Lorestan University

**Applied Researches in Water Engineering**
Vol. 2, No. 2, Autumn & Winter 2024, p. 159-170

ARWE

Original Research

# Calibration and validation of the AquaCrop plant model to simulate biomass and grain yield of Sirvan wheat cultivar

**Fatemeh Hajiabadi[*1], Farzad Hassanpour[2], Mostafa Yaghoobzadeh[3], Hossein Hammami[4]**

1. Department of Water Engineering, College of Water and Soil, Zabol University, Zabol, Iran
2. Department of Water Engineering, College of Water and Soil, Zabol University, Zabol, Iran.
3. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Birjand University, Birjand, Iran.
4. Department of Agronomy, Faculty of Agriculture, Birjand University, Birjand, Iran

**Received:** 31 December 2024/ **Revised:** 12 February 2025/ **Accepted:** 27 Feburary 2025

https://doi.org/10.22034/arwe.2025.2049168.1032

## Abstract

Water management in agriculture is impossible without considering the relationships between water, soil, and plants. Simulation models are a valuable tool for improving water management in the field and increasing water productivity. It is essential to evaluate the efficiency of the model in each region and for each crop. In order to validate the AquaCrop model in Birjand region, an experiment was conducted in a randomized complete block design as a factorial, in which two factors of irrigation water salinity at two levels (S1, S2, respectively equivalent to 6 and 1.6 dS/m) and irrigation water quantity at four levels (I1, I2, I3, and I4, respectively equivalent to 50, 75, 100, and 125 percent of plant water requirement) were implemented in two crop years 2017-18 and 2018-19. Initially, the model was calibrated for each salinity and drought treatment simultaneously for the first-year data and then validated simultaneously for the salinity and drought treatments for the second-year data. The simulation values were evaluated based on the measured values of grain yield and total biomass using five evaluation indices including root mean square error (RMSE), coefficient of determination ($R^2$), efficiency factor (EF), maximum error (ME), and residual coefficient (CRM). The results of RMSE values of 0.19 t/ha in the calibration stage and 0.3 t/ha in the validation stage showed that the AquaCrop model simulated biomass and grain yield for wheat well under salinity and water deficit conditions.

**Keywords: Crop yield, Drought, Plant modeling, Salinity, Sirvan wheat.**

***Corresponding Author Email:** m.yaghoobzadeh@birjand.ac.ir

Lorestan University

دوفصلنامهٔ پژوهش‌های کاربردی مهندسی آب
دورهٔ دوم، شمارهٔ ۲، پاییز و زمستان ۱۴۰۳ (صفحات ۱۷۰-۱۵۹)

ARWE

مقالهٔ پژوهشی

# واسنجی و صحت‌سنجی مدل گیاهی AquaCrop به‌منظور شبیه‌سازی زیست‌توده و عملکرد دانه گندم رقم سیروان

فاطمه حاجی آبادی[۱]، فرزاد حسن پور[۲]، مصطفی یعقوب‌زاده*[۳]، حسین حمامی[۴]

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران.
۲. گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران.
۳. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.
۴. گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

**دریافت:** ۱۱ دی ماه ۱۴۰۳/ **اصلاحات:** ۲۴ بهمن ماه ۱۴۰۳/ **پذیرش:** ۹ اسفند ماه ۱۴۰۳

https://doi.org/10.22034/arwe.2025.2049168.1032

## چکیده

مدیریت مصرف آب در بخش کشاورزی بدون توجه به روابط آب، خاک و گیاه امری غیرممکن است. مدل‌های شبیه‌سازی، ابزاری ارزشمند برای بهبود مدیریت مصرف آب در مزرعه و افزایش بهره‌وری آب هستند. ارزیابی کارایی مدل در هر منطقه و برای هر محصول ضروری است. به منظور اعتبارسنجی مدل AquaCrop در منطقه بیرجند، آزمایشی در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی به‌صورت فاکتوریل انجام شد، که در آن دو فاکتور شوری آب آبیاری در دو سطح (S1، S2 به ترتیب معادل۶ و ۱/۶ دسی‌زیمنس بر متر) و مقدار آب آبیاری در ۴ سطح (I1، I2، I3 و I4 به ترتیب معادل ۵۰، ۷۵، ۱۰۰ و ۱۲۵ درصد نیاز آبی گیاه) در دو سال زراعی ۱۳۹۶-۱۳۹۵ و ۱۳۹۷-۱۳۹۶ اجرا گردید. در ابتدا مدل برای هر تیمار شوری و خشکی به‌صورت همزمان برای داده‌های سال اول، واسنجی و سپس به‌طور هم‌زمان برای تیمارهای شوری و خشکی برای داده‌های سال دوم صحت‌سنجی شد. ارزیابی مقادیر شبیه‌سازی بر اساس مقادیر اندازه‌گیری شده عملکرد دانه و زیست‌توده کل با استفاده از پنج شاخص ارزیابی شامل ریشه دوم میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب تعیین ($R^2$)، ضریب کارایی (EF)، حداکثر خطا (ME) و ضریب باقیمانده (CRM) انجام گرفت. نتایج مقادیر RMSE برابر ۰/۱۹ تن در هکتار در مرحله واسنجی و ۰/۳ تن در هکتار در مرحله صحت سنجی نشان داد مدل AquaCrop زیست توده و عملکرد دانه برای گندم در شرایط شوری و کم‌آبی به خوبی شبیه‌سازی شده است.

**کلمات کلیدی:** خشکی، شوری، گندم (رقم سیروان)، مدل‌سازی گیاهی.

***Corresponding Author Email:** m.yaghoobzadeh@birjand.ac.ir

**مقدمه**

کمبود آب به صورت یک تهدید واقعی برای زندگی انسان به خصوص در مناطق خشک و نیمه خشک کشورهای در حال توسعه در آمده است. رشد جمعیت و از طرفی بالارفتن استانداردهای زندگی، مصرف آب را افزایش داده است، مقدار آب قابل استفاده در کشاورزی مهم و قابل توجه است و صرفه جویی در بخشی از آب استفاده شده در کشاورزی ممکن است به عنوان راهکاری برای مشکل کمبود آب موثر باشد (Dehghan et al., 2010).

کشور ایران با متوسط بارش سالانه ۲۵۰ میلی‌متر که درحدود یک سوم متوسط جهان است، در یکی از خشک‌ترین مناطق جهان قراردارد. بخش کشاورزی با مصرف بیش از ۹۰٪ بزرگ‌ترین مصرف کننده منابع آب است و در مقایسه با متوسط جهانی که در حدود ۷۰٪ می‌باشد، رقم قابل ملاحظه‌ای را نشان می‌دهد. افزایش جمعیت و به دنبال آن مصرف آب بیشتر در سایر بخش‌ها مثل صنعت و شهر، ضرورت ارتقاء بهره‌وری آب در بخش کشاورزی را آشکار می‌کند. بر اساس گزارش فائو، گندم با تولید ۷۲۸/۱ میلیون تن در سال، مهم‌ترین گیاه برای تغذیه بشریت در جهان می‌باشد (Saeidi, 2024). به منظور افزایش کارایی مصرف آب با در نظر گرفتن تاثیر تغییرات کمی آب آبیاری بر عملکرد محصول، مدیریت آبیاری در مزرعه را می‌توان بهبود بخشید. بدین منظور از دو روش، آزمایش‌های مزرعه‌ای یا مدل‌های شبیه‌سازی استفاده می‌شود. در روش اول یعنی آزمایش‌های مزرعه‌ای، برای برنامه‌ریزی آبیاری و تعیین تاثیر تغییرات کمی آب آبیاری لازم است آزمایش‌هایی با کمیت‌های مختلف آب برای محصولات زراعی اجرا شود. از این رو به آزمایش‌های مزرعه‌ای متعدد نیاز است. اما در این روش محدودیت‌هایی هم هست از جمله: محدود بودن مکان و شرایط مورد آزمایش، کوتاه بودن مدت زمان اجرای آزمایش، نبود امکان برای اجرای سناریوهای پیچیده مدیریت آبیاری، و غیره. در این گونه آزمایش‌های کوتاه مدت نمی‌توان تاثیرات دراز مدت مدیریت آبیاری را که اهمیت بالایی دارند بررسی کرد. روش دوم یعنی استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی، ابزاری مناسب با قابلیت‌های مختلف برای ارزیابی و تعیین مدیریت بهینه آبیاری در سطوح مختلف (حوضه، شبکه آبیاری و مزرعه) و بررسی تاثیرات کمی آب آبیاری بر عملکرد محصول است. این مدل‌ها از بخش‌های مختلفی از جمله بیلان آب در خاک، برنامه‌ریزی آبیاری، مدیریت آبیاری و رشد محصول تشکیل شده‌اند و قادرند مولفه‌های مختلف مانند: تبخیر، تعرق، نفوذ عمقی، رواناب سطحی، بیلان آب خاک و عملکرد زراعی مورد انتظار را با دقت بالایی شبیه‌سازی کنند. دقت مدل‌های شبیه‌سازی تا حد زیادی به دقیق بودن داده‌های مورد نیاز ورودی بستگی دارد. اگر این مدل‌های ساده به درستی واسنجی و صحت سنجی شوند، بدون محدودیت‌های مکانی و زمانی موجود در آزمایش‌های مزرعه‌ای و بدون صرف وقت و هزینه زیاد می‌توانند جهت برآورد عملکرد مورد انتظار محصول، برنامه‌ریزی آبیاری و ارزیابی سناریوهای مدیریت آبیاری به کار گرفته شوند. از این مدل‌ها نیز می‌توان برای بررسی تاثیرات دراز مدت تغییرات کمی و کیفی آب آبیاری بر عملکرد محصول، شوری خاک، تبخیر-تعرق، رواناب سطحی و نفوذ عمقی استفاده کرد (Steduto et al., 2009).

گرچه مدل‌های گیاهی نمی‌توانند به طور کامل کلیه پارامترهای مؤثر در تولید گیاهان را در برگیرند اما در صورتی که معقولانه تهیه شده باشند، می‌تواند به عنوان یک روش ابتکاری مهم در آموزش، پژوهش و سیستم‌های مدیریتی و اجرایی استفاده شوند. در سال‌های گذشته مدل‌های زیادی برای مطالعه مدیریت آبیاری در سطح مزرعه معرفی و به کار برده شده‌اند. از این جمله می‌توان به مدل CROPWAT و مدل Budget که توسط ریس و همکاران (Raes et al., 2009) ارائه شد اشاره نمود، که نظریه پایه‌ای، پیکربندی و الگوریتم آنها بسیار مشابه با مدل AquaCrop می‌باشد. تنها فرق بین آن‌ها این است که مدل AquaCrop از اصلاح و بازنگری نشریه ۳۳ فائو توسط متخصصان برجسته از سرتاسر جهان به دست آمده است. مدل DSSAT که توسط محققین زیادی از جمله اقبالی شاه آباد و همکاران (Eghbalishahabad et al., 2024) در شبیه‌سازی رشد و نمو کینوا و قوام سعیدی و همکاران (Ghavamsaeidi et al., 2020) در مورد عملکرد گندم استفاده شده است، از مدل‌های پرکاربرد می‌باشد. مدل‌های زراعی پویایی مانند مدل SOYMOD که توسط میر و همکاران (Meyer et al., 1981) و مدل CERES توسط جونز و همکاران (Jones et al., 1986)، مدل SOYGRO توسط اگلی و برانینگ (Egli and Bruening, 1992) و برخی دیگر از مدل‌ها مانند CropSyst هم وجود دارند که به صورت تک گیاهی عمل می‌کنند و در سطح جهان تحقیقاتی روی این مدل‌ها انجام شده است. در این مدل‌ها یکی از معیارهای اصلی مطالعه میزان سطح تاج پوشش گیاهی می‌باشد. بیشتر این مدل‌ها به دلیل نیاز به واسنجی و اعتباریابی بسیار پیچیده و با داده‌های ورودی زیاد و همچنین دامنه وسیع تغییر پارامترهای ورودی نیازمند یک کاربر ماهر می‌باشند (Todorovic et al., 2009).

علیزاده و همکاران (Alizadeh et al., 2015) برای مدیریت کم آبیاری گندم در منطقه کرج از مدل AquaCrop استفاده نمودند. نتایج نشان داد که این مدل در پیش بینی مقدار عملکرد دانه، تبخیر و تعرق گیاهی و کارایی مصرف آب قابلیت خوبی داشته است.

خلیلی و همکاران (Khalili et al., 2015) مدل گیاهی AquaCrop در ایستگاه تحقیقات دیم سیساب واقع در خراسان شمالی و برای گیاه گندم تحت کشت دیم را واسنجی و ارزیابی کردند که نتایج نشان داد که این مدل با دقت بالایی قابلیت مدل‌سازی عملکرد محصول را دارا می‌باشد. خابلا و بالوگ (Mkhabela and Bullock, 2010) مدل AquaCrop را برای شبیه‌سازی عملکرد گندم و میزان آب خاک برای کانادا مورد استفاده قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که مدل مذکور، با دقت قابل قبولی می‌تواند مورد استفاده قرار بگیرد. فاستر و همکاران (Foster et al., 2017) یک نسخه از مدل FAO AquaCrop را در شرایط کشاورزی و محیط زیستی مختلف ارایه دادند که عملکرد گیاه را در شرایط کم آبیاری، شبیه سازی می‌کند. پاریک و همکاران (Pareek et al., 2017) مدل AquaCrop را برای گیاه گندم در منطقه‌ای از هندوستان، ارزیابی و واسنجی کردند و بیان داشتند که عملکرد و توده گیاهی گندم زمستانی با استفاده از مدل مذکور با دقت خوبی می‌تواند شبیه‌سازی شود به‌طوری‌که ضریب همبستگی بین عملکرد دانه گندم مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده، ۰/۹۴ گزارش شده است. جرعه نوش و همکاران (Jorenush et al., 2024) واسنجی و صحت سنجی مدل AquaCrop را در شرایط کشت گندم انجام دادند.

به طور کلی اجرای مدل‌های گیاهی نشان می‌دهد که نه تنها مدل‌های رشد می‌تواند برای مدیریت آبیاری در مزارع به کار برده شود بلکه به وسیله آن‌ها می‌توان اثر مدیریت‌های مختلف مزرعه‌ای و آبیاری بر تولید محصول را نیز بررسی نمود و از صرف هزینه و نیروی انسانی برای اجرای قسمت‌هایی از پژوهش‌های صحرایی کاست. با توجه به اینکه طبق تحقیقات انجام شده برروی مدل AquaCrop نتایج مطلوب حاصل شده است بنابراین نوآوری این تحقیق این بود که کارایی این مدل برای گندم رقم سیروان به عنوان رقم مقاوم به خشکی و شوری که برای اولین بار در بیرجند بکار برده می شود، مورد بررسی قرار گیرد. از همین رو آخرین نسخه مدل AquaCrop V6.0، (October, 2018)، با به دست آوردن داده‌های مزرعه‌ای حاصل از کشت گندم، واسنجی و اعتبارسنجی گردید.

## مواد و روشها

### منطقه مطالعاتی و داده‌های مورد استفاده

این مطالعه در دو سال زراعی ۱۳۹۶-۱۳۹۵ و ۱۳۹۷-۱۳۹۶ در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه بیرجند در فاصله ۵ کیلومتری غرب شهر بیرجند در مسیر جاده بیرجند- طبس، مجاور روستای امیرآباد انجام شد (جدول ۱). شهرستان بیرجند مرکز استان خراسان جنوبی می‌باشد، آب و هوای این شهرستان بیابانی و نیمه بیابانی بوده و دارای زمستان‌های سرد و تابستان‌های خشک و گرم است. برای دوره آماری ۴۰ ساله، میانگین دمای سالیانه آن ۱۶/۴ درجه سانتی‌گراد، حداکثر درجه حرارت مطلق ۳۸/۲ درجه سانتی‌گراد، حداقل درجه حرارت مطلق ۵/۱- درجه سانتی‌گراد و میانگین بارندگی سالیانه ۱۶۷/۲ میلی‌متر است و بیشترین میزان بارش از آذر تا اردیبهشت ماه رخ می‌دهد. متوسط سرعت باد سالیانه ۹/۷ کیلومتر در ساعت برآورد شده است و متوسط روزهای یخبندان سال به ۶۷ روز می‌رسد. شهر بیرجند به طور میانگین در ۷۶ روز از سال دارای دمای زیر صفر درجه و در ۱۴۲ روز از سال دارای دمای بالای ۳۰ درجه سانتیگراد است. همچنین میانگین سالیانه رطوبت نسبی در این شهر ۳۶ درصد است و به طور میانگین ۳۰ روز از سال، آسمان این شهر کاملا ابری است. هوای بیرجند به طور میانگین در ۱۲ روز از سال، با طوفان و گرد و خاک شدید همراه است.

جدول ۱. مشخصات ایستگاه سینوپتیک موردمطالعه

Table 1. Characteristics of the studied synoptic station

| ارتفاع از سطح دریا (m) | عرض جغرافیایی | طول جغرافیایی | میانگین دما (°C) | میانگین بارش (mm) | نام ایستگاه | سال تأسیس |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1504 | 32.90 | 59.25 | 16.4 | 167.2 | سینوپتیک بیرجند | 1334 |

با توجه به وجود ۲ حلقه چاه در مزرعه با شوری‌های متفاوت (۱/۶و ۶ دسی‌زیمنس بر متر)، امکان تأمین آب با شوری‌های متفاوت به صورت طبیعی وجود داشت. در نیمه دوم آبان ماه آماده‌سازی زمین (شخم، دیسک و لولر) انجام شد. طرح آزمایشی مورد نظر، در زمینی به مساحت ۴۸۰ متر مربع و به ابعاد ۴۰×۱۲ متر به‌صورت طرح فاکتوریل و در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار

با سطوح مختلف شوری ($S_1$، $S_2$ به ترتیب معادل ۱/۶، ۶ دسی‌زیمنس بر متر) و چهار سطح آبیاری ($I_1$، $I_2$، $I_3$ و $I_4$ به ترتیب معادل ۵۰، ۷۵، ۱۰۰ و ۱۲۵ درصد نیاز آبی گیاه) اجرا شد. روش کاشت به صورت دستی و در آذر ماه سال‌های ۱۳۹۵ و ۱۳۹۶ و برداشت محصول در خرداد ماه سال‌های ۱۳۹۶ و ۱۳۹۷ انجام شد. به منظور حصول یکنواختی در اعمال تنش شوری از روش آبیاری کرتی استفاده شد. ابعاد کرت‌ها ۳×۳ (متر× متر)، فاصله بین ردیف‌های کاشت ۲۰ سانتی‌متر و تراکم کاشت ۴۰۰ بوته در متر مربع بود. مقادیر کود مورد نیاز بر اساس آنالیز خاک تعیین و به طور یکنواخت در سطح کرت‌ها توزیع گردید.

تعداد کل تیمارها برابر با ۸ بود و مجموع کل کرت‌ها با توجه به سه تکرار انجام شده، ۲۴ کرت بود. در این آزمایش هر کرت شامل ۱۵ ردیف کاشت بود. همچنین جهت سهولت در رفت و آمد و راحتی در اندازه‌گیری صفات، بین تکرارهایی که به‌صورت عمودی زیر هم قرار گرفته‌اند و تیمارها نیم متر فاصله در نظر گرفته شد. به منظور تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک و خصوصیات شیمیایی آب مزرعه قبل از آماده سازی زمین، نمونه‌های مرکبی از ۴ نقطه محدوده کشت و از دو عمق ۳۰-۰، ۶۰-۳۰ و ۹۰-۶۰ سانتی‌متری خاک برداشت شد که نتایج آن در جدول ۲ و ۳ ارائه شده است. در زمان برداشت گیاه، چهار ردیف مرکزی از هر کرت، برای محاسبه عملکرد دانه و بیوماس کل در هکتار برداشت شدند که در آون در دمای ۷۰ درجه سیلسیوس به مدت ۴۸ ساعت قرار داده شد. برای اطلاعات اقلیمی مورد نیاز از داده های روزانه ایستگاه سینوپتیک بیرجند استفاده و تبخیر-تعرق مرجع نیز از روش فائو پنمن مانتیث با استفاده از نرم‌افزار $ET_O$ Caculator استفاده شد.

جدول ۲. خصوصیات شیمیایی آب منطقه موردمطالعه

Table 2. Water chemical properties of study area

| شماره چاه | هدایت الکتریکی ($dS.m^{-1}$) | اسیدیته pH | نسبت جذب سدیم SAR | کاتیون‌ها Cations (meq/lit) | | | | آنیون‌ها Anions (meq/lit) | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | $Ca^{++}$ | $Mg^{++}$ | $Na^{+}$ | $K^{+}$ | $Cl^{-}$ | $Hco_3^{-}$ | $Co_3^{2-}$ | $So_4^{2-}$ |
| **1** | 1.6 | 8 | 7.5 | 3.5 | 2.7 | 13.3 | 0.08 | 8.8 | 4.9 | 0 | 6.4 |
| **2** | 6 | 7.9 | 8.7 | 17.1 | 5.9 | 29.4 | 0.4 | 25.9 | 10.1 | 0 | 20.2 |

جدول ۳. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک منطقه مورد مطالعه

Table 3. Soil physical and chemical properties of study area

| پارامتر Parameter | عمق خاک Depth of soil (cm) | | | پارامتر Parameter | عمق خاک Depth of soil (cm) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0-30 | 30-60 | 60-90 | | 0-30 | 30-60 | 60-90 |
| بافت خاک Texture | sandyloam | sandyloam | loam | K (ppm) | 25.92 | 32.14 | 34.15 |
| $\theta_{fc}$ (٪) | 22 | 22 | 30 | P (ppm) | 10.62 | 8.43 | 9.7 |
| $\theta_{pwp}$ (٪) | 10 | 10 | 10 | کربن آلی Organic carbon (%) | 4.95 | 4.05 | 3.47 |
| $\theta_{sat}$ (٪) | 41.00 | 44.23 | 50.83 | pH | 7.8 | 7.4 | 7.3 |
| هدایت الکتریکی اشباع $K_{sat}$ (mm/day) | 1200 | 1200 | 500 | EC (dS/m) | 8 | 7.51 | 6.93 |
| | | | | جرم مخصوص ظاهری $A_s$ ($g/m^3$) | 1.4 | 1.25 | 1.33 |

**تعیین دور آبیاری و حجم آب مورد نیاز گیاه در طول دوره رشد**

در طی دوره رشد گندم، تعداد نوبت‌های آبیاری برای سطوح آبیاری$I_1$، $I_2$، $I_3$ و $I_4$ یکسان و برابر با ۸ نوبت بود. برنامه‌ریزی آبیاری بر اساس ترکیبی از روش بیلان رطوبتی خاک و دور ثابت انجام شد. در هر نوبت آبیاری، ۲۴ ساعت قبل از هر آبیاری از هر کرت در تیمارهای ۱۰۰٪ نیاز آبی (تیمار شاهد) درصد رطوبت حجمی با کمک دستگاه TDR از عمق توسعه ریشه‌ها محاسبه شد.

در نهایت با احتساب راندمان ۱۰۰ درصد در کرت‌ها به دلیل ابعاد کوچک و یکنواختی پخش آب، عمق آب مورد نیاز برای تیمار $I_3$ (تیمار شاهد) تعیین و سپس بر اساس ضرایب ۵۰٪، ۷۵٪ و ۱۲۵٪ عمق ناخالص آب در تیمارهای $I_1$، $I_2$ و $I_4$ محاسبه شد. حجم آبیاری

با ضرب نمودن عمق آب محاسبه شده در مساحت هر کرت بدست آمد. بر این اساس تاریخ و مقدار آب مصرف شده برای هر تیمار در جداول ۴ و ۵ ارائه شده است .

جدول ۴. زمان و مقدار آب مصرف شده در هر یک از تیمارهای آبیاری در سال اول
Table 4. Time and amount of water used in each of the irrigation treatments in the first year

| $I_4$ | $I_3$ | $I_2$ | $I_1$ | تاریخ آبیاری | نوبت آبیاری | روز بعد از کاشت |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 25 | 25 | 25 | 25 | ۱۳۹۵/۹/۲۰ | اول | 4 |
| 70 | 56 | 41 | 28 | ۱۳۹۵/۱۰/۴ | دوم | 17 |
| 77 | 62 | 46 | 31 | ۱۳۹۵/۱۰/۱۶ | سوم | 29 |
| 84 | 67 | 50 | 34 | ۱۳۹۵/۱۲/۲۸ | چهارم | 100 |
| 91 | 73 | 55 | 37 | ۱۳۹۶/۱/۲۳ | پنجم | 124 |
| 112 | 89 | 67 | 45 | ۱۳۹۶/۲/۱ | ششم | 135 |
| 101 | 81 | 61 | 41 | ۱۳۹۶/۲/۱۴ | هفتم | 148 |
| 98 | 78 | 59 | 39 | ۱۳۹۶/۳/۲ | هشتم | 165 |
| 658 | 531 | 404 | 280 | | جمع(mm) | |

جدول ۵. زمان و مقدار آب مصرف شده در هر یک از تیمارهای آبیاری در سال دوم
Table 4. Time and amount of water used in each of the irrigation treatments in the second year

| $I_4$ | $I_3$ | $I_2$ | $I_1$ | تاریخ آبیاری | نوبت آبیاری | روز بعد از کاشت |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 25 | 25 | 25 | 25 | ۱۳۹۶/۹/۲۹ | اول | 6 |
| 70 | 56 | 41 | 28 | ۱۳۹۶/۱۰/۱۰ | دوم | 20 |
| 77 | 62 | 46 | 31 | ۱۳۹۶/۱۱/۲۵ | سوم | 65 |
| 91 | 73 | 55 | 36 | ۱۳۹۶/۱۲/۲۱ | چهارم | 91 |
| 98 | 78 | 59 | 39 | ۱۳۹۷/۱/۶ | پنجم | 105 |
| 112 | 89 | 67 | 45 | ۱۳۹۷/۱/۲۰ | ششم | 119 |
| 98 | 78 | 59 | 39 | ۱۳۹۷/۲/۸ | هفتم | 138 |
| 84 | 67 | 44 | 34 | ۱۳۹۷/۲/۱۷ | هشتم | 147 |
| 655 | 528 | 396 | 277 | | جمع(mm) | |

**تئوری مدل AquaCrop**

آشنایی با چگونگی به کارگیری پارامترهای آب، خاک و هوا برای شبیه‌سازی محصول توسط مدل ضروری می‌باشد. روش‌های محاسبه و تئوری مدل AquaCrop به طور جزئی توسط Steduto و Raes در سال ۲۰۰۹ شرح داده شده است. مدل AquaCrop نیز مانند مدل Cropwat از معادله Doorenbos and Kassam در سال ۱۹۷۹ (معادله 1)، که در آن ET نسبی اساس محاسبه عملکرد می‌باشد، استنتاج شده است.

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

در این معادله $Y_x$ عملکرد حداکثر، $Y_a$ عملکرد واقعی، $ET_x$ تبخیر- تعرق حداکثر، $ET_a$ تبخیر- تعرق واقعی و $K_y$ ضریب تناسب بین کاهش عملکرد نسبی و کاهش نسبی تبخیر- تعرق می‌باشد. مدل AquaCrop به وسیله الف) تفکیک تبخیر- تعرق (ET) به تعرق از سطح محصول (Tr) و تبخیر از سطح خاک (E)، ب) توسعه یک مدل ساده رشد و پیر شدن تاج پوشش گیاهی به عنوان پایه برآورد Tr

و تفکیک آن از تبخیر، ج) شبیه‌سازی عملکرد نهایی (Y) به عنوان تابعی از زیست توده نهایی (B) و شاخص برداشت (HI)، و د) تفکیک اثرات تنش آبی در چهار جزء: رشد پوشش تاجی، پیری پوشش تاجی گیاه، Tr و HI توسعه یافته است. تفکیک ET به Tr و E از اثر مصرف غیر تولیدی آب از طریق E به ویژه در شرایط پوشش گیاهی ناکامل جلوگیری می‌کند. تعرق روزانه (Tr) با استفاده از $ET_o$ روزانه و بهره‌وری آب (WP) گونه گیاهی که با استفاده از نیاز تبخیری و غلظت $CO_2$ اتمسفری نرمال شده به وزن قسمت هوایی گیاه تبدیل می‌شود. معادله (۲) بیان ریاضی این رابطه می‌باشد:

$$WP = \frac{B}{\sum\left(\frac{Tr}{ET0}\right)} \qquad (۲)$$

در این معادله WP بهره‌وری آب (زیست توده ناشی از هر واحد تعرق تجمعی) بوده که مقدار آن در شرایط مختلف اقلیمی ثابت و برابر است. با نرمال کردن مناسب WP برای شرایط اقلیمی متفاوت مقدار آن به یک پارامتر ثابت تبدیل خواهد شد. بنابراین گام گذشتن از معادله (۱) به معادله (۲) دلالت بر صحت و عمومیت مدل دارد. برتری دیگر معادله مورد استفاده در مدل AquaCrop (معادله ۲) نسبت به معادله (۱) این است که شبیه‌سازی فرایندهای رشد گیاه در آن با استفاده از گام‌های زمانی روزانه صورت می‌گیرد (Alizadeh et al., 2015). شدت ضرایب تنش آبی (Ks) مؤثر بر پوشش تاجی (CC)، پیری و کاهش پوشش تاجی و شاخص برداشت (HI) به وسیله کسر تخلیه آب در ناحیه ریشه تعیین می‌شود. در نهایت مقدار عملکرد محصول با استفاده از جرم قسمت هوایی پوشش گیاهی و شاخص برداشت تعدیل شده محاسبه می‌گردد (Raes, 2002). در مدل AquaCrop فرض شده است هنگامی که علاوه بر تنش آبی، تنش شوری نیز وجود داشته باشد، فشار اسمزی افزایش و پتانسیل آب خاک کاهش می‌یابد. بنابراین آب کمتری برای گیاه در دسترس بوده و نیروی اسمزی مقادیر ضرایب $Ks_{sen}$ (ضریب تنش آبی برای پیری زودرس)، $Ks_{exp,w}$ (ضریب تنش آبی برای توسعه کانوپی) و $Ks_{sto}$ (ضریب تنش آبی برای بسته شدن روزنه‌ها) را تغییر می‌دهد. در واقع با ضرب کردن ضریب تنش شوری ($Ks_{sto,salt}$) در حد بالا و پایین تخلیه آب خاک ($P_{upper}$ و $P_{lower}$)، ضرایب $Ks_{sen}$ و $Ks_{exp,w}$ و با ضرب کردن $Ks_{sto,salt}$ در $Ks_{sto}$، این ضرایب در شرایط همزمان تنش آبی و شوری اصلاح می‌شوند. مدل AquaCrop به چهار دسته داده ورودی شامل: داده‌های اقلیمی، گیاهی، خاک و مدیریت مزرعه‌ای نیاز دارد. داده‌های ورودی اقلیمی مورد نیاز عبارتند از داده‌های حداکثر و حداقل دمای روزانه، تبخیر و تعرق گیاه مرجع ($ET_O$)، بارندگی و میانگین سالیانه غلظت $CO_2$ می‌باشند. مدل از داده‌های حداکثر و حداقل دمای روزانه برای محاسبه درجه روز رشد (GDD) به منظور تعدیل عملکرد بیولوژیک بر اثر خسارات ناشی از سرما استفاده میکند (Steduto et al., 2009). مدل برای غلظت $CO_2$، مقدار ۳۶۹/۴۶ قسمت در میلیون حجمی را به عنوان مرجع در نظر می‌گیرد (اندازه‌گیری شده در رصدخانه مائونالوا در هاوایی). داده‌های مورد نیاز خاک شامل هدایت هیدرولیکی اشباع خاک ($K_{sat}$)، رطوبت حجمی خاک در حد اشباع ($\theta_{vsat}$)، رطوبت حجمی خاک در حد ظرفیت زراعی ($\theta_{vfc}$)، رطوبت حجمی خاک در حد پژمردگی دائم ($\theta_{vpwp}$) و بافت خاک می‌باشد. داده‌های مربوط به گیاه و روابط آن با وضعیت آب در خاک و نیاز اتمسفری به دو گروه پارامترهای گیاهی ثابت و متغیر تقسیم می‌شوند. پارامترهای گیاهی ثابت برای بیشتر گیاهان زراعی (مانند گندم، جو، ذرت، پنبه و سویا) به صورت پیش‌فرض در مدل وجود دارند. این پارامترها با گذشت زمان یا موقعیت جغرافیایی تغییر نکرده، مقدار آن‌ها با استفاده از داده‌های مربوط به رشد گیاه در شرایط مطلوب و بدون محدودیت واسنجی شده و در مدل مورد استفاده قرار می‌گیرند (هنگ و همکاران،۲۰۰۹). با این حال در مدل AquaCrop این پارامترها در شرایط تنش آبی و شوری از طریق تأثیر ضرایب حساسیت گیاه به کم‌آبی و شوری ($Ks_{sen}$، $Ks_{exp,w}$، $Ks_{sto}$ و $Ks_{sto,salt}$) تعدیل می‌شوند. از طرف دیگر، پارامترهای گیاهی متغیر در شرایط مختلف مقادیری متفاوت داشته و مقادیر آن ها به مدیریت مزرعه بستگی دارند. در جدول ۶، سطح پوشش اولیه ($CC_o$) با استفاده از داده‌های تراکم کشت (۴۰۰۰۰۰۰ بذر در هکتار) در مدل تعیین و بقیه پارامترها در مزرعه اندازه‌گیری شدند. مقادیر رطوبت و شوری خاک قبل از کشت نیز به عنوان شرایط اولیه برای پیش‌بینی رطوبت و شوری خاک وارد مدل شدند.

جدول ۶. پارامترهای گیاهی متغیر مربوط به مراحل رشد رقم گندم سیروان
Table 6. Non-conservative cropt parameters for growth periods of Sirvan wheat varieties

| پارامتر<br>Parameter | رقم سیروان<br>Sirvan variety | پارامتر<br>Parameter | رقم سیروان<br>Sirvan variety |
|---|---|---|---|
| سطح پوش اولیه<br>Initial canopy cover ($CC_o$,%) | 6 | شروع پیری پوشش گیاهی<br>Start senescence (day) | 160 |
| تراکم کشت<br>Plant density (plant/ha) | 4000000 | رسیدگی فیزیولوژیکی<br>(day) Maturity | 190 |
| سبز شدن<br>Emergence (day) | 15 | طول دوره گل‌دهی<br>Duration of flowering (day) | 20 |
| گل‌دهی<br>Flowering (day) | 129 | شاخص برداشت مرجع<br>Reference harvest index ($HI_o$,%) | 38 |

**آنالیز حساسیت**

آنالیز حساسیت راهکاری است که طی آن تغییرات میزان خروجی مدل (نتایج پیش‌بینی مدل نسبت به داده‌های ورودی مدل) بررسی و ارزیابی می‌گردد. چنانچه تغییرات داده‌های ورودی تأثیر کمی بر مقادیر پیش‌بینی مدل داشته باشد، می‌توان استنباط نمود که داده‌های ورودی تأثیر اندکی بر نتایج دارند و در نتیجه ازخطای حاصل از اندازه‌گیری داده‌ها در مزرعه و یا آزمایشگاه چشم‌پوشی نمود. همچنین در صورت تأثیر پذیری بیش از حد مقادیر خروجی مدل از داده‌های ورودی، باید آن داده را با دقت بیشتری اندازه‌گیری و یا برآورد نمود، در غیر این صورت باید انتظار خطای زیادی را داشت. با استفاده از رابطه ۳ آنالیز حساسیت مدل AquaCrop انجام شد:

$$S_C = \frac{\Delta W / W}{\Delta P / P} \quad (۳)$$

که در آن $S_c$ ضریب حساسیت بدون بعد، $\Delta W$ اختلاف مقدار پارامتر خروجی قبل و بعد از تغییر پارامتر ورودی، متوسط پارامتر خروجی قبل و بعد از تغییر، $\Delta P$ اختلاف مقادیر پارامتر ورودی و متوسط مقادیر ورودی یک پارامتر به مدل می‌باشد. برای تعیین آنالیز حساسیت مدل، از جدول ۷ استفاده شد (Babazadeh H., & Sarai-Tabrizi, 2012).

جدول ۷. طبقه‌بندی پیشنهاد شده برای دامنه تغییرات ضریب حساسیت (۴)
Table 7. Proposed classification for the range of sensitivity coefficient changes

| دامنه تغییرات<br>Range of $S_c$ | $1.5<S_c$ | $0.3< S_c<1.5$ | $0< S_c<0.3$ | $S_c=0$ |
|---|---|---|---|---|
| شدت حساسیت<br>Sensitivity level | حساسیت زیاد<br>High sensitivity | حساسیت متوسط<br>Moderate sensitivity | حساسیت کم<br>Low sensitivity | بدون حساسیت<br>unsensitive |

**واسنجی و صحت‌سنجی**

ابتدا برای تیمار شوری $S_2$ و سطح آبیاری ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه (S2D3) که تیمار شاهد بود، فایل‌های ورودی مربوط به مدل را وراد کرده و مدل را اجرا نموده و سپس نتایج خروجی را با داده های مزرعه‌ای مقایسه کرده و آنالیز حساسیت مدل نسبت به پارامترهای ورودی انجام شد. همچنین فایل‌های مربوط به دیگر تیمارها که شامل هفت تیمار (S1D1,S1D2,S1D4,S2D1,S2D2,S1D3,S2D4) بود را وارد مدل کرده و سپس مدل با تغییر بعضی از پارامترهای حساس که در مزرعه اندازه‌گیری نشده بودند (پارامترهای گیاهی متغیر)، بطور همزمان برای همه تیمارها واسنجی گردید. به طوری که خطای نسبی بین عملکرد اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده حداقل شود. به عبارتی، مدل با استفاده از تیمارهای سال اول واسنجی و با استفاده از تیمارهای سال دوم صحت‌سنجی گردید.

**ارزیابی مدل**

برای ارزیابی مدل، از تحلیل خطاهای باقیمانده و اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری و پیش‌بینی‌شده استفاده شد. آماره‌های لازم برای این منظور، پنج شاخص آماری شامل: ریشه دوم میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب تعیین ($R^2$)، حداکثر خطا (ME) و ضریب باقیمانده

(CRM) و بازده مدل (EF) هستند که از معادلات زیر به‌دست می‌آیند:

$$RMSE = \left(\frac{\sum_{i=1}^{n}(Pi - 0i)^2}{n}\right)^{1/2} \times \left(\frac{100}{\bar{O}}\right) \quad (۴)$$

$$R2 = \frac{\sum_{i=1}^{n}(Oi - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^{n}(Pi - \bar{O})^2} \quad (۵)$$

$$EF = \frac{(\sum_{i=1}^{n}(Oi - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^{n}(Pi - Oi)^2)}{\sum_{i=1}^{n}(Oi - \bar{O})^2} \quad (۶)$$

$$ME = Max|Oi - Pi| \quad (۷)$$

$$CRM = \frac{(\sum_{i=1}^{n} Oi - \sum_{i=1}^{n} Pi)}{\sum_{i=1}^{n} Oi} \quad (۸)$$

در این معادلات O و P: به‌ترتیب مقدار عملکرد مشاهده شده و پیش‌بینی شده از هر تیمار، $\bar{O}$: متوسط عملکرد اندازه‌گیری شده و n: تعداد مشاهدات می‌باشند. خطای بیشینه (ME): نشان‌دهنده چگونگی اجرای مدل است و مقدار زیاد آن بیانگر کارکرد ضعیف مدل می‌باشد. ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE): مشخص می‌کند که برآورد بیشتر و یا کمتر از حد مدل در مقایسه با مقادیر متناظر اندازه‌گیری شده چقدر است. ضریب تعیین ($R^2$): بیانگر نسبت پراکندگی میان مقادیر شبیه‌سازی شده به پراکندگی مقادیر اندازه‌گیری شده است. مقدار آماره EF، مقادیر پیش‌بینی‌ها را با میانگین اندازه‌گیری‌ها مقایسه می‌کند. ضریب مقدار باقیمانده (CRM): نیز تمایل مدل در برآورد بیشتر یا کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد. چنانچه مقدار این پارامتر منفی شود بیانگر تمایل مدل به برآورد بیشتر از مقادیر اندازه‌گیری شده، می‌باشد. اگر چنانچه تمامی مقادیر پیش‌بینی شده با مقادیر اندازه‌گیری شده برابر شوند، آنگاه شاخص‌های RMSE, $CRM^2$, ME, EF, R به‌ترتیب برابر صفر، یک، یک، صفر و صفر خواهند بود (Loague and Green,1999; Homaee et al., 2002). ارزیابی مدل با استفاده از پارامترهای آماری مذکور در محیط اکسل انجام شد.

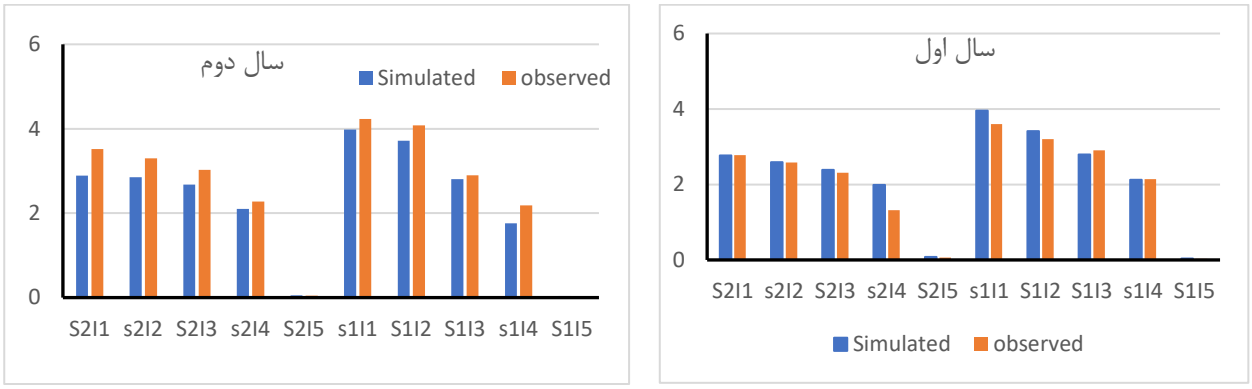
## نتایج و بحث

مقایسه مقادیر عملکرد دانه گندم اندازه گیری شده و پیش‌بینی شده توسط مدل آکواکراپ، در دو مرحله واسنجی و اعتبارسنجی در شکل شماره ۱ ارائه شده است و همچنین مقادیر کمی معیارهای ارزیابی نیز در جدول شماره ۴ آورده شده است. مقدار RMSE در این رقم گندم در مرحله واسنجی و در مرحله اعتبارسنجی به ترتیب برابر با ۰/۱۸ و ۰/۲۰ بدست آمد که بر اساس این آماره، مدل‌سازی عملکرد محصول مطلوب است. مقدار آماره CRM در مرحله واسنجی و در مرحله اعتبارسنجی به ترتیب برابر با ۰/۰۱ و ۰/۰۶ بدست آمد که می‌توان نتیجه گرفت که این مدل، پیش‌بینی عملکرد محصول گندم درحد مقدار واقعی، شبیه‌سازی می‌کند. شاخص $R^2$ در مرحله واسنجی و در مرحله اعتبارسنجی نزدیک به یک بود که نشان دهنده دقت مناسب مدل در پیش‌بینی عملکرد محصول می‌باشد (جدول ۸)

جدول ۸. پارامترهای آماری ارزیابی مدل برای عملکرد دانه گندم رقم سیروان در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی

Table 8. Statistical parameters of model evaluation for wheat grain yield of Sirvan cultivar in the calibration and validation stage

| CRM | ME | EF | $R^2$ | **RMSE (%)** | آماره |
|---|---|---|---|---|---|
| 0.01 | 0.36 | 0.91 | 0.97 | 0.18 | مرحله واسنجی |
| 0.06 | 0.41 | 0.91 | 0.98 | 0.20 | مرحله اعتبار سنجی |




شکل ۱. مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده عملکرد دانه گندم رقم سیروان

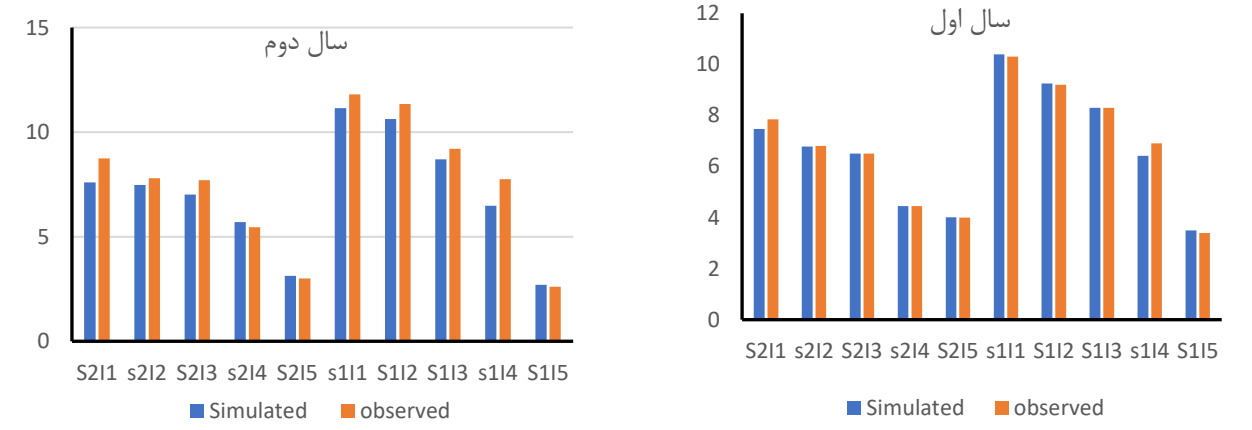
Fig. 1. Measured and simulated grain yield of Sirvan varieties

مقایسه مقادیر زیست توده کل اندازه گیری و پیش بینی شده توسط مدل آکواکراپ در شکل شماره ۲ طی مراحل واسنجی و اعتبار سنجی مدل ارائه شده است و مقادیر کمی پارامترهای ارزیابی در پیش‌بینی زیست توده نیز در جدول شماره ۵ آورده شده است. مقدار RMSE در پیش‌بینی زیست توده در این رقم گندم در مرحله واسنجی و در مرحله اعتبارسنجی به ترتیب برابر با ۰/۱۹ و ۰/۳۰ بدست آمد که بر اساس این آماره، مدل‌سازی عملکرد محصول ایده آل است. مقدار آماره CRM در مرحله واسنجی و در مرحله اعتبارسنجی به ترتیب برابر با ۰/۰۱ و ۰/۰۲ بدست آمد که نشان می‌دهد این مدل در پیش‌بینی زیست توده نیز محصول گندم را در حد مقدار واقعی، شبیه‌سازی می‌کند. شاخص $R^2$ در مرحله واسنجی و در مرحله اعتبارسنجی نزدیک به یک بود که نشان دهنده دقت مناسب مدل در پیش‌بینی زیست توده محصول می‌باشد. قدیریان وهمکاران (Ghadirian et al., 2021) نیز دقت مدل AquaCrop را در شبیه‌سازی عملکرد واریته‌های مختلف گندم بدست آوردند.

جدول ۹. پارامترهای آماری ارزیابی مدل برای زیست توده گندم رقم سیروان در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی

Table 9. Statistical parameters of model evaluation for Sirvan wheat biomass in the calibration and validation phase

| CRM | ME | EF | $R^2$ | **RMSE (%)** | آماره |
|---|---|---|---|---|---|
| 0.01 | 0.49 | 0.98 | 0.99 | 0.19 | مرحله واسنجی |
| 0.02 | 0.52 | 0.97 | 0.99 | 0.30 | مرحله اعتبارسنجی |




شکل ۲. مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده زیست توده گندم رقم سیروان

Fig 2. Measured and simulated biomass of Sirvan varieties

## نتیجه‌گیری

از جمله شاخص‌ترین مزیت مدل آکواکراپ مقادیر ورودی کمتر می‌باشد. از مزایای دیگر آن کیفیت گرافیکی خوب آن است که این امکان را به کاربر می‌دهد که پس از هر بار راه اندازی مدل تغییرات مربوط به آبیاری، پوشش سبز و عمق توسعه ریشه و غیره را به صورت نمودار ملاحظه کند تا روند واسنجی را مفهومی‌تر، آسان‌تر و دقیق‌تر انجام دهد. بنابراین مدل آکواکراپ در تحلیل داده‌ها از امکانات خوبی برخوردار است.

هدف فائو از توسعه مدل آکواکراپ، فراهم کردن ابزاری برای کمک به طراحان، کشاورزان و مدیران کشت صنعت‌ها جهت انتخاب مدیریت بهینه آبیاری در سیستم‌های مختلف کشاورزی موجود در سراسر جهان است. بنابراین ارزیابی و صحت‌سنجی مدل به ویژه برای محصولات استراتژیک ضروری است. مدل‌های گیاهی به گونه‌ای طراحی شده‌اند که کاربر از اندازه‌گیری پارامترهایی که اندازه‌گیری آن‌ها در عمل سخت می‌باشد مانند ضریب تخلیه مجاز رطوبتی، ضریب جذب نور و ضریب حساسیت گیاه به کم آبی در دوره گلدهی و پرشدن دانه فارغ شود. در این تحقیق شبیه‌سازی گندم رقم سیروان در دشت بیرجند در استان خراسان جنوبی با مدل آکواکراپ انجام شد. در این پژوهش تلاش شد در ابتدای کار، مدل را با داده‌های سال اول کشت، واسنجی نموده و سپس مقدار عملکرد دانه و زیست توده بدست آمده از مدل با اندازه‌گیری شده از مزرعه مورد مقایسه قرار گرفته و صحت سنجی مدل با داده‌های سال دوم کشت انجام شود. بنابراین پس از واسنجی و صحت سنجی مدل با استفاده از داده‌های دو سال کشت گندم، نشان داد که مدل آکواکراپ از توانایی خوبی برخوردار است. برای اطمینان از مدل می‌توان محصولات متنوع‌تری را در منطقه بیرجند مورد بررسی قرار داد و همچنین برای تحقیق و بررسی‌های بیشتر بر روی سنجش کارایی مدل در شبیه‌سازی دیگر خروجی‌های آن مانند رواناب، زهکشی آب خاک ، آبشویی نیترات، مقدار نیتروژن موجود درلایه‌های مختلف خاک، تثبیت کودهای معدنی و غیره می‌توان مطالعات گسترده‌ای را در منطقه انجام داد. با توجه به نتایج، مدل قابلیت این را داشت که به طور همزمان تحت شرایط تنش شوری و کم‌آبی واسنجی شود و عملکرد دانه و زیست توده را با دقت نسبتا بالایی برای گندم رقم سیروان، شبیه‌سازی نماید.

## مراجع


Alizadeh, H.A., Nazari, B., M. Parsinejad, M., H. Ramezani Eetedali, H.R., & Janbaz, H.R. (2015). Evaluation of AquaCrop Model on Wheat Deficit Irrigation in Karaj area, Iranian Journal of lrrigation and drainage, 4(2), 273-283 (In Persian)

Babazadeh H., & Sarai-Tabrizi M. (2012). Assessment of AquaCrop model under soybean deficit irrigation management conditions. Journal of Water and Soil, 26(2): 329-339 (In Persian)

Dehghan, H., Alizadeh, A., & Haghayeghi, A.GH. (2010). Water Balance Components Estimating in Farm Scale Using Simulation Model SWAP, Journal of Water and Soil, 24(6), 1265-1275 (In Persian)

Eghbalishahabad, S.H., Nasiri Mahalati, M., Mohsen Jahan, M., & Mohammad Hassan Fallah, M.H. (2024). Simulating the Growth and Development of Quinoa with using DSSAT 4.7 Software Model in Field Conditions, Journal of Drought and Climate change Research (JDCR), 2(1), 107-124 (In Persian)

Egli, D. B., & Bruening, W. (1992). Planting date and soybean yield: evaluation of environmental effects with a crop simulation model: SOYGRO. *Agricultural and Forest Meteorology*, *62*(1-2), 19-29.

Foster, T., Brozović, N., Butler, A. P., Neale, C. M. U., Raes, D., Steduto, P., ... & Hsiao, T. C. (2017). AquaCrop-OS: An open-source version of FAO's crop water productivity model. *Agricultural water management*, *181*, 18-22.

Ghadirian, A. H., Yaghoobzadeh, M., Zamani, G. and Shahidi, A. (2021). Calibration and verification AQUACROP plant model to simulate the performance of three different wheat varieties under drought stress. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, *14*(6), 2257-2267.

Ghavamsaeidi noghabi, S., Yaghoobzadeh, M., Shahidi, A., Hammami, H. and Kalanaki, M. (2020). Evaluation of DSSATv4.7 Model in Simulation of Phenological Stages and Wheat Yield of Anfarm 4 under Different Irrigation Levels. Iranian Journal of Irrigation & Drainage, 14(2), 548-558.

Homaee, M., Dirksen, C., & Feddes, R. A. (2002). Simulation of root water uptake: I. Non-uniform transient salinity using different macroscopic reduction functions. *Agricultural water management*, *57*(2), 89-109.

Jones, C. A., Kiniry, J. R., & Dyke, P. T. (1986). CERES-Maize: a simulation model of maize growth and development, User's guide of CERES-Maize.

Jorenush, M.H., Aslan Egdernezhad, A., Shahrokh Nia, M.A., & Niazali Ebrahimipak, N. (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 (In Persian)

Khalili, N. K., Davary, K., Alizadeh, A., Kafi, M., H. & Ansari, H. (2015). Simulation of Rainfed Wheat Yield using AquaCrop Model, Case Study: Sisab Rainfed Researches Station, Northern Khorasan, Journal of Water and Soil, 28(5), 930-939 (In Persian)

Loague, K., & Green, R. E. (1991). Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: overview and application. *Journal of contaminant hydrology*, *7*(1-2), 51-73.

Meyer, G. E., Curry, R. B., Streeter, J. G., & Baker, C. H. (1981). Simulation of reproductive processes and senescence in indeterminate soybeans. *Transactions of the ASAE*, *24*(2), 421-0429.

Mkhabela, M. S., & Bullock, P. R. (2012). Performance of the FAO AquaCrop model for wheat grain yield and soil moisture simulation in Western Canada. *Agricultural Water Management*, *110*, 16-24.

Pareek, N., Roy, S., Saha, S., & Nain, A. (2017). Calibration & validation of Aquacrop model for wheat crop in Tarai region of Uttarakhand. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, *6*(5), 1442-1445.

Raes, D. (2002). Reference manual of Budget model. KU Leuven, Faculty of Agricultural and Applied Biological sciences. *Institute for Land and Water Management, Leuven, Belgium*.

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. *Agronomy Journal*, *101*(3), 438-447.

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.

Todorovic, M., Albrizio, R., Zivotic, L., Abi Saab, M., Stoekle, C., & Steduto, P. (2009). Assessment of AquaCrop, CropSyst, and WOFOST Models in the Simulation of Sunflower Growth under Different Water Regimes. Agron. J. 101: 509- 521.

Saeidi, R. (2024). Determination of the Relationship between Physical and Economic Productivity of Water in the Cultivation of Bread Wheat Cultivars (Case Study: Qazvin Province). *Applied Research in Water Engineering*, *1*(2), 15-31 (In Persian).