., Raes, D., & Fereres, E. 2009. AquaCrop—The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: I. Concepts and Underlying Principles. *Agronomy Journal*. 101(3): 426–437.

- Toorajzadeh, O., Piri, H., Barati, M. 2024. Sensitivity analysis and evaluation of Aquacrop model in simulating water productivity and quinoa yield under different irrigation water amount and salinity management and Biochar and NanoBiochar application. *Journal of Water and Soil Conservation*. Volume 31, issue 1: 1-25. (In Persian).
- Vanuytrecht, E.; Raes, D.; Steduto, P.; Hsiao, T.C.; Fereres, E.; Henge, L.K.; Vila, M.G.; Moreno, P.M. 2014. AquaCrop: FAO's crop water productivity and yield response model. *Environ. Model. Softw.* 62: 351–360.
- Willmott, C.J. 1982. Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin of the American Meteorological Society*. G3: 1309- 1313.
- Yousefi, R., Bannayan Aval, M., Khorramdel, S., Nassiri Mahallati, M. 2018. Comparison of old and new dryland wheat cultivars in response to different planting dates. *Applied Field Crops Research*. 31(2): 46-72(In Persian).
- Zhang, C., Xie, Z., Wang, Q., Tang, M., Feng, S., Cai, H. 2022. AquaCrop modeling to explore optimal irrigation of winter wheat for improving grain yield and water productivity. *Agricultural Water Management*. 266: 107580