Research Article

Agricultural Engineering., 48(3) (2025) 433- 451 ISSN (P): 2588-526X

DOI: 10.22055/agen.2025.49607.1780 ISSN (E): 2588-5944

Simulation of Regional-Scale Rice Yield Using the AquaCrop Model in the Someh Sara Region

A. Abdi Tabalvandani[1], M. Shabanpour[2*], S. Asadi Kapourchal[3], M. Khaledian[4] and N. Davatgar[5]

1. Ph.D. Department of Soil Science, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran
2. Associate Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran
3. Associate Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran
4. Associate Professor, Dept of Water Engineering, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan Rasht Iran
5. Associate Professor, Soil and water research institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran

Received: 12 May 2025 Accepted: 7 October 2025 *Corresponding Author: shabanpour@guilan.ac.ir

Abstract

Introduction: Food security relies on access to safe, affordable food and the capacity to meet nutritional needs. Rice, a staple crop, sustains over a third of the global population. Simulation models are vital for optimizing agricultural systems and forecasting crop yields under various environmental conditions. The FAO-developed AquaCrop model assesses the interactions between soil, water, climate, and management practices, offering user-friendly and robust features for simulating both irrigated and rainfed farming systems. These models simplify complex biological processes to accurately predict yield and biomass while minimizing environmental impact. By streamlining these processes, AquaCrop enhances the precision of crop yield and biomass predictions. This study employed AquaCrop to simulate the growth and productivity of Hashemi rice across 92 paddy fields in Someh Sara County. Through calibration and validation with site-specific data, this research demonstrates AquaCrop's effectiveness in addressing regional challenges and its potential to improve agricultural sustainability through better resource management and informed decision-making.

Materials and Methods: This study was conducted in 92 paddy fields within Someh Sara County to assess the reliability of the AquaCrop model for simulating rice yield and biomass under real conditions. Soil samples were collected through stratified random sampling from depths of up to 60 cm across various layers (surface, compacted plow layer, and subsoil) and analyzed for parameters such as texture (ranging from loamy to clay), organic carbon content, field capacity, wilting point, pH, and electrical conductivity. Meteorological data, including daily temperatures, solar radiation, precipitation, and wind speed, were gathered during the rice growth period to calibrate and validate the model. Farmer surveys documented management practices, including fertilization methods, irrigation strategies (alternate vs. continuous flooding), and pest control techniques. The AquaCrop model was calibrated by adjusting region-specific parameters, such as initial canopy cover, harvest index, and water use efficiency, using soil, crop, and meteorological data. Validation involved comparing observed yield and biomass data with AquaCrop-simulated results. The model's performance was evaluated using statistical indices, including normalized root

mean square error (nRMSE), root mean square error (RMSE), coefficient of determination (R^2), and model efficiency (EF). Finally, sensitivity analysis identified key parameters influencing simulation accuracy, ensuring comprehensive applicability to diverse management scenarios.

Results and Discussion: Sensitivity analysis identified several key parameters that significantly influenced simulation accuracy, including the harvest index, initial canopy cover, and saturated hydraulic conductivity. In the 92 paddy fields studied, grain yield ranged from 2.54 ton/ha to 5.97 ton/ha, with an average of 3.92 ton/ha. Biomass production varied from 6.20 ton/ha to 12.62 ton/ha, averaging 8.46 ton/ha. The AquaCrop model successfully replicated these patterns, achieving R^2 values of 0.70 for grain yield and 0.66 for biomass, with corresponding nRMSE values of 10% and 20%. Model efficiency indices further validated its reliability, with EF scores of 0.70 for grain yield and 0.97 for biomass yield. Fine-tuning the identified parameters improved predictive performance. Although slight discrepancies were observed in biomass accumulation under certain stress conditions, the results remained consistent with previous studies. AquaCrop demonstrated high adaptability for agricultural decision-making, effectively assessing outcomes under diverse management practices. The simulations also informed strategies to optimize water use, improve nutrient management, and minimize environmental impacts. Overall, this study underscores AquaCrop's value as a robust decision support system, capable of providing actionable insights to enhance agricultural sustainability. The model effectively managed variability in soil structure, agroecological conditions, and crop rotation regimes, highlighting its suitability for large-scale applications in heterogeneous farming systems.

Conclusion: The AquaCrop model demonstrates significant potential for sustainable resource management in agriculture and serves as an advanced and effective tool for the agricultural community. This study confirmed that AquaCrop can accurately simulate rice grain yield and biomass under real farming conditions. With simple input requirements and adaptable algorithms, AquaCrop provides robust solutions for resource‑efficient and sustainable agricultural practices. Its application across diverse agroecosystems highlights its scalability and relevance to regions facing challenges such as water scarcity and climate change. AquaCrop's role as a proactive tool for agricultural sustainability reinforces its value for future farming research and policy development. Expanding this framework to additional crops and geographical areas could further enhance global food security and resource efficiency.

Keywords:* *Agricultural Production Resources, Calibration, Paddy, Plant growth model.

مهندسی زراعی (مجله علمی کشاورزی) جلد ۴۸. شماره ۳، ۱۴۰۴

مقاله پژوهشی

شبیه‌سازی عملکرد برنج در مقیاس منطقه‌ای با استفاده از مدل آکواکراپ در منطقه صومعه‌سرا

آدینه عبدی طبالوندانی[۱]، محمود شعبانپور[۲*]، صفورا اسدی کپورچال[۳]، محمد رضا خالدیان[۴] و ناصر دواتگر[۵]

۱- دانشجوی دکتری خاک‌شناسی، دانشکدهٔ کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

۲- دانشیار گروه خاک‌شناسی، دانشکدهٔ کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

۳- دانشیار گروه خاک‌شناسی، دانشکدهٔ کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

۴- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکدهٔ کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

۵- دانشیار، موسسه تحقیقات آب و خاک، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران

تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۲۲

پذیرش نهایی: ۱۴۰۴/۰۷/۱۵

کلمات کلیدی:

شلتوک،

مدل رشد گیاهی،

نهاده‌های تولید کشاورزی،

واسنجی

* عهده دار مکاتبات

Email: shabanpour@guilan.ac.ir

چکیده

امروزه مدل‌های شبیه‌ساز نقش مهمی در مدیریت بهینه تولید و دستیابی به عملکرد مطلوب برنج در مزرعه دارند. مدل آکواکراپ، معرفی‌شده توسط فائو، ابزاری کارآمد برای شبیه‌سازی رشد گیاه و تحلیل اثرات خاک، اقلیم و مدیریت بر عملکرد محصولات کشاورزی است. این مدل به‌ویژه در ارزیابی سیستم‌های دیم و آبی و شبیه‌سازی تولید محصولاتی مانند برنج در شرایط و مکان‌های مختلف کاربرد دارد. پژوهش حاضر با هدف ارزیابی دقت مدل آکواکراپ در شبیه‌سازی عملکرد زیست توده و دانه برنج رقم هاشمی در مقیاس منطقه‌ای (۹۲ شالیزار در شهرستان صومعه‌سرا) پس از واسنجی و صحت‌سنجی نقطه‌ای انجام شد. نتایج نشان داد که مدل آکواکراپ دقت بالایی در برآورد عملکرد دانه شلتوک با مقدار متوسط اندازه‌گیری شده و برآورد شده توسط مدل در ۹۲ شالیزار به‌ترتیب حدود ۳/۹۰۹ و ۳/۹۵۹ تن در هکتار (R^2=۰/۷۰ ، nRMSE=۱۰٪) در کلاس عالی و RMSE برابربا ۰/٤ تن در هکتار) و میزان عملکرد زیست‌توده با مقدار متوسط اندازه‌گیری شده و برآورد شده توسط مدل در ۹۲ شالیزار به‌ترتیب حدود ۸/٤۱۹ و ۸/۲۱۳ تن در هکتار (R^2=۰/٦٦ ، nRMSE= ۲۰٪ در کلاس خوب و RMSE برابربا ۰/۸ تن در هکتار) دارد. همچنین با توجه به مقادیر کارایی مدل در شبیه‌سازی عملکرد دانه شلتوک (EF = ۰/۷۰) و زیست توده (EF = ۰/۹۷)، می‌توان نتیجه گرفت که مدل قادر به شبیه‌سازی دقیق رشد و عملکرد گیاه برنج در شرایط واقعی مزرعه است. نتایج این پژوهش حاکی از آن است که مدل آکواکراپ، با ساده‌سازی فرآیندهای پیچیده زیستی و استفاده از ورودی‌های محدود، نه تنها ابزار مفیدی برای شبیه‌سازی عملکرد در

شرایط مدیریتی مختلف است (۹۲ شالیزار مختلف با مدیریت‌های متنوع شالیکاران)، بلکه می‌تواند نقش مؤثری در بهبود تصمیم‌گیری‌های راهبردی به‌منظور مدیریت منابع آب و بهینه‌سازی سایر نهاده‌های تولید در شرایط محدودیت منابع ایفا کند.

مقدمه

برنج، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین محصولات غله‌ای جهان، بیش از یک‌سوم جمعیت جهان را تغذیه می‌کند (۲۵) چین بزرگ‌ترین تولیدکننده و مصرف‌کننده برنج در جهان است و حدود ۳/۳۷ درصد تولید و ۸/۲۹ درصد مصرف جهانی فرآورده‌های برنج را به خود اختصاص داده است (۴۵).

مدل‌های شبیه‌ساز رشد و نمو گیاه، مدل‌هایی مبتنی بر سیستم هستند که هدف آن شبیه‌سازی تعاملات بین مدیریت خاک، گیاه و اتمسفر است (۲۰). برای دستیابی به این هدف، رویکردهای چند رشته‌ای مورد نیاز است و مدل‌های شبیه‌ساز رشد و نمو گیاه می‌توانند بخش‌های بیولوژیکی، فیزیولوژیکی، اکولوژیکی، فیزیکی یا اقتصادی را در نظر بگیرند. تلفیق این رویکردها در مدل‌سازی رشد گیاه منجر به توسعه مدل‌های تصمیم‌گیر در مقیاس ناحیه‌ای، مانند APSIM[1] (۱۹)، DSSAT[2] (۹)، STICS[3] (۱۱) و WOFOST[4] (۱۴) شده است. در واقع، مدل‌ها برای تخمین داده‌هایی که اندازه‌گیری آن‌ها سخت و گران است یا نیاز به کارشناس ماهر دارد، استفاده می‌شوند و واکنش محصول نسبت به عوامل محیطی، مدیریتی و ژنتیکی را توضیح می‌دهند (۲۷). بنابراین، علاقه زیادی به استفاده از مدل‌های شبیه‌ساز محصول برای مشاهده اینکه چگونه رشد محصول تحت تأثیر این عوامل قرار می‌گیرد، یا برای تعیین کمیت خدمات زیست‌بوم، وجود دارد. از سوی دیگر، اگرچه آزمایشات مزرعه‌ای ممکن است بسیار دقیق باشند اما یافته‌های آن گران و زمان‌بر است و در نتیجه امکان اجرای آن در نقاط زیاد و تصمیم‌پذیری محدودی وجود خواهد داشت. شبیه‌سازی رشد و نمو گیاه با استفاده از مدل‌های شبیه‌ساز راهکار مکملی برای این چالش است (۲).

مدل اکواکراپ[5] توسط سازمان خوار و بار کشاورزی با هدف شبیه‌سازی رشد و عملکرد گیاهان زراعی مختلف توسعه یافته است (۱۶). این مدل یک مدل فراگیر در مقیاس مزرعه است به این معنا که می‌تواند برای طیف وسیعی از محصولات زراعی شامل علوفه‌ای، غلات، میوه‌ای، روغنی و غده‌ای به کار رود.

مدل‌های رشد گیاهی می‌توانند شرایط واقعی زمین‌های زیر کشت را با در نظر گرفتن مدیریت زمین، وضعیت آب‌وهوا و شرایط خاک برای مکان‌ها و زمان‌های مختلف با دقت پیش‌بینی کنند. هم‌چنین این مدل‌ها به‌طور معمول به سه نوع آماری، پویا یا چندبعدی تقسیم می‌شوند و بر اساس اقلیم، محیط، زیستگاه یا فرآیند طراحی شده‌اند (۲).

در شبیه‌سازی‌های مدل‌های رشد گیاه، دسترسی مواد غذایی، که یک بخش حیاتی از امنیت غذایی است، با استفاده از خروجی‌هایی مانند عملکرد دانه و زیست‌توده[6] پیش‌بینی می‌شود. خروجی عملکرد دانه شبیه‌سازی‌شده می‌تواند برای بهینه‌سازی شرایط مدیریت مزرعه و محصول مورد استفاده قرار گیرد تا بهره‌وری مطلوب نهاده‌های تولید، به‌دست آید و امنیت غذایی آیندگان تضمین شود (۲۱ و ۳۰). مدل آکواکراپ به واسطه ساختار انعطاف‌پذیر و قابلیت تطبیق با شرایط محیطی و مدیریتی مختلف، ابزار مناسبی برای ارزیابی سناریوهای بهینه مدیریت آب و نهاده‌ها در شرایط محدودیت منابع آبی محسوب می‌شود (۳۸).

مدل‌های رشد گیاهی با ارائه خروجی‌های مختلف، درک بهتری از تأثیر عوامل محدودکننده مانند تغییرات اقلیمی بر

1- Agricultural Production Systems sIMulator
2- Decision Support System for Agrotechnology Transfer
3- Multidisciplinary Simulator for Standard Crops
4- WOrld FOod STudies
5- Aquacrop
6- biomass

تولید محصولات کشاورزی ارائه می‌دهند (۳۱). این مدل‌ها نشان می‌دهند که محصولات زراعی چگونه به این عوامل پاسخ می‌دهند که به بهبود واکنش و سازگاری کشاورزان کمک می‌کند. این موضوع برای تولید و دسترسی به غذا در آینده اهمیت زیادی دارد (۳۲ و ۴۴). با این حال، برخی مدل‌ها پاسخ عملکرد محصول را در برابر تنش دمایی به‌طور دقیق در نظر نمی‌گیرند، زیرا تنها میانگین دمای روزانه را بررسی می‌کنند. این الگوریتم‌ها زمانی می‌توانند به تنش گرمایی بهتر پاسخ دهند که به جای میانگین دمای روزانه، دمای هوای روزانه در طول روز یا دمای سایبان گیاه را لحاظ کنند (۲۳ و ۳۳). مدل آکوکراپ چنین قابلیتی را دارد. مطالعاتی که از مدل‌های رشد گیاهی برای تمرکز بر امنیت غذایی استفاده می‌کنند، چه در کوتاه‌مدت و چه در بلندمدت یکی از روش‌های مؤثر برای کاهش و جلوگیری از ناامنی غذایی در سطح جهان هستند (۲۲ و ۲۴).

مدل آکوکراپ شامل یک رابط کاربری گرافیکی است که هم برای کاربران مبتدی و هم برای کاربران حرفه‌ای امکان طراحی الگوریتم‌های دقیق، ساده و پایدار را فراهم می‌کند. از جمله قابلیت‌های این مدل، مقایسه عملکرد واقعی محصولات با مقادیر قابل دستیابی و شناسایی محدودیت‌های تولید محصولات کشاورزی است (۳۷). در نسخه شماره ۷/۰ این مدل، تنش دمای هوا روی تعرق گیاه، گرده‌افشانی و شاخص برداشت اثر می‌گذارد. این نسخه ضرایب تنش دمای هوا و شاخص‌هایی مانند دماهای بیشینه و کمینه هوا و درجه‌های رشد را در نظر می‌گیرد. تنش دمایی می‌تواند بر میزان گرده‌افشانی در زمان تنش تأثیر گذاشته و کاهش در گرده‌افشانی می‌تواند بر روند گل‌دهی و شاخص برداشت اثر بگذارد، اگر شرایط پس از گل‌دهی بهبود نیابد (۳۸).

مدل‌های رشد گیاهی اکثرا در یک نقطه با مدیریت مشخص واسنجی و اعتبارسنجی می‌شوند، اما وقتی به مقیاس ناحیه‌ای یا منطقه‌ای منتقل می‌شوند جواب مناسبی ارائه نمی‌دهند. در حالی‌که این مدل‌ها می‌توانند به مدیران برای دستیابی به اطلاعات لازم برای مدیریت یک منطقه کشاورزی کمک کرده و سرعت تصمیم‌گیری را افزایش دهند، اما تا به‌حال این کار در مقیاس بزرگ و منطقه‌ای انجام نشده است. لذا پژوهش حاضر با هدف شبیه‌سازی عملکرد دانه و زیست‌توده برنج رقم هاشمی با استفاده از مدل آکوکراپ، تحت شرایط تنوع ویژگی‌های خاک و مدیریت اعم از کاشت، داشت، آبیاری، کوددهی و برداشت در مقیاس منطقه‌ای در ۹۲ شالیزار شهرستان صومعه‌سرا انجام شد. با توجه به ضرورت حصول تولید اقتصادی مطلوب و اهمیت شبیه‌سازی دقیق عملکرد گیاه، مدل آکوکراپ می‌تواند برای مدیریت مناطق وسیع بهره‌برداری مورد استفاده سیاست‌گزاران، مدیران و پژوهش‌گران قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه و نمونه‌برداری

مختصات جغرافیایی محدوده مورد مطالعه شامل اراضی شالی‌زاری شهرستان صومعه‌سرا به وسعت ۲۶،۰۰۰ هکتار، در طول جغرافیایی ۴۹°۱۵′ تا ۴۹°۳۳′ و عرض جغرافیایی ۳۷°۱۵′ تا ۳۷°۲۵′، در سیستم مختصات UTM زون ۳۹ N – WGS84 (جنوب‌غربی: E = 332388 m، N = 4122892 m؛ شمال‌شرقی: E = 358438 m، N = 4141823 m) قرار دارد. موقعیت جغرافیایی ناحیه مورد مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است. از نظر زمین‌شناسی خاک‌های این ناحیه از رسوبات دوران چهارم زمین‌شناسی به‌صورت‌های مختلف تشکیل شده است. واحدهای اصلی فیزیوگرافی در این ناحیه شامل اراضی پست ساحلی، دشت‌های آبرفتی، دشت‌های دامنه‌ای و تا حدودی فلات‌ها و پهنه‌های قدیمی می‌باشد. اراضی ناحیه مورد مطالعه به‌ترتیب تحت پوشش گیاه زراعی برنج (حدود ۶۸٪)، درختان صنوبر و انواع درختان غیرمثمر جنگلی (حدود ۱۸٪)، گیاه چای (حدود ۸٪) و صیفی‌جات (حدود ۶٪) بودند (۴).

شبیه‌سازی موازنه آب- خاک- گیاه برای برنج در یک ناحیه معین نیازمند داده‌هایی از عوامل هیدرولیکی و توصیف نیمرخ‌های خاک است. نمونه‌برداری به‌منظور اندازه‌گیری ویژگی‌های هیدرولیکی خاک انجام شد. در این پژوهش برای

بررسی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک از داده‌های موسسه تحقیقات برنج کشور استفاده شد. برای بررسی مدیریت مزرعه و عملکرد نیز در سال زراعی ۱۴۰۲ نمونه‌برداری گیاهی انجام و همچنین با بهره‌گیری از داده‌های اقلیمی استخراج‌شده از پایگاه سازمان هواشناسی کشور (IRIMO) و به‌کارگیری نرم‌افزار CropWat، مقادیر تابش خورشیدی روزانه[1] (SRAD) و تبخیر–تعرق مرجع[2] (ET_0) برآورد گردید.

در ابتدا اراضی ناحیه مورد مطالعه با استفاده از الگوی نمونه‌برداری شبکه ردیفی- تصادفی به بلوک‌های مربع با ابعاد حدود یک کیلومترمربع تقسیم شده بود و سپس در هر بلوک زیرکشت برنج (رقم هاشمی، رایج‌ترین رقم کیفی کشت شده در منطقه مورد مطالعه بود) دو نقطه به‌صورت تصادفی برای حفر نیمرخ خاک انتخاب شدند.

در نهایت به‌منظور نمونه‌برداری و بدون در نظر گرفتن نواحی جنگلی، باغ‌ها و محدوده خانه‌های روستایی، ۹۲ نیمرخ انتخاب و در هر نقطه پس از حفر نیمرخی به عمق ۶۰ سانتی‌متر از لایه‌های گلخراب سطحی، لایه فشرده زیرشخم و خاک تحت‌الارض در زیر لایه فشرده به‌صورت دست‌خورده و دست نخورده نمونه‌برداری خاک انجام شد و سپس از همین نقاط شالیزاری نمونه‌برداری گیاه برنج به‌منظور اندازه‌گیری عملکرد زیست‌توده و دانه شلتوک انجام شد.

اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی خاک

در تمامی نمونه‌ها توزیع اندازه ذرات، شامل ذرات شن با استفاده از ست الک، سیلت و رس با استفاده از هیدرومتر (۱۸)، جرم مخصوص ظاهری خاک با استفاده از نمونه دست‌نخورده و به روش سیلندر (۱۷)، رطوبت حجمی خاک در مکش‌های ۰، ۱، ۲، ۵، ۱۰ کیلوپاسکال به روش قیف آویزان[3] و در مکش‌های ۳۳، ۱۰۰، ۲۰۰ و ۱۵۰۰ کیلوپاسکال با استفاده از دستگاه صفحه فشاری (۱۳) و هدایت هیدرولیکی اشباع به روش بار افتان (۹) اندازه‌گیری شد.

تعیین pH خاک به روش پتانسیومتری انجام شد؛ بدین منظور، ابتدا سوسپانسیونی از خاک و آب به نسبت ۱:۵ تهیه و سپس با استفاده از دستگاه pH متر مدل (مدل SCHOTT Lab 850) قرائت انجام گردید (۴۲). قابلیت هدایت الکتریکی خاک نیز توسط دستگاه ECمتر (مدل JENWAY 4510) در همین عصاره اندازه‌گیری شد (۲۹). برای اندازه‌گیری کربن آلی خاک، از روش والکلی- بلک[4] استفاده شد (۴۳).

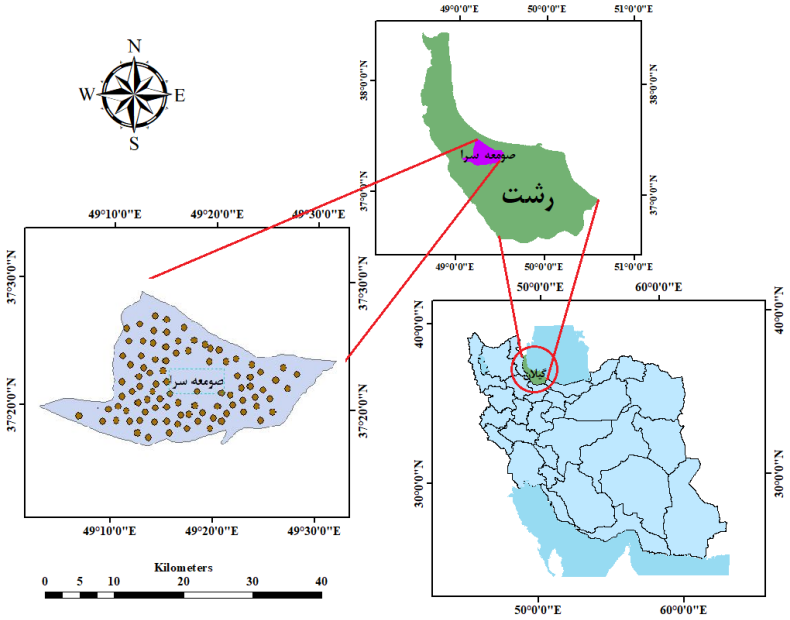
اندازه‌گیری محصول

در زمان برداشت محصول از ۹۲ مزرعه در ناحیه مورد مطالعه قطعه‌ای به ابعاد یک مترمربع به صورت تصادفی انتخاب شد و سپس بوته‌ها پس از شمردن تعداد، از محل اتصال به خاک کف‌بُر شد. شاخص برداشت نیز از طریق اندازه‌گیری وزن دانه بعد از تنظیم مقدار رطوبت وزن تازه آن در ۱۴ درصد و وزن کاه و کلش بعد از قراردادن به مدت ۴۸ ساعت در آون در دمای $70^{\circ}C$ تعیین شد (۱۲).

داده‌های هواشناسی

متغیرهای هواشناسی سال ۱۴۰۲ برای شبیه‌سازی عملکرد و متغیرهای هواشناسی سال ۱۳۹۷ و ۱۳۹۸ برای واسنجی و صحت سنجی مدل از ایستگاه هواشناسی واقع در رشت و ایستگاه‌های اقلیم‌شناسی و باران‌سنجی واقع در فومن و صومعه-سرا تهیه شد(شکل ۲). داده‌های روزانه هواشناسی شامل دمای کمینه و بیشینه، رطوبت نسبی هوا، سرعت باد، ساعات آفتابی و بارش روزانه بود.

1- Daily Solar radiation
2- Reference evapotranspiration
3- Hanging funnel
4- Walkley-Black



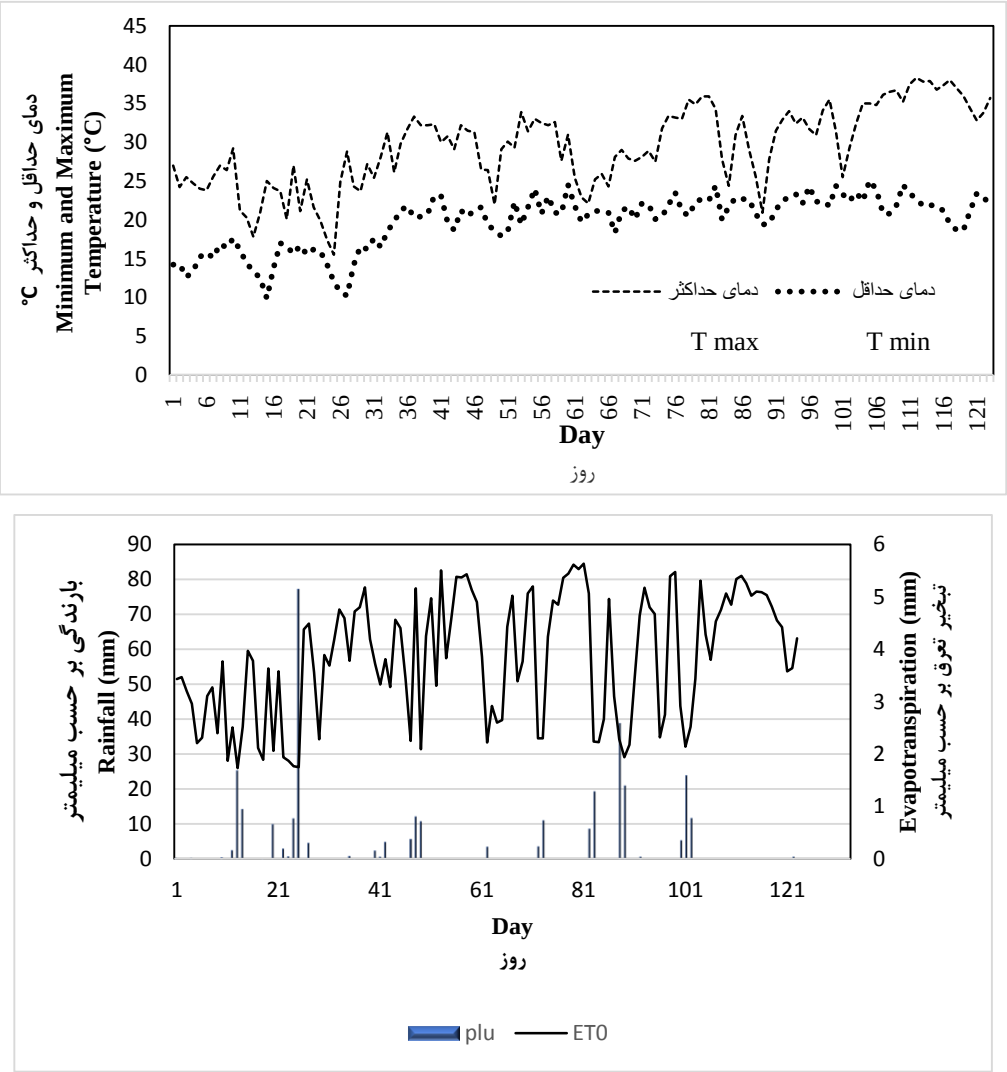
شکل (۱) نقشه موقعیت جغرافیایی ناحیه مورد مطالعه در شهرستان صومعه‌سرا

Figure (1) Map of the geographical location of the study area in Someh Sara County

جدول (۱) متوسط برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی اندازه‌گیری شده از خاک ۹۲ شالیزار مورد مطالعه

Table (1) Average values of selected physical and chemical properties of soils from 92 studied paddy fields

پارامتر Parameter	واحد Unit	دامنه مقادیر اندازه‌گیری شده Measured Value Range
بافت Texture	–	از بافت لومی تا رسی
شن Sand	%	18.80
سیلت Silt	%	48.40
رس Clay	%	32.80
عمق سخت لایه Hard Layer Depth	Cm	60
رطوبت ظرفیت زراعی Field Capacity	cm^3/cm^3	0.19 - 0.36
رطوبت نقطه پژمردگی Permanent Wilting Point	cm^3/cm^3	0.10 - 0.17
هدایت هیدرولیکی اشباع Saturated Hydraulic Conductivity	cm/day	0.2 - 58.78
هدایت الکتریکی Electrical Conductivity	dS/m	1 – 1.5
اسیدیته pH	-	6 – 7
کربن آلی Organic Carbon	%	0.04 – 4.82



شکل (۲) داده‌های هواشناسی برای دوره رشد برنج در منطقه مورد مطالعه در فصل زراعی ۱۴۰۲ (سازمان هواشناسی، https://www.irimo.ir/)

Figure (2) Meteorological data for the rice growth period in the studied area during the 2023 crop season (Iran Meteorological Organization; https://www.irimo.ir/)

داده‌های آب مصرفی

مقدار آب عرضه شده در شبکه آبیاری برای اراضی شالیزاری صومعه‌سرا تحت پوشش شبکه آبیاری دشت فومنات از طریق شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان گیلان برای سال ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲ با احتساب راندمان انتقال و توزیع استعلام شد. مقدار بارش موثر نیز از جمع‌آوری داده‌های بارش از ایستگاه هواشناسی منطقه به روش حدود اطمینان تعیین شد.

مدیریت مزرعه

در قالب پرسش‌نامه‌ای تهیه شد که در آن تاریخ کاشت، نوع و مقدار کود مصرفی، منبع آب و شیوه مدیریت آبیاری (تناوب و غرقابی)، نوع و مقدار سموم مصرفی برای مبارزه با آفات و بیماری‌ها، تاریخ برداشت و سابقه عملکرد محصول توسط کشاورزان از هر مزرعه نمونه برداری (از ۹۲ نقطه) موردارزیابی قرار گرفت .

اجرای مدل آکواکراپ

مدل آکواکراپ مبتنی بر فرآیندهای بیوفیزیکی است که یک ساختار پیوسته از خاک، گیاه و هوا را در نظر می‌گیرد (۳۹). متغیرهای ورودی مورد نیاز مدل آکواکراپ به دو گروه پارامترهای ثابت و متغیر تقسیم می‌شوند. اطلاعات اقلیمی شامل دمای حداکثر و حداقل روزانه، بارش روزانه و میانگین سالانه غلظت CO_2 اتمسفر است. مقدار ET_0 با استفاده از معادله فائو پنمن- مانتیث توسط مدل CROPWAT محاسبه شد (۶). اطلاعات خاکی شامل بافت خاک برای هر لایه خاک، ویژگی‌های هیدرولیکی مانند هدایت هیدرولیکی اشباع (K_{Sat})، رطوبت حجمی خاک در حالت اشباع (θ_{sat})، رطوبت ظرفیت زراعی (θ_{FC}) و رطوبت نقطه پژمردگی (θ_{pwp}) است.

اطلاعات مدیریتی و خصوصیات گیاهان در مدل آکواکراپ از پنج قسمت اصلی (فنولوژی، کانوپی گیاه، تعرق گیاه، بیوماس تولید شده و عملکرد قابل برداشت) تشکیل شده است که بیشتر در ارتباط با فرآیندهای پویا در گیاه زراعی است. خروجی مدل آکواکراپ شامل اطلاعات روزانه و یا نتایج فصلی است که فایل‌های خروجی با داده‌های روزانه شامل اندازه‌گیری عملکرد گیاه، مقدار رطوبت خاک در عمق‌های مختلف از نیمرخ خاک، مقدار رطوبت خاک در منطقه ریشه، پارامترهای مختلف از بیلان آب خاک و نیاز آبیاری شبکه آبیاری و زهکشی است. به صورت کلی و خلاصه از جمله فایل‌های ورودی که باید برای مدل آکواکراپ آماده وانتخاب شوند شامل حداقل داده‌های مربوط به خاک، محصول، آب وهوا و مدیریت مزرعه به صورت خلاصه در زیر آمده است:

آب‌وهوا:

دماهای بیشینه و کمینه هوا

تبخیر و تعرق

بارش

غلظت CO_2.

ویژگی‌های گیاه و خاک :

پارامترهای گونه‌های کشت

بافت خاک

محتوای آب و هدایت الکتریکی خاک

عمق سفره آب زیرزمینی زیر سطح

شوری خاک

مقدار اولیه باروری خاک

تاریخ، مقدار و روش‌های آبیاری و کوددهی

ارزیابی نتایج حاصل از مدل آکواکراپ

برای ارزیابی کارایی مدل آکواکراپ از داده‌های سال زراعی ۱۴۰۲ استفاده شد. بدین صورت که با استفاده مدل آکواکراپ مقدار عملکرد محصول در مقیاس ناحیه‌ای بررسی شد. در نهایت ارزیابی صحت مدل در پیش بینی عملکرد با استفاده از آماره‌هایی مانند ضریب تبیین (R^2)[11] رگرسیون خطی بین مقادیر شبیه سازی شده و اندازه گیری شده ، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)[12]، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (nRMSE) و آماره کارایی مدل[13] (EF) (۱۰، ۲۶ و ۴۰) محاسبه گردید (معادلات ۱-۴).

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^{N}(O_i-\bar{O})(P_i-\bar{P})}{\sum_{i=1}^{N}(O_i-\bar{O})^2\sum_{i=1}^{N}(P_i-\bar{P})^2}\right]^2 \quad (۱)$$

$$\mathrm{RMSE} = \left(\frac{\sum_{i=1}^{n}(Pi-Oi)^2}{n}\right)^{0.5} \quad (۲)$$

$$\mathrm{nRMSE} = \frac{100\left(\frac{\sum_{i=1}^{n}(Pi-Oi)^2}{n}\right)^{0.5}}{\bar{O}} \quad (۳)$$

$$\mathrm{EF} = \frac{\left(\sum_{i=1}^{n}(Oi-\bar{O})^2-(Pi-Oi)^2\right)}{\sum_{i=1}^{n}(Oi-\bar{O})^2} \quad (۴)$$

که در روابط ۱ تا ۴، P_i و O_i به‌ترتیب مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری‌شده، n تعداد نمونه‌ها و $\bar{O}$ و $\bar{P}$ میانگین مقادیر اندازه‌گیری‌شده و شبیه‌سازی شده است.

به طور کلی، مقادیر RMSE و nRMSE در حالت مطلوب یا حالتی که مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده مساوی باشند، برابر با صفر هستند. بدیهی است هرچه

[11] Coefficient of Determination
[12] Root Mean Square Error
[13] Efficiency Factor

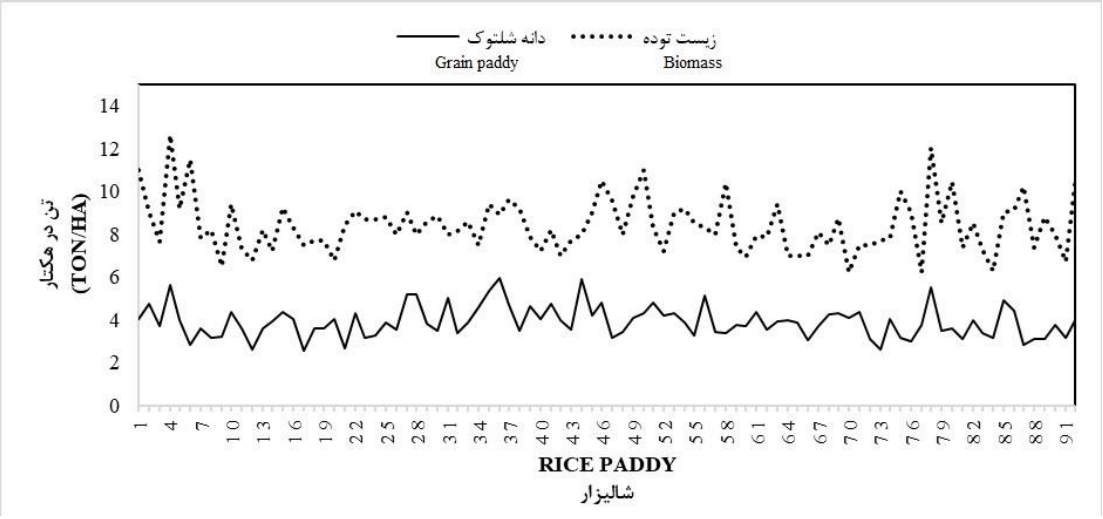
مقدار این دو مؤلفه به صفر نزدیک‌تر باشد مدل دقیق‌تر است. چنانچه مقدار nRMSE کمتر از ۱۰ درصد باشد شبیه‌سازی در کلاس عالی، بین ۱۰ تا ۲۰ درصد در کلاس خوب، بین ۲۰ تا ۳۰ درصد در کلاس متوسط و بالای ۳۰ درصد در کلاس ضعیف خواهد بود (۴۱). آماره EF کارایی مدل نسبت به میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده است و همانند R^2 هرچه به یک نزدیک‌تر باشد بهتر است.

تحلیل نتایج

مقادیر اندازه‌گیری شده عملکرد شلتوک و مقدار ماده خشک در نمونه‌های برداشت شده از شالیزارهای منتخب در شکل ۳ آمده است. بر این اساس، بیش‌ترین، کم‌ترین و متوسط عملکرد دانه شلتوک به ترتیب ۵/۹۷، ۲/۵۴ و ۳/۹۲ تن در هکتار و برای عملکرد زیست‌توده به ترتیب ۱۲/۶۲، ۶/۲۰ و ۸/۴۶ بر حسب تن در هکتار به‌دست آمد.

به‌منظور حساسیت‌سنجی مدل آکواکراپ از پارامترهایی که بر مقدار خروجی داده‌ها اثر قابل توجهی دارند و همچنین بر رشد گیاه تاثیر به‌سزایی دارد، مطابق جدول۲ استفاده شد. دامنه تغییرات ضریب حساسیت به سه کلاس حساسیت زیاد، حساسیت متوسط و کم طبقه‌بندی شد (۱۶). اگر پاسخ مدل به تغییر در پارامترها بیش‌تر از ۵ درصد باشد، دارای حساسیت زیاد است؛ پاسخ مدل به تغییر در پارامترهای ورودی بین ۵ تا ۱ یا کمتر از ۱ درصد باشد به‌ترتیب نشان دهنده حساسیت متوسط و حساسیت کم می‌باشد. طبق نتایج بدست آمده در این تحقیق مقدار حساسیت متوسط برای تعداد زیادی از پارامترهای ورودی مدل آکواکراپ گزارش شده است. جدول ۲، حساسیت مدل آکواکراپ را در برابر پارامترهای مذکور نشان می‌دهد.

نتایج آنالیز حساسیت نشان داد که شاخص برداشت، پوشش گیاهی اولیه و هدایت هیدرولیکی اشباع خاک بیشترین حساسیت را داشتند. سایر پارامترها دارای اثرگذاری کم‌تری هستند، مثلا اگر فقط یک درصد شاخص برداشت افزایش یا کاهش یابد، عملکرد دانه ۹۰ کیلوگرم در هکتار کم یا زیاد خواهد شد. بنابراین، این داده‌ها باید با دقت بیشتری در شالیزارها اندازه‌گیری شوند، زیرا در غیر این صورت خطای قابل‌توجهی در نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل به وجود می‌آید (۱۵). همچنین نتایج حساسیت‌سنجی نشان داد برخی پارامترها تاثیر شگرفی بر نتایج مدل داشته و با تمرکز واسنجی بر این پارامترها، فرآیند صحت‌سنجی مدل به‌طور محسوسی بهبود خواهد یافت.



شکل(۳) مقادیر اندازه‌گیری شده دانه شلتوک و زیست‌توده در ۹۲ شالیزار

Figure (3) Measured values of rice paddy grain and biomass from 92 studied paddy fields

جدول (۲) ضریب حساسیت پارامترهای ورودی مدل آکواکراپ
Table (2) Sensitivity coefficient of input parameters in the AquaCrop model

پارامتر ورودی مدل Model input parameter	حساسیت در حالت ۲۰+ درصد Sensitivity at −20%	حساسیت در حالت ۲۰− درصد Sensitivity at +20%	درجه حساسیت Sensitivity degree
ضریب گیاهی Crop coefficient	+5	-5	متوسط Medium
ضریب افزایش سطح سایه انداز Canopy growth coefficient	+6	-4.2	متوسط Medium
بهره‌وری آب نرمال شده Normalized water productivity	+0.05	-0.05	کم Low
شاخص برداشت Harvest index	+7.0	-8.0	زیاد High
ماکزیمم پوشش گیاهی Maximum canopy cover	+5.1	-5.7	زیاد High
پوشش گیاهی اولیه Initial canopy cover	+7.9	-7.8	زیاد High
هدایت هیدرولیکی اشباع خاک Saturated hydraulic conductivity of soil	+8.9	-6.5	زیاد High

واسنجی و صحت‌سنجی مدل آکواکراپ

برای استفاده از مدل‌های شبیه‌ساز تحلیل حساسیت، واسنجی و صحت‌سنجی مدل ضروری می‌باشد. عمل واسنجی و صحت‌سنجی بر اساس مقادیر اندازه‌گیری شده در مزرعه انجام شد. در این پژوهش، نمونه‌برداری عملکرد برنج در ۹۲ مزرعه زیر مدیریت کشاورزی انجام شد. همچنین از داده‌های اندازه‌گیری شده در یک مزرعه پژوهشی واقع در موسسه تحقیقات برنج کشور در شهرستان رشت در سال زراعی ۱۳۹۷ برای واسنجی و از داده‌های اندازه‌گیری‌شده در همان مزرعه اما در سال زراعی ۱۳۹۸ نیز برای صحت‌سنجی استفاده شد (۱).

پس از اجرای مدل آکواکراپ، ضرایب و پارامترهای مدل با روش سعی و خطا به گونه‌ای تنظیم شدند که نتایج شبیه‌سازی شده مدل، بیشترین شباهت یا کمترین اختلاف را با داده‌های واقعی مزرعه داشته باشند. مقدار مناسب هر پارامتر زمانی به دست می‌آید که حتی با تغییر ترکیبی پارامترها، نتایج مدل همچنان قابل قبول باقی بماند. این فرایند چندین بار تکرار شد و در پایان، ضرایبی که در جدول ۳ دیده می‌شوند، از مدل استخراج شد. برخی از ضرایب بر اساس داده‌های این تحقیق تنظیم شدند و برخی دیگر همان مقادیر پیش‌فرض مدل باقی ماندند. پس از واسنجی، عملکرد شبیه‌سازی شده توسط مدل با مشاهدات مزرعه‌ای عملکرد برنج براساس شاخص‌های خطا و خط یک به یک مقایسه شد.

در مدل AquaCrop، داده‌های گردآوری‌شده به‌عنوان ورودی به مدل وارد شد. سپس پارامترهایی نظیر رشد اولیه پوشش گیاهی، ضریب گسترش پوشش، حداکثر میزان پوشش گیاهی و ضرایب مرتبط با کاهش پوشش ناشی از تنش آبی (شامل حدود بالایی و پایینی که بر توسعه پوشش و بسته‌شدن روزنه‌ها اثرگذار هستند) واسنجی گردید. افزون بر این، پارامترهایی مرتبط با نوع گیاه، شاخص بهره‌وری آب، حداکثر عمق ریشه و شاخص برداشت تعیین شد.

در ادامه، ابتدا عملکرد محصول، سپس میزان زیست‌توده و در نهایت، کارایی مصرف آب برای هربار تغییر در پارامترهای مدل بررسی شد تا نتایج شبیه‌سازی به داده‌های واقعی نزدیک‌تر شود (۳۵). همچنین مقادیر به‌دست‌آمده برای پارامترها از طریق واسنجی، معمولاً با مطالعات و نتایج دیگر پژوهش‌گران همخوانی داشته و در همان حدود قابل قبول قرار داشتند (۱ و ۳۸). نتایج حاصل از واسنجی پارامترها در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول (۳) پارامترهای گیاهی واسنجی شده ورودی مدل آکواکراپ
Table (3) Calibrated plant parameters as input for the AquaCrop model

پارامترها Parameters	میزان Value	واحد Unit	روش واسنجی Calibration approach
دمای پایه رشد Base temperature	10	درجه سلسیوس	تنظیم شد Adjusted
دمای بالا Upper temperature	35	درجه سلسیوس	تنظیم شد Adjusted
ضریب افزایش سطح سایه‌انداز Shade area increase coefficient	12.3	درصد در هر درجه روز	تنظیم شد Adjusted
ضریب کاهش پوشش در پیری Canopy decline coefficient in senescence	9.24	درصد در هر روز	پیش‌فرض Default
آستانه بالای ضریب تنش آبی برای گسترش تاجی Upper threshold of water stress coefficient for canopy expansion	0.5	-	پیش‌فرض Default
ضریب شکل منحنی گیاه ضریب تنش آبی خاک تاجی گیاه Shape factor for soil water stress curve in canopy growth	3	-	پیش‌فرض Default
آستانه بالای ضریب تنش آبی برای پیری پوشش تاجی Upper threshold of water stress coefficient for canopy senescence	0.6	-	پیش‌فرض Default
ضریب شکل منحنی تنش آبی برای پیری پوشش گیاه Shape factor for water stress curve in canopy senescence	3	-	پیش‌فرض Default
حد بالای تخلیه آب جهت توسعه برگ‌ها Upper limit of soil water depletion for leaf expansion	0.00	کسری از کل آب موجود در خاک	پیش‌فرض Default
حد پایین تخلیه آب جهت توسعه برگ‌ها Lower limit of soil water depletion for leaf expansion	0.4	کسری از کل آب موجود در خاک	پیش‌فرض Default
بهره‌وری آب تعدیل شده Adjusted water use efficiency	17	میزان بیوماس در هر متر مربع	تنظیم شد Adjusted
شاخص برداشت Harvest index (*HI*)	50	درصد	تنظیم شد Adjusted

عملکرد زیست توده و عملکرد دانه

آماره‌های خطا برای ارزیابی دقت مدل در شبیه‌سازی مقدار زیست توده نهایی و دانه برنج در جدول ۳ ارائه داده شده است. نتایج نشان داد که در مدل آکواکراپ ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) و آماره کارایی مدل (EF) برای مقدار زیست توده با ضریب تبیین (R^2) برابر با ۰/۶۶ به ترتیب ۰/۸۰ (بر حسب تن در هکتار)، ۲۰/۵۶ (بر حسب درصد) و کارایی ۰/۹۷ و برای عملکرد شلتوک با ضریب تبیین (R^2) برابر با ۰/۷۰ به ترتیب ۰/۴۰ (بر حسب تن در هکتار)، ۱۰/۳۹ (بر حسب درصد) ونیز کارایی ۰/۶۹ بود. همچنین به‌منظور ارزیابی تطابق نتایج شبیه‌سازی مدل آکوکراپ و مقادیر اندازه‌گیری‌شده عملکرد دانه و زیست‌توده کل در ۹۲ مزرعه برنج، از روش ترسیم خط یک‌به‌یک به‌عنوان ابزار گرافیکی مقایسه استفاده شد (شکل ۴).

در پژوهشی با هدف بررسی کارایی مدل آکواکراپ در شبیه‌سازی مقدار ماده خشک و شلتوک، نشان داده شد که این مدل از کارایی بالایی در برآورد مقدار تبخیر-

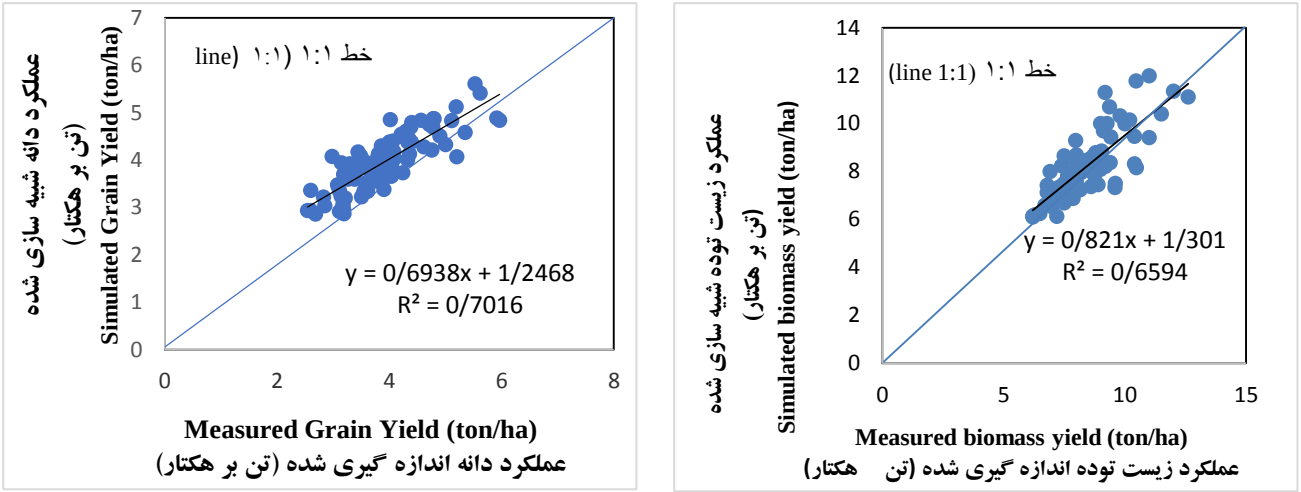
تعرق برخوردار بود و توانست مقدار عملکرد شلتوک را در مرحله رسیدگی با دقت قابل قبولی (RMSE=۳۳۸/۴۶ برحسب کیلوگرم بر هکتار و nRMSE= ٪۱۱/۸) در یک شالیزار واقع در موسسه تحقیقات برنج کشور در شهرستان رشت شبیه‌سازی نماید (۱). همچنین در بررسی آثار آبیاری بر عملکرد برنج با مدل آکواکراپ ضریب تبیین به دست آمده در شبیه‌سازی عملکرد زیستی بین ۰/۸۳ تا ۱ گزارش گردید (۳).

در تحقیقی با عنوان ارزیابی مدل آکواکراپ در تخمین عملکرد برنج در موسسه تحقیقات برنج واقع در شهرستان رشت تحت آبیاری تناوبی بعد از واسنجی و اعتبارسنجی مدل، نتایج نشان داد که مدل تحت اثر متقابل تاریخ کاشت و دور آبیاری توانست عملکرد محصول را با دقت بالا (ضریب تبیین وکارایی مدل بالای ۰/۷) به خوبی شبیه‌سازی کند. (۳۶).

جدول (٤) آماره‌های محاسبه شده برای ارزیابی وزن اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده زیست‌توده شلتوک توسط مدل آکواکراپ با مقادیر واقعی در شالیزار

Table (4) Calculated statistics for evaluating measured and simulated rice paddy biomass by the AquaCrop model compared with actual values in rice fields

مقادیر شبیه‌سازی شده با مدل آکواکراپ Simulated values by AquaCrop Model	RMSE تن بر هکتار Ton/ha	nRMSE درصد %	EF -	R^2 -
عملکرد زیست توده Biomass yield	0.80	20.56	0.97	0.66
عملکرد دانه شلتوک Paddy grain yield	0.40	10.39	0.69	0.70



شکل (٤) مقایسه مقدار زیست توده و شلتوک اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده با مدل آکواکراپ

Figure (4) Comparison of measured and simulated biomass and paddy grain values using the AquaCrop model

همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، توزیع داده‌ها در اطراف خط ۱:۱ متناسب و فاصله نقاط از آن کم است. بنابراین مدل به خوبی توانسته است مقدیر عملکرد زیست‌توده و دانه شلتوک را در ۹۲ شالیزار شبیه‌سازی نماید. در تحقیقی که در کشور بنگلادش انجام شد از مدل آکواکراپ برای شبیه سازی زیست توده برنج تحت سناریوهای آبیاری پیوسته و دور آبیاری سه و پنج روز استفاده شد. نتایج نشان داد که خطای شبیه سازی در دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی به ترتیب ۷/۷- ۵/۵ درصد و ۲/۸- ۵/۱۱ درصد و در حد مطلوب بود (۲۸). در تحقیقی در کشور چین از مدل آکواکراپ برای شبیه سازی عملکرد برنج استفاده شد. نتایج نشان داد که پس از واسنجی مقدار آماره nRMSE حدود ۹/۹ درصد بود که در دسته عالی قرار داشت (۴۶). همچنین در پژوهشی دیگر، محققان از مدل آکواکراپ برای شبیه سازی مدیریت تنش شوری و خشکی برنج در موسسه تحقیقات برنج کشور استفاده نمودند. آنان داده‌های برداشت شده از کشت گلدانی برنج را توسط مدل آکواکراپ ارزیابی کرده و نشان دادند که این مدل در شوری‌های کمتر از آستانه تحمل شوری گیاه دقت بهتری داشته است (۷).

در پژوهشی دیگر از مدل آکواکراپ برای شبیه سازی عملکرد و بهره‌وری مصرف آب در کشت برنج تحت شرایط مدیریت آبیاری و تاریخ کاشت استفاده شد. نتایج این پژوهش نشان داد که مقدار آماره nRMSE برای عملکرد و زیست توده برنج به ترتیب ۹ و ۵ درصد بود، همچنین ضریب تبیین و کارایی مدل آکواکراپ به ترتیب بیشتر از ۰/۷ و ۰/۶ بود (۵). در تحقیقی که از مدل آکواکراپ برای تخمین عملکرد برنج تحت کشت آبیاری تناوبی در شهرستان بابلسر استفاده شده بود، گزارش نمودند که مدل واسنجی شده آکواکراپ به خوبی توانست عملکرد برنج را با دقت بالا ($R^2 >$ ۰/۸۶) در سطح مزرعه تعیین کند (۳۶).

در پژوهشی با هدف ارزیابی عملکرد مدل آکواکراپ در شبیه‌سازی عملکرد برنج با استفاده از روش آبیاری متناوب پس از واسنجی مدل شاخص‌هایی مانند کارایی مدل (EF) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) نشان‌دهنده عملکرد بالا در پیش‌بینی تاج پوشش گیاهی، زیست‌توده و عملکرد دانه گزارش شدند. همچنین نتایج این مطالعه نشان داد که مدل اکواکراپ ابزاری مناسب برای بهینه‌سازی مصرف آب و بهبود برآورد عملکرد برنج در مناطقی است که با کمبود آب مواجه‌اند (۳۴).

نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر با تمرکز بر شبیه‌سازی عملکرد زیست‌توده و دانه شلتوک برنج رقم هاشمی در شالیزارهای شهرستان صومعه‌سرا، عملکرد و قابلیت مدل آکواکراپ را در شرایط واقعی مزرعه در مقیاس منطقه‌ای مورد ارزیابی قرار داد. نتایج نشان داد که مدل آکواکراپ با داشتن مقادیر ضریب تعیین (R^2) برابر با ۰/۷۰ برای دانه شلتوک و ۰/۶۶ برای زیست‌توده و میانگین جذر مربعات خطا (RMSE) بر حسب تن در هکتار برای زیست‌توده با مقدار ۰/۸۰ و برای دانه شلتوک با مقدار ۰/۴۰، توانایی بالایی در شبیه‌سازی شرایط واقعی را نشان داد. کارایی بالای مدل در برآورد عملکرد در مقیاس منطقه‌ای بیانگر آن است که از این ابزار در مدیریت آبیاری یک منطقه وسیع شالیزاری می‌توان استفاده نمود تا ضمن کاهش مصرف آب با حفظ عملکرد، بهره‌وری آب آبیاری و سایر نهاده‌های تولید بهبود یابد. در پژوهش حاضر مدل علی‌رغم داده‌های ورودی کم در شبیه‌سازی زیست‌توده و دانه شلتوک برنج، با وجود اینکه ارزیابی در ۹۲ شالیزار و مدیریت مختلف زراعی و موقعیت مکانی مختلف انجام شده است، با این حال توانسته‌است با لحاظ نمودن این تغییرات کماکان عملکرد محصول اعم از دانه شلتوک و زیست‌توده را به خوبی شبیه‌سازی کند. بنابراین مدل آکواکراپ می‌تواند به عنوان ابزار مدیریت زراعی مد نظر

باشد. این مدل به‌طور مؤثر توانست تأثیر متقابل پارامترهای خاک، آب، و مدیریت مزرعه را در تولید محصول برنج شبیه‌سازی نموده و داده‌های بسیار قابل اعتمادی را ارائه دهد. با توجه به ورودی‌های محدود موردنیاز برای اجرای این مدل، استفاده از آکواکراپ می‌تواند ابزار ارزشمندی برای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی به‌ویژه در شرایط بحرانی نظیر کمبود منابع آب، تغییرات اقلیمی و بهبود بهره‌وری کشاورزی باشد (۴۱). علاوه بر این، تطبیق‌پذیری این مدل در شرایط مختلف جغرافیایی و مدیریتی، آن را به یکی از ابزارهای مناسب تحلیل سناریوهای مدیریتی در بخش کشاورزی تبدیل کرده است. با این حال، گسترش مطالعات مشابه در دیگر مناطق جغرافیایی و بهره‌گیری از این مدل در سایر روش‌های مدیریتی و اقلیمی، می‌تواند راهکارهای بیشتری برای بهبود بهره‌وری محصول و کاهش اثرات زیست‌محیطی نامطلوب ناشی از مدیریت ناکارآمد منابع فراهم سازد.

References

1. Abdi, A., Asadi Kapourchal, S., Vazifehdoust, M. and Rezaei, M. 2022. The effect of satellite and ground-observed dry matter updates on the accuracy of Hashemi rice yield simulation using SWAP model. Water Management in Agriculture, 7(2):103-118 (In Persian). https://dorl.net/dor/20.1001.1.24764531.1399.7.2.8.7

2. Abdul-Ganiyu, S., Kyei-Baffour, N., Agyare, W. A., and Dogbe, W. 2018. Evaluating the Effect of Irrigation on Paddy Rice Yield by Applying the AquaCrop Model in Northern Ghana. In Strategies for Building Resilience against Climate and Ecosystem Changes in Sub-Saharan Africa. Springer, Singapore. pp: 93-116.

DOI 10.1007/978-981-10-4796-1_6

3. Aggarwal, P. K., Kalra, N., Singh, A. K., and Sinha, S. K. 1994. Analyzing the limitations set by climatic factors, genotype, water and nitrogen availability on productivity of wheat I. The model description, parametrization and validation. Field Crops Research, 38(2): 73–91. https://doi.org/10.1016/0378-4290(94)90003-5

4. Ahmadloo, F, Rezaei, A, Farahpour, M, Calagari, M and Mehrabi A. 2021. Investigating the area and production of poplar plantations in Sowmeeh Sara city using field data and GIS. Ecology of Iranian Forest, 918 (10):159-68 (In Persian). http://dx.doi.org/10.52547/ifej.9.18.159

5. Alaee Bazkiaei, P., Kamkar, B., Amiri, E., Kazemi, H. and Rezaei, M. 2020. Evaluation of AquaCrop and ORYZA2000 models in simulating rice yield under crop managements in Rasht City. Iranian Journal of Field Crops Research, 21(184): 401-41. (In Persian). https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20081472.1399.18.4.3.4

6. Allen, R., G., Pereira, L. S., Raes, D. and Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy. Pp:56. https://www.fao.org/3/x0490e/x0490e00.

7. Amiri, E., Rezaeii, M. and Shirshahi, F. 2019. The Performance of the Aquacrop Model under Deficit and Saline Irrigation Management of Rice. Water Management in Agriculture, 6(1): 13-22 (In Persian). https://agris.fao.org (DOI not assigned).

8. Booltink, H. W. G. and Buma, J. 2002. Steady flow soil column method. In: Dane, J. H., and G. C. Clake. eds. Methods of soil analysis. Part 4. Physical Methods. SSSA Book Series, No:5. Madison, Wisconsin, USA. Pp: 812- 814. https://doi.org/10.2136/sssabookser5.4.c35.

9. Boote, K., Hoogenboom, G., Porter, C. H., Boote, K. J., Shelia, V. and Wilkens, P. W. 2019. The DSSAT crop modeling ecosystem. In K. Boote Ed., Burleigh Dodds Series in Agricultural Science. Pp: 173–216. https://doi.org/10.19103/AS.2019.0051.09.

10. Bouman, B. A. M., Kropff, M. J., Tuong, T. P., Wopereis, M. C. S., Berge, H. F. M., and Van Laar, H. H. 2001. Modeling lowland rice. International Rice Research Institute (IRRI), Los Baños, Philippines. https://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/122286.

11. Brisson, N., Gary, C., Justes, E., Roche, R., Mary, B., Ripoche, D., Zimmer, D., Sierra, J., Bertuzzi, P., Burger, P., and Bussiere, F. 2003. An overview of the crop model STICS. European Journal of Agronomy, 18(3): 309–332. https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00110-7

12. Cheenkachorn, K. 2007. Drying of rice paddy using a microwave-vacuum dryer. In Proceedings of the European Congress of Chemical Engineering Copenhagen, Denmark. pp: 16–20. https://api.semanticscholar.org/CorpusID:16410456

13. Dane, J.H. and Hopmans, J.W. 2002. Methods of Soil Analysis. Part 4, Physical Methods. Soil Science Society of America. Madison, WI. PP: 684-688. doi:10.2136/vzj2016.09.0080

14. De Wit, A. and Boogaard, H. 2021. A gentle introduction to WOFOST. Wageningen Environmental Research https://www.wur.nl/en/ show/A-gentl e-intro ducti on-to- WOFOST. (DOI not assigned)

15. Ebrahimipak, N., Egdarnejad, A. and Khodadadi Dehkordi, D. 2018. Evaluation of AquaCrop Model to Simulate Corn Yield under Water deficit and Superabsorbent application. Irrigation and Water Engineering, 8(3):166-184. (In Persian). https://www.waterjournal.ir/article_74092_6b2564f3cb5a5d3c0a6266e8fb3805b2.pdf.

16. Geertz, S. and Raes, D. 2009. Deficit irrigation as on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. Agricultural Water Management, 9(6): 1275-1284. DOI:10.1016/j.agwat.2009.04.009.

17. Grossman, R.B. and Reinsch, T.G. 2002. Bulk density and linear extensibility. P 201-228. In: J.H. Dane and G.C. Clake eds., Methods of soil analysis. Part 4. Physical Methods: Soil Science Society of America Book Series No:5. Madison, Wisconsin, USA. https://doi.org/10.2136/sssabookser5.4.c9

18. Gee, G.W. and Or, D. 2002. Methods of Soil Analysis. Part 4. Physical Methods: Soil Science Society of America Book Series, Madison. Pp: 255-293. doi:10.2136/vzj2016.09.0080

19. Holzworth, D.P., Huth, N.I., De Voil, P.G., Zurcher, E.J., Herrmann, N.I., McLean, G., Chenu, K., Van Oosterom, E.J., Snow, V. and Murphy, C., 2014. APSIM–evolution towards a new generation of agricultural systems simulation. Environmental Modelling and Software, 6(2): 327-350. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.07.009

20. Hoogenboom G., Wilkens P.W., Thornton P.K., Jones J.W., Hunt L.A. and Imamura, D.T. 1999. Decision support system for agro technology transfer version 3.5. In: University of Hawaii. Honolulu. Pp: 1 -36. https://shop.bdspu blish ing.com/store/ bds/detai l/produ ct/3-190-97817 86765185.

21. ICID. 2021. Agricultural water management for sustainable rural development Annual report. International Commission on Irrigation and Drainage. Pp: 96. (access may November 8, 2022) https://icid-ciid.org/icid_data_web/ar_2021.pdf

22. Jagermeyr, J., Robock, A., Elliott, J., Muller, C., Xia, L., Khabarov, N., Folberth, C., Schmid, E., Liu, W., Zabel, F., Rabin, S. S., Puma, M. J., Heslin, A., Franke, J., Foster, I., Asseng, S., Bardeen, C. G., Toon, O. B., and Rosenzweig, C. 2020. A regional nuclear conflict would compromise global food security. Proceedings of the National Academy of Sciences, 117(13): 7071–7081. https://doi.org/10.1073/pnas.19190 49117

23. Jin, Z., Zhuang, Q., Tan, Z., Dukes, J. S., Zheng, B., and Melillo, J. M. 2016. Do maize models capture the impacts of heat and drought stresses on yield? Using algorithm ensembles to identify successful approaches. Global Change Biology, 22(9): 3112–3126. https://doi.org/10.1111/gcb.13376

24. Kheir, A. M. S., Ammar, A., Attia, A., Elnashar, A., Ahmad, S., El-Gioushy, S. F. and Ahmed, M. 2022. Cereal crop modeling for food and nutrition security. In M. Ahmed Ed., Global agricultural production: resilience to climate change. Springer International Publishing. pp: 183–195. https://doi.org/10.1007/978-3-031-1497-3_6

25. Kogan, F. 2019. Food security: The twenty-first century issue. In F. Kogan Ed., Remote sensing for food security. Springer International Publishing: 9–22. https://doi.org/10.1007/978-3-319-96256-6_2.

26. Krause, P., Boyle, D.P. and Bäse, F. 2005. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. Advances in Geosciences, 5 (1): 89-97. https://doi.org/10.5194/adgeo-5-89-2005, 2005

27. Liliane, T.N. and Charles, M.S., 2020. Factors affecting yield of crops. Agronomy-Climate Change and Food Security. Pp: 9. https://doi.org/10.5772/intechopen78102.

28. Maniruzzaman, M., Talukder, M. S. U., Khan, M. H., Biswas, J. C., and Nemes, A. 2015. Validation of the AquaCrop model for irrigated rice production under varied water regimes in Bangladesh. Agricultural Water Management, 15(9): 331–340. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.06.022

29. Nelson, D. W. and Summers, L. E., 1996. Total carbon, organic carbon, and organic matter. Methods of soil analysis: Part 3 Chemical Methods, 10(5): 961-1010. https://doi.org/10.1038/s41893-018-0192-z

30. Neupane, D., Adhikari, P., Bhattarai, D., Rana, B., Ahmed, Z., Sharma, U. and Adhikari, D. 2022. Does climate change affect the yield of the top three cereals and food security in the world? Earth, 3(1): 45–71. https://doi.org/10.3390/earth3010004

31. Newton, A. C., Johnson, S. N. and Gregory, P. J. 2011. Implications of climate change for diseases, crop yields and food security. Euphytica, 179(1): 3–18. https://doi.org/10.1007/s10681-011-0359-4.

32. Ouda, S., Zohry, A.E., Ouda, S. and Zohry, A.E., 2022. Water-smart practices to manage water scarcity. Clim. -Smart Agric.: Reducing Food Insecurity, Pp: 3–26. https://doi.org/10.1007/978-3-030-93111-7_1

33. Peng, B., Guan, K., Chen, M., Lawrence, D. M., Pokhrel, Y., Suyker, A., Arkebauer, T. and Lu, Y. 2018. Improving maize growth processes in the community land model: Implementation and evaluation. Agricultural and Forest Meteorology. Pp: 64–89. https://doi.org/10.1016/j.agrfo rmet.2017.11.012

34. Porras-Jorge, R., Ramos-Fernández, L., Ojeda-Bustamante, W. and Ontiveros-Capurata, R.E. 2020. Performance assessment of the AquaCrop model to estimate rice yields under alternate wetting and drying irrigation in the coast of Peru. Scientia Agropecuaria, 11(3): 309-21. http://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2020.03.03

35. Pourgholam Amiji, M., Liaghat, A. and Khoshravesh, M. 2020. Evaluation of AquaCrop Model for Estimating Rice Yield under Alternative Irrigation. Research Journal of Water Engineering and Agriculture, 11(1): 305-320. (In persian). Doi: 10.22125/iwe.2020.114972

36. Pourgholam Amiji, M., Liaghat, A., Nazi Ghameshlou, A. and Khoshravesh, M. 2018. Effect of Shallow and Saline groundwater on Rice Growth and Biomass. Journal of Water Research in Agriculture, 32 (4): 499-516 (In Persian). Doi: 10.22092/jwra.2019.118520

37. Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C. and 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. https://doi.org/10.2134/agron j2008.0140s

38. Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C. and Fereres, E. 2022. Chapter 3, Calculation Procedures–AquaCrop, Version 7.0. In Reference Manual–AquaCrop, Version 7.0. https://www.fao.org/3/br248e/br248e.pdf

39. Raes, D., Steduto, P. and Hsiao, A. 2018. AquaCrop Version 6.0 - 6.1 Reference Manual, FAO, Rome, Italy. https://www.fao.org/3/br248e/br248e.pdf

40. Remesan, R., Shamim, M.A. and Han, D. 2008. Model data selection using gamma test for daily solar radiation estimation. Hydrological Processes, 22: 4301-4309. https://doi.org/10.1002/hyp.7044

41. Rinaldi M, Losavio, N. and Flagella, Z. 2003. Evaluation and application of the OILCROP-SUN model for sunflower in southern Italy. Agricultural Systems, 78(1): 17-30. https://doi.org/10.1016/S0308-521X(03)00030-1

42. Sparks, D.L. 1996. Methods of Soil Analysis Part 3 Chemical Methods." Soil Science Society of America, American Society of Agronomy, Madison. https://doi.org/10.1201/9780203739433

43. Walkley, A. and Black, I.A., 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. Soil Science, 37(1): 29-38. http://dx.doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003

44. Webber, H., Gaiser, T. and Ewert, F. 2014. What role can crop models play in supporting climate change adaptation decisions to enhance food security in Sub-Saharan Africa? Agricultural Systems, 12(7): 161–177. https://doi.org/10.1016/j. agsy.2013.12.006

45. Yan, J., Wu, Q., Qi, D. and Zhu, J., 2022. Rice yield, water productivity, and nitrogen use efficiency responses to nitrogen management strategies under supplementary irrigation for rain-fed rice cultivation. Agricultural Water Management, 26(3): 107486. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107486

46. Zhai, B., Fu, Q., Li, T., Liu, D., Ji, Y., Li, M. and Cui, S. 2019. Rice irrigation schedule optimization based on the AquaCrop model: study of the Longtouqiao irrigation district. Water, 11(9): 1799. DOI: 10.3390/w11091799