

Simulation of Rice Yield in Different Cropping-Irrigation Managements Using AquaCrop Model

P. Zolfaghary, A. HezarJeribi*^{ID}, M. I. Asadi, and E. Amiri

PhD student in Irrigation and Drainage, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Water and Soil, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Iran. parniyan.zolfaghary@gmail.com
Associate Prof., Department of Water Science and Engineering, Faculty of Water and Soil, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. hezab10@yahoo.com
Research Assistant Prof., and Master of Science in Technical and Engineering Research Department, Golestan Agricultural and Natural Resources Research Center, Gorgan, Iran. iwc977127@yahoo.com
Professor, Department of Water Engineering Lahijan Branch, Islamic Azad University, Lahijan, Iran. eamiri57@yahoo.com

Received: April 2025 and Accepted: April 2025

Abstract

Given the high water requirement of rice, it is very important to know its performance under different cultivation-irrigation methods and requires numerous experiments. Since conducting numerous field experiments requires a lot of time and expenses, the use of plant models can be a solution in this respect. Plant models simplify the understanding of the complex process of crop response to environmental conditions and are very practical in this regard. The model provided by FAO (AquaCrop) is a water-based model that has been developed as a support tool in planning and analyzing various crop management scenarios. In this study, the AquaCrop model was used to calibrate and verify various cultivation-irrigation methods, including transplanting-flooding, dry seeding-irrigation, and dry seeding-drip irrigation. Results of error evaluation statistics, including normalized root mean square error (NRMSE) and Wilmot index (d) for leaf area index ($2.25 < \text{NRMSE} < 4.16$ and $0.96 < d < 0.98$), showed that the AquaCrop model performed well in canopy modeling. Also, the error statistics for grain yield and biomass indices (NRMSE and d for grain yield were 5.12 and 0.95, and for biomass were 12.38 and 0.89), respectively, which were in the “very good” and “good” range. Therefore, this model can be used with appropriate accuracy to investigate management options in different crop-irrigation systems to improve water productivity in rice cultivation.

Keywords: Rice direct seeding, Transplanting, Crop modelling, Modern irrigation methods

* - Corresponding Author's email: hezab10@yahoo.com
<https://doi.org/10.22092/jwra.2025.369011.1072>

شبیه‌سازی عملکرد برنج در مدیریت‌های مختلف کشت-آبیاری با استفاده از مدل

آکواکراپ (AquaCrop)

پروین ذوالفقاری، ابوطالب هزارجریبی* , محمداسماعیل اسدی و ابراهیم امیری

دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.

parniyan.zolfaghary@gmail.com

دانشیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.

hezab10@yahoo.com

استادیار پژوهش و کارشناس ارشد بخش تحقیقات فنی و مهندسی، بخش فنی و مهندسی، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی گلستان، گرگان، ایران.

iwc977127@yahoo.com

استاد، گروه مهندسی آب، واحد لاهیجان، دانشگاه آزاد اسلامی، لاهیجان، ایران.

eamiri57@yahoo.com

دریافت: فروردین ۱۴۰۴ و پذیرش: شهریور ۱۴۰۴

چکیده

با توجه به نیاز آبی زیاد برنج، اطلاع از عملکرد آن در روش‌های مختلف کشت - آبیاری بسیار اهمیت دارد و نیازمند آزمایش است. از آنجا که انجام این آزمایش‌های میدانی بسیار زمان‌بر و پُر هزینه هستند، استفاده از مدل‌های گیاهی در این زمینه می‌تواند راهگشا باشد. مدل‌های گیاهی، شناخت فرآیند پیچیده پاسخ محصول به شرایط محیطی را ساده می‌کنند و از این نظر بسیار کاربردی هستند. مدل آکواکراپ ارائه شده توسط فائو (AquaCrop) یک مدل مبتنی بر آب است که به عنوان یک ابزار پشتیبانی در برنامه‌ریزی و تحلیل سناریوهای مختلف مدیریت زراعی توسعه داده شده است. در این تحقیق از مدل آکواکراپ (AquaCrop) برای واسنجی و صحت‌سنجی نظام‌های مختلف کشت - آبیاری شامل نشایی - غرقابی، خشکه کاری - بارانی و خشکه کاری - قطره‌ای استفاده شد. نتایج بررسی آماره‌های ارزیابی خطا شامل میانگین خطای نرمال شده (NRMSE) و شاخص ویلموت (d) برای شاخص سطح برگ ($0.16 < \text{NRMSE} < 0.25$ و $0.98 < d < 0.96$) نشان داد که آکواکراپ در مدل‌سازی تاج پوشش به خوبی عمل می‌کند. همچنین، آماره‌های خطا برای شاخص‌های عملکرد دانه و زیست‌توده (NRMSE و d در عملکرد دانه برابر ۵/۱۲ و ۰/۹۵ و برای زیست‌توده برابر با ۱۲/۳۸ و ۰/۸۹ بود) به ترتیب در محدوده بسیار خوب و خوب قرار گرفتند. بنابراین مدل مزبور را می‌توان به عنوان مدلی با دقت مناسب، برای بررسی گزینه‌های مدیریتی در نظام‌های مختلف کشت-آبیاری و برای بهبود بهره‌وری آب در کشت برنج استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: خشکه کاری برنج، کشت نشایی، مدل‌سازی گیاهی، روش‌های نوین آبیاری

* - آدرس ایمیل نویسنده مسئول: hezab10@yahoo.com



مقدمه

برنج (*Oryza sativa* L.) دومین غله تولید شده در جهان است و نقش مهمی در امنیت غذایی دارد (پوراس و همکاران، ۲۰۲۰). در ایران، برنج با سطح زیر کشت ۷۹۱ هزار هکتار، دومین گیاه زراعی مهم پس از گندم محسوب می‌شود. بیشترین سطح زیر کشت به ترتیب مربوط به استان‌های مازندران، گیلان، خوزستان و گلستان است که در مجموع ۹۱ درصد از سطح زیر کشت و ۹۰ درصد از تولید کل کشور را به خود اختصاص می‌دهند (آمارنامه جهاد کشاورزی، ۱۴۰۱). کشت برنج از دیرباز به صورت نشایی بوده است که دو تا سه برابر دیگر غلات به آب نیاز دارد (تانگ و همکاران، ۲۰۰۲). افزون بر مصرف زیاد آب (ادهیکاری و همکاران، ۲۰۲۱)، ایجاد شرایط غرقابی و عملیات گلخرابی نیاز به مصرف آب و انرژی زیادی دارد و یک عمل طاقت‌فرسا است. کشت سنتی برنج همچنین به نیروی کار برای پرورش خزانه، ریشه‌کن کردن علف‌های هرز، حمل و نقل و نشاکاری نیاز دارد که در بازه اوج فعالیت در دسترس نیست. تأمین برق نامطمئن و گران‌قیمت نیز بر حیات روش سنتی تأثیر می‌گذارد. از این رو، کمبود آب، انرژی و نیروی کار عوامل محدودکننده اصلی هستند که تولیدکنندگان را وادار می‌کند تا به سمت روش‌های کارآمد، جدید و صرفه‌جویانه حرکت کنند (اسلام و همکاران، ۲۰۰۸).

کشت مستقیم برنج شامل کشت مستقیم برنج در مزارع، بدون خزانه‌گیری و انجام عمل گلخرابی است (فاروق و همکاران ۲۰۱۱؛ اشفق و همکاران ۲۰۱۸). کاشت در بستر خشک^۱، کاشت در بستر مرطوب^۲ و کاشت در بستر اشباع^۳ سه روش اصلی کاشت مستقیم بذر برنج هستند (ادهیکاری و همکاران، ۲۰۲۱). این روش مزایای بسیاری را نسبت به روش نشایی سنتی فراهم می‌کند، مانند استفاده کارآمد از آب یا افزایش بهره‌وری آب (ژو و همکاران، ۲۰۱۹)، کاهش گازهای گلخانه‌ای، آسانی توسعه برای مکانیزاسیون (فاروق و همکاران ۲۰۱۱) و بازده اقتصادی

بالتر (بوشان و همکاران ۲۰۰۷). همچنین ممکن است عملکرد و کیفیت بالاتری را فراهم کند، استقرار بوته را بهبود بخشد (اشفق و همکاران ۲۰۱۸) و نمو زودتر را تضمین کند (فاروق و همکاران ۲۰۱۱). افزون بر این، کاشت به موقع محصول بعدی را آسان می‌کند و از ناسازگاری‌های خاک (سدافیک) در اثر تناوب کشت جلوگیری می‌کند؛ بنابراین پایداری سیستم کشت برنج-گندم را بهبود می‌بخشد (انجوم و همکاران، ۲۰۱۹).

با توجه به کاهش منابع آب در ایران، مطالعات متعددی در رابطه با خشکه‌کاری انجام شده است. کیانی و همکاران (۱۴۰۰) در پژوهشی، با مقایسه روش‌های مستقیم و نشایی برنج در روش‌های مختلف آبیاری در استان گلستان گزارش کردند که با تبدیل کشت نشایی سنتی و روش آبیاری غرقابی به کشت مستقیم بذر و روش آبیاری قطره‌ای اگرچه در مصرف آب در حدود ۴۸ درصد صرفه جویی شد، اما عملکرد هم در حدود ۴۵ درصد کاهش یافت. ذوالفقاری و همکاران (۱۴۰۱) گزارش کردند که کشت مستقیم با استفاده از آبیاری بارانی با ۶۱ درصد صرفه جویی آب، در صورت مدیریت صحیح مزرعه می‌تواند تا ۷۰ درصد عملکرد داشته باشد. البته شناخت بیشتر ابعاد این موضوع نیاز به اندازه‌گیری‌های میدانی بسیار گسترده‌ای دارد که معمولاً زمان‌بر و پرهزینه است. برای رفع این مشکلات می‌توان از مدل‌های گیاهی برای شبیه‌سازی فرآیند رشد محصول استفاده نمود (موسوی و همکاران، ۱۴۰۱).

مدل‌سازی محصول می‌تواند برای تعیین کمیت اثرات تغییر شرایط محیطی بر عملکرد محصول استفاده شود (پریرا و همکاران، ۲۰۰۹؛ گیرتس و همکاران، ۲۰۰۹؛ شفیعی و همکاران، ۲۰۱۴). مدل‌های شبیه‌سازی ابزارهای اساسی برای بهبود رویکردهای مدیریتی مختلف در مناطق خشک و نیمه‌خشک برای دستیابی به حداکثر تولید با راندمان کاربرد آب مناسب هستند (تومی و همکاران، ۲۰۱۶). در این راستا، مدل‌های متعددی توسعه یافته‌اند.

³ -Water- seeded¹ -Dry-seeded² -Wet-seeded

امیری و همکاران (۲۰۱۴) ضمن مقایسه عملکرد مدل‌های CERES-RICE، AquaCrop و ORYZA2000 گزارش کردند که مدل CERES-Rice بیشترین صحت را در شبیه‌سازی عملکرد دانه نشان داد (مقدار ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) برابر ۱۶ درصد بود). با این حال، مدل AquaCrop عملکرد بیولوژیکی را در مقایسه با مدل‌های دیگر صحیح‌تر تخمین زد ($NRMSE = 15$).

مدل شبیه‌سازی AquaCrop در کتابچه‌های خود روشی را برای بررسی عملکرد محصول توسعه می‌دهد. این مدل رشد و عملکرد محصولات را به‌طور کامل در شرایط مختلف آب‌وهوا، خاک و مدیریت آبیاری برای کشت برنج شبیه‌سازی کرده است (رائس و همکاران، ۲۰۱۸). مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی توسعه و عملکرد برنج در شرایط غرقابی در برخی مناطق جهان واسنجی و صحت سنجی شده است (عبدالغنی و همکاران، ۲۰۱۸؛ لین و همکاران، ۲۰۱۲).

سعادت و همکاران (۲۰۱۱) برای شبیه‌سازی برنج از مدل AquaCrop استفاده کردند و نشان دادند این مدل به‌خوبی می‌تواند عملکرد محصول را تعیین نماید. امیری (۲۰۱۶) گزارش کرد که این مدل زیست‌توده کل و خوشه را به‌دقت و با R^2 نسبتاً بالا (≥ 0.90) شبیه‌سازی کرده است. همچنین مدل NRMSE را برای زیست‌توده کل و متوسط خوشه (به ترتیب ۶٪ و ۳۶٪) نشان داد و برآورد مناسبی از تاج پوشش با NRMSE و R^2 به ترتیب ۲۸ و ۸۲٪ داشت. وی عملکرد دانه برنج پیش‌بینی‌شده و مشاهده‌شده و زیست‌توده نهایی را به ترتیب با R^2 برابر ۸۱٪ و ۸۲٪ و NRMSE برابر ۱۳ و ۱۰ درصد گزارش کرد. پیرمادیان و همکاران (۲۰۲۰) به شبیه‌سازی بهره‌وری آب برنج شلتوک با استفاده از مدل AquaCrop در دو منطقه مرطوب و نیمه‌خشک ایران پرداختند. بر اساس این مطالعات، تاج پوشش و زیست‌توده برنج با معیار خوب ($10 < NRMSE < 20$) شبیه‌سازی شد؛ درحالی‌که شبیه‌سازی عملکرد دانه توسط مدل عالی بود ($NRMSE < 10$).

امیری و همکاران (۱۳۹۸) عملکرد مدل AquaCrop را در شرایط مدیریت تنش شوری و خشکی مطالعه کردند. نتایج نشان داد که این مدل زیست‌توده کل را به‌طور میانگین با ضریب همبستگی و ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده‌ی ۰/۸۳ و ۱۱٪ در تیمارهای شوری کمتر از آستانه تحمل گیاه و تا ۰/۶ و ۳۸٪ در تیمارهای شوری بیشتر از آستانه و عملکرد دانه را برای همین تیمارها به ترتیب از ۰/۸۵ و ۹٪ تا ۰/۴۳ و ۳۳٪ شبیه‌سازی کرد که عملکرد قابل قبولی است. الصادق و همکاران (۲۰۲۳) با بررسی تعادل آب در مزرعه خشکه‌کاری برنج در رژیم‌های مختلف آبیاری نشان دادند که نتایج شبیه‌سازی AquaCrop همبستگی خوبی بین عملکرد برنج مشاهده شده و شبیه‌سازی شده در هر دو فصل نشان داد (به ترتیب ۰/۹۹ و $R^2 = 0.98$ در سال‌های ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰). همچنین این مدل عملکرد عالی در شبیه‌سازی پوشش تاج پوشش و زیست‌توده ($5 \leq NRMSE \leq 15$)، شاخص ویلموت (d) $0.99 \leq R^2 \leq 0.99$ ، و ضریب عملکرد (EF) بین ۰/۹۹ تا ۰/۹۲ نشان داد. موسوی و همکاران (۱۴۰۱) از AquaCrop به‌منظور شبیه‌سازی اثر روش کاشت شامل نشایی، مستقیم رایج در منطقه و خشکه‌کاری بر عملکرد، زیست‌توده، روند توسعه گیاه و کارایی مصرف آب سه رقم مختلف گیاه برنج استفاده نمودند. نتایج نشان‌دهنده دقت کافی AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد، زیست‌توده و کارایی مصرف آب برنج بود.

در واقع، آسانی مدل AquaCrop، تعداد محدود پارامترهای ورودی و دقت تخمین‌ها، آن را به‌عنوان مدلی مناسب برای شبیه‌سازی رشد محصول در مدیریت‌های مختلف آبیاری معرفی می‌کند. اگرچه کارایی این مدل روی برنج آزمایش شده است، ولی مطالعات محدود اطلاعات مناسبی را برای ارزیابی عملکرد مدل در شبیه‌سازی تولید برنج در روش‌های مختلف کشت - آبیاری با استفاده از مدل این نرم‌افزار ارائه کرده‌اند. از این رو، این تحقیق با هدف شبیه‌سازی تاج پوشش، زیست‌توده و عملکرد دانه در روش‌های مختلف کشت - آبیاری اعم از کشت نشایی - آبیاری

غرقابی، کشت مستقیم- آبیاری بارانی و کشت مستقیم- آبیاری قطره‌ای با استفاده از مدل AquaCrop انجام شد.

مواد و روش‌ها

موقعیت منطقه مورد مطالعه

آزمایش مزرعه‌ای در استان گلستان، شهرستان گرگان، شهر سرخنگلاته در سه مزرعه مجاور که هریک دارای مساحت یک هکتار بودند در سال زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ انجام گردید. طول جغرافیایی منطقه مورد مطالعه از ۲۸° ۳۰' شمالی تا ۲۸° ۴۰' شرقی و عرض جغرافیایی آن ۳۰° ۲۸' شمالی با ارتفاع ۱۰۲ متر از سطح دریا است. رقم فجر که به‌عنوان یک رقم اصلاح‌شده و پرمحصول شناخته می‌شود، در آزمایش در قالب طرح کاملاً تصادفی مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش، تأثیر دو روش کاشت (نشایی و خشکه‌کاری) و همچنین روش‌های مختلف آبیاری غرقابی (TFGF)، بارانی (DSGF) و قطره‌ای (DTGF)، در هر نوع کاشت بررسی شد. در روش نشایی، بذرها ۳۵ روز پیش از انتقال به مزرعه در خزانه کشت شدند و سپس به مزارعی که از پیش آماده‌سازی (گلخراب) شده بودند، منتقل شدند. در روش خشکه‌کاری، از روش کشت بذر در بستر خشک استفاده شد. روش‌های آبیاری مزارع خشکه‌کاری شامل آبیاری قطره‌ای و بارانی بود، درحالی‌که در مزارع نشایی از آبیاری غرقابی استفاده شد.

نیاز آبی برنج با استفاده از نرم‌افزار CropWat محاسبه گردید. سپس بر اساس هر روش آبیاری، مشخصات سیستم آبیاری تعیین و برنامه‌ریزی آبیاری تهیه گردید. در روش آبیاری قطره‌ای، نوارهای تیپ درزدار با فاصله ۵۰ سانتی‌متر از یکدیگر، فاصله مجاری ۲۰ سانتی‌متر، قطر ۱۶ میلی‌متر و دبی سه لیتر در ساعت استفاده شد. آبیاری بارانی نیز به‌صورت سیستم کلاسیک ثابت با آب‌پاش متحرک انجام شد. برای اندازه‌گیری حجم آب مصرفی، پیش از شروع خاک‌ورزی، کنتور حجمی نصب و میزان آب مصرفی هر مزرعه از ابتدا ثبت شد. همچنین، شیرهای کنترلی روی لوله‌های ورودی زمین نصب شدند تا کنترل جریان آب ممکن شود.

خاک مزرعه دارای بافت سیلتی - لوم بود. پیش از آغاز عملیات کشاورزی و در فروردین‌ماه سال ۱۴۰۰، نمونه‌گیری از خاک برای انجام آزمون‌های خاک و تعیین توصیه‌های کودی در دو عمق صفر تا ۳۰ و ۳۰ تا ۶۰ سانتی‌متر انجام شد. ویژگی‌های خاک منطقه در جدول ۱ ارائه شده است. با توجه به نتایج آزمایش‌های خاک و توصیه‌های کودی ارائه‌شده، کوددهی مناسب در مزارع انجام شد. برای کنترل آفات و علف‌های هرز، از علف‌کش‌های پیش از کشت و پیش از نشاکاری بذرها از قارچ‌کش استفاده شد. در مرحله داشت، عملیات کنترل شامل چهار مرحله سم‌پاشی با حشره‌کش و یک مرحله وجین‌دستی انجام گردید.

جدول ۱- ویژگی‌های خاک مزرعه مطالعاتی

عمق Depth	شوری EC	اسیدیته pH	مقدار خشتی‌کننده کل TNV	کربن آلی OC	نیتروژن کل Total N	فسفر P (avg)	پتاسیم K (avg)	رس Clay	سیلت Silt	شن Sand	بافت Texture
cm	dS/m	-	%	%	%	mg/kg	mg/kg	%	%	%	-
0-30	2.8	7.3	24	2.37	0.24	111	900	22	54	24	Si - L
30-60	2.2	7.5	24	1.63	0.16	72	600	24	54	22	Si - L

برای نمونه‌برداری از مزارع، پیش از برداشت محصول و در مرحله رسیدن فیزیولوژیک، هر مزرعه به‌عنوان یک تیمار مستقل در نظر گرفته و برای هر تیمار، سه کرت به‌عنوان تکرار مشخص شدند. در هر کرت، ۱۰

بوته به‌صورت تصادفی انتخاب و مشخصه‌هایی مانند میانگین ارتفاع گیاه، طول خوشه و تعداد دانه‌های سالم و پوک اندازه‌گیری شدند.

(T/ETc) در طول دوره‌های رشد محصول استفاده می‌شود (هسیائو و همکاران، ۲۰۰۹).

داده‌های ورودی به مدل در چهار گروه هواشناسی، گیاهی، خاک و مدیریت مزرعه طبقه‌بندی می‌شوند. داده‌های هواشناسی شامل دمای حداقل و حداکثر روزانه، رطوبت نسبی هوا، بارندگی روزانه، سرعت باد، ساعات آفتابی و میزان تبخیر تعرق مرجع روزانه گیاه بودند. داده‌های هواشناسی بلندمدت برای دوره زمانی ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۰، شامل حداقل و حداکثر دما، میزان بارش، سرعت باد، رطوبت نسبی و ساعات آفتابی، از ایستگاه هواشناسی هاشم‌آباد گرگان که در ۲۰ کیلومتری غرب مزارع مورد مطالعه قرار دارد، گردآوری شد. این اطلاعات از سازمان هواشناسی استان گلستان دریافت و بر اساس آن‌ها، تبخیر-تعرق روزانه به روش پنمن-مانیتث محاسبه گردید. همچنین مدل میانگین سالانه غلظت CO₂ نیاز دارد. غلظت CO₂ اتمسفر نیز از مقادیر محاسبه‌شده در مدل (اندازه‌گیری و تخمین زده‌شده تا سال ۲۰۹۹ در رصدخانه‌ی Mauna Loa در هاوایی) به دست آمد. بارندگی به‌صورت روزانه به مدل داده شد.

داده‌های خاک بر اساس آزمایش‌های خاک صورت گرفته به مدل داده شد. این داده‌ها شامل بافت خاک در اعماق مختلف ۰-۳۰ و ۳۰-۶۰ سانتی‌متر و جرم مخصوص ظاهری خاک بود که بر اساس آن و با استفاده از نرم‌افزار RETC دیگر مؤلفه‌های خاک محاسبه و به مدل معرفی شدند.

داده‌های گیاهی به دو صورت ثابت و غیرثابت هستند. پارامترهای ثابت با گذشت زمان یا تغییر موقعیت جغرافیایی تغییر نمی‌کنند و با استفاده از داده‌های رشد بدون محدودیت و در شرایط بدون تنش واسنجی می‌شوند. دیگر مشخصات گیاهی مانند حداکثر عمق ریشه، تراکم گیاه، زمان کاشت و مدیریت آبیاری که بسته به نوع تیمار ممکن است کاملاً متفاوت باشند جزو گروه غیرثابت قرار می‌گیرند (حسنلی و همکاران، ۱۳۹۴). داده‌های گیاهی بر اساس نوع تیمار به نرم‌افزار معرفی گردید. همچنین داده‌های مدیریتی

هنگام برداشت محصول، نمونه‌گیری با رعایت فاصله‌ای حداقل پنج متر از لبه‌های مزرعه انجام شد. نقاط نمونه‌برداری شامل میانه کرت‌ها، محل اتصال لوله‌های تیپ به مینیفولد و اطراف ریزرهای آب‌پاش بود. برای هر مزرعه، سه نمونه به مساحت یک متر مربع جمع‌آوری شدند. پس از خشک‌کردن نمونه‌ها در معرض نور خورشید، متغیرهای مرتبط با بازدهی محصول و اجزای عملکرد آن اندازه‌گیری شدند.

مدل آکواکراپ (AquaCrop)

مدل AquaCrop چگونگی تعامل محصولات و آب در سیستم آب، خاک-محصول را توصیف می‌کند. این مدل برای اجرای شبیه‌سازی به ورودی‌های داده‌های آب و هوایی محلی، ویژگی‌های محصول و شیوه‌های مدیریتی نیاز دارد (روشن و همکاران، ۲۰۱۹). مدل AquaCrop تبخیر و تعرق واقعی محصول (ETa) را محاسبه می‌کند و آن را به تعرق (T) و تبخیر (E) متناسب با سطح خاک پوشیده و بدون پوشش بر اساس تعادل روزانه خاک و آب نشان می‌دهد. جدا نمودن ETa به E_a و T_a سبب می‌شود که بخش غیر مؤثر آب در تولید محصول (تبخیر) در نظر گرفته نشود. این موضوع به‌ویژه زمانی که هنوز پوشش گیاهی تکمیل نشده، اهمیت دارد (ذبیحی و همکاران، ۱۳۹۵). این مدل می‌تواند میزان عملکرد را در شرایط تنش و شوری نیز تخمین بزند و برای محاسبه میزان عملکرد محصول از رابطه زیر استفاده می‌کند:

$$\frac{Y_x - Y_a}{Y_x} = K_y \left(\frac{ET_x - ET_a}{ET_x} \right) \quad (1)$$

که در آن، Y_a و Y_x به ترتیب مقدار بیشینه و واقعی محصول، ET_x و ET_a به ترتیب مقادیر بیشینه و واقعی تبخیر و تعرق و K_y ضریب نسبی میزان کاهش محصول نسبت به میزان کاهش تبخیر-تعرق است (پور غلام آمیجی و همکاران، ۱۳۹۹). همچنین در این مدل، یک مدل نرمال شده بهره‌وری آب محصول (WP*) برای تخمین تولید زیست‌توده محصول و نسبت تعرق به تبخیر-تعرق

$$NRMSE = \frac{RMSE}{\bar{O}} \quad (3)$$

شاخص توافق ویلموت (d) یک معیار استاندارد شده از خطای پیش‌بینی مدل و از صفر تا یک متغیر است. این شاخص نشان‌دهنده نسبت میانگین مربعات خطا و خطای بالقوه است. مقدار ۱ نشان‌دهنده توافق کامل است؛ درحالی‌که مقدار صفر نشان‌دهنده عدم توافق است. با توجه به ریشه تفاوت‌ها، شاخص توافق نسبت به مقادیر شدید در میانگین‌ها و واریانس‌های مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده بیش از اندازه حساس است. شاخص توافق، d، به‌صورت زیر بیان می‌شود:

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

که در آن $\bar{O}$ میانگین عملکرد برنج است. همچنین ضریب کارایی مدل دقت پیش‌بینی‌های مدل را نسبت به داده‌های واقعی اندازه‌گیری می‌کند و هرچه مقدار آن به یک نزدیکتر باشد، نشان‌دهنده کارایی بهتر و بیشتر مدل خواهد بود.

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (5)$$

نتایج و بحث

نیاز آبی و آب مصرفی در هر تیمار

نیاز آبی و میزان آب مصرفی دوره رشد گیاه در جدول ۲ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، حجم آب مورد استفاده در آبیاری غرقابی به ترتیب ۲/۶ و ۲/۲۸ برابر حجم آب مصرفی در روش‌های خشکه‌کاری با آبیاری بارانی و قطره‌ای است. یکی از دلایل مصرف زیاد آب در روش نشایی، مصرف زیاد آب در فرآیند آماده‌سازی زمین یا گلخراپی می‌باشد. نتایج اندازه‌گیری‌های میزان مصرف حدود $3000 \text{ m}^3/\text{ha}$ آب برای عملیات گلخراپی را نشان داد که با استفاده از روش‌های خشکه‌کاری می‌توان در مصرف آن صرفه‌جویی نمود.

شامل مدیریت مزرعه و حاصلخیزی و مدیریت آبیاری می‌شوند. بنا بر شرایط خاک مزرعه (جدول ۱)، حاصلخیزی مزرعه بدون هیچ محدودیتی در نظر گرفته شد. داده‌های مدیریت آبیاری بر اساس تیمار آبیاری به مدل معرفی شد. برای واسنجی مدل AquaCrop از داده‌های برداشت‌شده توسط مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان گلستان (رزاقی و همکاران، ۱۳۹۹؛ کریمی فرد و همکاران، ۱۳۹۹؛ کیانی و همکاران، ۱۴۰۰) استفاده شد. این داده‌های برداشت‌شده شامل آزمایش‌های متوالی بر خشکه‌کاری برنج در استان گلستان بود که بین سال‌های ۱۳۹۷ تا ۱۳۹۹ توسط مرکز تحقیقات کشاورزی انجام شده بود.

برای اعتبارسنجی مدل AquaCrop از ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE)، شاخص توافق ویلموت (d) و ضریب کارایی مدل (EF) استفاده شد. تفاوت بین مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط مدل و مقادیر مشاهده‌شده یک پارامتر را اندازه‌گیری می‌کند. تفاوت‌های فردی که باقیمانده نامیده می‌شوند، توسط RMSE در یک مقیاس واحد از قدرت پیش‌بینی جمع می‌شوند. این میزان اختلاف بین دو مجموعه داده را اندازه‌گیری می‌کند و یک معیار مفید برای مقایسه صحت مدل‌های مختلف در زمینه مقایسه خطاهای پیش‌بینی است. RMSE به‌صورت زیر بیان می‌شود:

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

که در آن Si عملکرد برنج شبیه‌سازی‌شده، Oi عملکرد برنج مشاهده‌شده و n تعداد مشاهدات است. ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) از حاصل تقسیم آماره RMSE بر میانگین داده‌های مشاهداتی حاصل می‌شود:

جدول ۲- نیاز آبی و آب مصرفی در مزارع (m^3/ha)

نیاز خالص آبیاری IRRn	حجم باران مؤثر Effective Rain	تبخیر تعرق گیاهی ETc	حجم آب مصرفی برای آبیاری Irrigation	حجم آب مصرفی برای گلخراپی Puddling	حجم آب مصرفی در خزانه Nursery	حجم آب مصرفی Water consumption	تیمار Treatment
6698.9	120.8	6819.7	10465.3	0	0	10465.3	DSGF
6698.9	120.8	6819.7	9608	0	0	9608.0	DTGF
7581.1	96.8	7677.9	23750	3152	263	27165.0	TFGF

واسنجی مدل AquaCrop

پس از ورود داده‌ها و اجرای مدل، ضرایب گیاهی و پارامترهای مدل با استفاده از روش سعی و خطا به نحوی واسنجی شدند که نتایج دارای کمترین میزان خطا با داده‌های اندازه‌گیری شده در مزرعه را باشد. پارامترهای واسنجی شده مدل در جدول ۳ ارائه شده است (رائس و همکاران، ۲۰۱۸).

مدل گیاهی در هر دو روش نشایی و خشکه‌کاری (آبیاری بارانی و قطره‌ای) با استفاده از اطلاعات دریافتی از مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان گلستان برای عملکرد دانه و زیست‌توده واسنجی شد. نتایج واسنجی در جداول ۴ و ۵ نشان داده شده‌اند. شبیه‌سازی عملکرد دانه و زیست‌توده را به ترتیب برابر $8/402$ و $14/652$ تن در هکتار تخمین زد. با نگاهی بر آماره‌های ارزیابی خطا برای واسنجی مدل $R^2 > 0/9$ ، $d > 0/9$ می‌توان عملکرد مدل را مناسب ارزیابی نمود. همچنین مقدار

NRMSE برای عملکرد دانه و زیست‌توده به ترتیب $3/73$

و $13/17$ بود که به ترتیب در رده بسیار خوب و خوب قرار می‌گیرد. از آنجاکه مدل AquaCrop مقدار زیست‌توده را بر اساس توسعه‌ی پوشش گیاهی تعیین می‌کند و در داده‌های دریافتی از مرکز تحقیقات پوشش گیاهی در دوران رشد به‌طور کامل اندازه‌گیری نشده بود، از این‌رو دقت شبیه‌سازی زیست‌توده دارای خطای نسبی بیشتری نسبت مقدار واقعی آن بود. موسوی و همکاران (۱۴۰۱) ضمن بررسی شبیه‌سازی روند رشد گیاه برنج در روش‌های کشت مختلف با استفاده از مدل AquaCrop، گزارش کردند که مقادیر آماره‌های میانگین قدر مطلق خطا (MAE) و میانگین اریب خطا (MBE) و NRMSE برای عملکرد دانه برابر $0/25$ ، $1/0$ تن در هکتار و $0/10$ بود. این مقادیر برای زیست‌توده به ترتیب برابر $0/3$ ، $1/15$ و $0/05$ بود که همه این موارد توانایی کافی مدل را در شبیه‌سازی عملکرد و زیست‌توده نشان می‌دهد.

جدول ۳- پارامترهای واسنجی شده در مدل AquaCOP

معيار Parameters	توضیحات Description	واحد Unit	رقم فجر. کشت نشایی Fajr Cult. Transplanted method	رقم فجر. کشت مستقیم Fajr Cult. Direct seeding method
Base Temperature	دمای پایه	°C	10	10
Maximum Temperature	دمای بیشینه	°C	40	40
Maximum Temperature for Pollination	بیشینه دما برای گرده‌افشانی	°C	35	35
Maximum Root's depth	بیشینه عمق ریشه	m	0.35	0.35
(CC ₀) Initial canopy cover	پوشش گیاهی اولیه	Cm ²	9.0	0.55
(CGC) Crop growth coefficient	ضریب رشد گیاه	%	12.9	10.4
(CC _x) Maximum canopy cover	بیشینه پوشش گیاهی	%	80	75
(CDC) Crop decline coefficient	ضریب کاهش گیاه	%	15.3	15.1
Crop productivity	بهره‌وری گیاه	g/m ²	20	20
Soil water depletion factor for leaf expansion (upper limit)	ضریب کاهش آب خاک برای توسعه برگ (حد بالا)	-	0	0
Soil water depletion factor for leaf expansion (lower limit)	ضریب کاهش آب خاک برای توسعه برگ (حد پایین)	-	0.4	0.4
Shape factor for water stress coefficient for leaf expansion	ضریب تنش گیاه برای توسعه برگ	-	3	3
Soil water depletion fraction for stomatal control	جزء کاهش آب خاک برای کنترل روزنه	-	0.5	0.5
Shape factor for water stress coefficient for stomatal control	ضریب شکل تنش آب برای کنترل روزنه	-	3	3
Soil water depletion factor for canopy senescence	جزء کاهش آب خاک برای پیری تاج پوشش	-	0.6	0.6
(upper limit) ECE Thresholds	شوری عصاره اشباع (حد بالا)	-	11	11
(lower limit) ECE Thresholds	شوری عصاره اشباع (حد پایین)	dS/m	3	3
Ece for for 25% yield loss	شوری عصاره اشباع برای افت عملکرد ۲۵٪	dS/m	5.1	5.1
Coefficient, adjustment of HI to water stress during flowering	ضریب تصحیح شاخص برداشت (HI) برای تنش آبی در طوی گلدهی	-	0.75	0.75
Coefficient, HI increased due to inhibition of leaf growth before flowering	افزایش شاخص برداشت (HI) برای مهار رشد برگ قبل از گلدهی	%	0	0
HI decreased caused by water stress during yield formation	کاهش شاخص برداشت (HI) به دلیل تنش آبی در طول دوره تشکیل محصول	-	5	5
Coefficient, HI increased due to water stress on crop growth during the crop formation period	ضریب افزایش شاخص برداشت (HI) به دلیل تنش آبی بر رشد محصول در طول دوره تشکیل محصول	-	4	4
Air stress in flooded conditions	تنش هوایی در شرایط غرقابی	%	0	0
Reference harvest index (HI)	شاخص برداشت مرجع (HI)	%	50	50

جدول ۴- مقادیر زیست توده و عملکرد اندازه گیری و شبیه سازی شده گیاه برنج (رقم فجر) در دو روش کشت برای مرحله واسنجی

تیمار Treatment	عملکرد دانه Yeild(ton/ha)			عملکرد زیست توده Biomass(ton/ha)		
	خطا Error (%)	شبیه سازی شده Simulated	اندازه گیری شده Measured	خطا Error (%)	شبیه سازی شده Simulated	اندازه گیری شده Measured
Fajr Cul. Transplanted	-0.302	8.402	8.1	2.223	14.652	16.875
Fajr Cul. Direct seeded	0.22	5.978	6.00	0.690	11.852	12.542

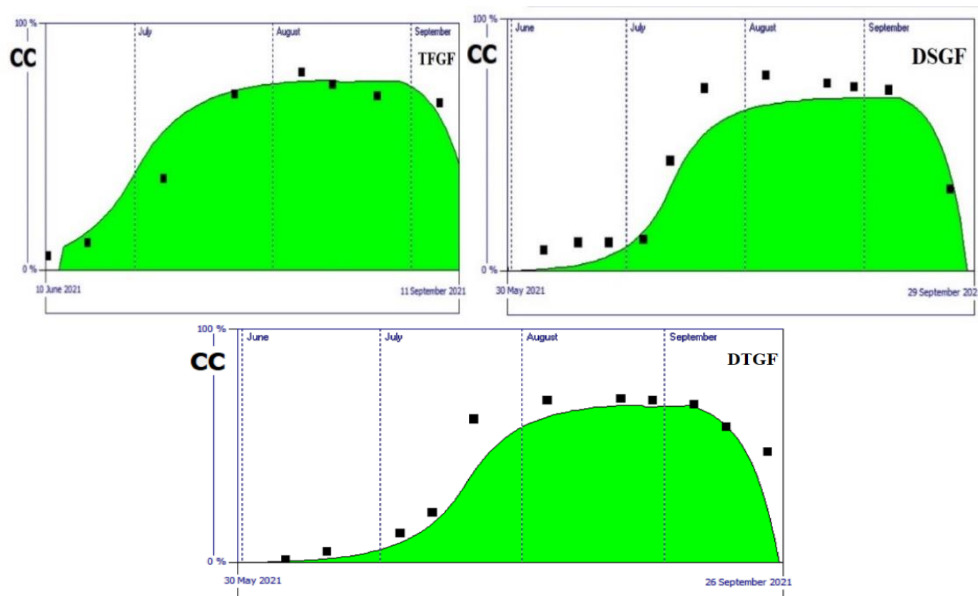
جدول ۵- نتایج واسنجی مدل AquaCrop برای گیاه برنج (رقم فجر) در دو روش کشت

شاخص ها Parameter	ضریب تبیین R ²	ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده NRMSE	شاخص توافق ویلموت d	ضریب کفایت EF
Yield	0.98	3.73	0.97	0.99
Biomass	0.95	13.17	0.9	0.96

صحت سنجی مدل AquaCrop

از داده های برداشت شده در سال ۱۳۹۹-۱۴۰۰ برای صحت سنجی استفاده شد. این داده ها شامل تاج پوشش، عملکرد دانه و زیست توده بودند. شکل ۲ وضعیت شبیه سازی تاج پوشش گیاهی را برای سه تیمار مورد مطالعه نشان می دهد. چنانچه مشاهده می شود، مدل به خوبی توانست شرایط رشد گیاه را شبیه سازی کند، به طوری که دوره رویشی در تیمارهای خشکه کاری طولانی تر و کشیده تر است، در صورتی که در روش نشایی دوران خزان وجود دارد که در شکل نشان داده نشده است و پوشش گیاهی پس

از انتقال نشا به زمین با سرعت بیشتری توسعه می یابد. به طوری که دوره رشد آن ۱۳۰ روزه (با احتساب زمان خزان) به پایان می رسد؛ ولی تیمارهای خشکه کاری ۱۲۰ روزه به رسیدگی فنولوژیک خود رسیدند. همچنین تاریخ گلدهی آن نسبت به شرایط خشکه کاری طولانی تر می باشد به طوری که از ابتدای بذریزی تا گلدهی در تیمار نشایی ۸۵ روز و در تیمارهای خشکه کاری حدود ۷۵ روز زمان نیاز است. این موضوع که در شرایط خشکه کاری گیاه حتی با وجود دریافت آبیاری کامل در معرض تنش خشکی و حرارتی بیشتری قرار دارد را می توان بر کوتاه شدن دوره رویش تا بلوغ مؤثر دانست.



شکل ۲- نمودار صحت سنجی مدل سازی پوشش گیاهی برای مدل AquaCrop (آبیاری بارانی (DSGF)، آبیاری غرقابی (TFGF) و آبیاری قطره ای (DTGF))

آماره‌های ارزیابی صحت شبیه‌سازی تاج پوشش در جدول ۶ ارائه شده است. نتایج نشان داد که مدل AquCarop برای هر دو روش کاشت از صحت مناسبی برخوردار است. مقادیر ضریب همبستگی برای تمامی تیمارها بیش از ۰/۹ بود که نشان دهنده همبستگی خطی مناسب داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده است. همچنین مقادیر NRMSE در تمامی تیمارها کمتر از ۳۰ به

دست آمد که نشان می‌دهد مدل‌سازی متوسط و در برخی موارد (مقادیر بین ۱۰ تا ۲۰) شبیه‌سازی خوب بوده است. مقادیر شاخص ویلموت نیز همگی قابل قبول بوده و بنابراین می‌توان ادعا کرد که شبیه‌سازی تاج پوشش با استفاده از AquaCrop به خوبی انجام گرفته است (ذکری، ۱۳۹۱؛ پورغلام آمیجی و همکاران، ۱۳۹۹؛ هما و همکاران، ۲۰۲۱؛ میرفندرسکی، ۱۳۹۸؛ سعادت و همکاران، ۱۳۹۱).

جدول ۶- پارامترهای ارزیابی صحت در شبیه‌سازی تاج پوشش در تیمارهای مختلف در مدل AquaCrop

شماره N	تیمار Treatment	ضریب تبیین R	ریشه میانگین مربعات خطا RMSE	ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده NRMSE	شاخص توافق ویلموت d	ضریب کفایت EF
1	TFGF	0.96	8.6	16.4	0.98	0.91
2	DSGF	0.98	7.9	19.4	0.98	0.93
3	DTGF	0.95	11.1	25.2	0.96	0.83

ویبیهوته و همکاران (۲۰۲۲) با استفاده از مدل گیاهی AquaCrop، روند رشد گیاه تحت دو روش کشت نشایی و کشت به صورت تشدید شده (SRI^۴) را مطالعه کردند. نتایج نشان داد که مدل گیاهی دقت بالایی در شبیه‌سازی هر دو روش داشته است. پورغلام آمیجی و همکاران (۱۳۹۹) با استفاده از مدل AquaCrop به شبیه‌سازی آبیاری تناوبی پرداختند. نتایج نشان داد که مدل با دقت بالایی ($d < 0/81$ و $R^2 > 0/86$) موفق به شبیه‌سازی شده است.

نتایج ارزیابی صحت شبیه‌سازی عملکرد دانه و زیست‌توده برای تیمارهای مختلف، در جدول ۷ ارائه شده است. این نتایج نشان داد اگرچه صحت‌سنجی پوشش گیاهی نتایج مطلوبی داشت اما تخمین زیست‌توده با خطای بیشتری نسبت به عملکرد دانه همراه بود. مقادیر زیست‌توده برای آبیاری بارانی با ۱/۵ درصد خطا بیشترین اختلاف را نشان داد و پس از آن آبیاری قطره‌ای و غرقابی با درصد خطای ۰/۹۸ و ۰/۶۲ قرار گرفتند و همگی کمتر از مقادیر واقعی بودند. با این وجود بر اساس شاخص‌های سنجش ارائه شده در جدول ۸ می‌توان ادعا کرد که شبیه‌سازی برای زیست‌توده و عملکرد به خوبی انجام شده است، به طوری

که NRMSE برای عملکرد دانه برابر ۵/۱۲ و در رده بسیارخوب و برای زیست‌توده با مقدار ۱۲/۳۸ در رده خوب قرار گرفت. همچنین شاخص توافق برای هر عملکرد دانه و زیست‌توده به ترتیب برابر ۰/۹۵ و ۰/۸۹ بود که در محدوده تخمین مناسب قرار دارد. همچنین سعادت و همکاران (۱۳۹۱) با استفاده از AquaCrop به شبیه‌سازی تاج پوشش، زیست‌توده و عملکرد برنج تحت تیمارهای مختلف آبیاری پرداختند. آن‌ها در پژوهش مذکور مدل AquaCrop را به عنوان یک ابزار پشتیبان قوی در تصمیم‌گیری برای افزایش بهره‌وری آب معرفی نمودند. میرفندرسکی (۱۳۹۸) از مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد و زیست‌توده برنج تحت مدیریت‌های آبیاری متناوب و زهکشی میان‌فصل استفاده نمود و با توجه به شاخص‌های خطای به دست آمده گزارش نمود که این مدل قدرت شبیه‌سازی خوبی برای محصول و زیست‌توده با خطای کم را داراست. میراشارد و همکاران (۱۳۹۲) پس از ارزیابی مدل AquaCrop نتیجه گرفتند که این مدل با RMSE برابر ۰/۳۵ و ۰/۶۵ تن در هکتار صحت مناسبی داشت که با نتایج تحقیق حاضر همخوانی دارد.

جدول ۷- مقادیر زیست توده و عملکرد اندازه گیری و شبیه سازی شده برای مرحله ارزیابی

تیمار Treatment	Yeild(ton/ha)		Biomass(ton/ha)		Error (%)
	عملکرد دانه		عملکرد زیست توده		
	اندازه گیری شده Measured	شبیه سازی شده Simulated	اندازه گیری شده Measured	شبیه سازی شده Simulated	
TFGF	8.05	7.859	16.711	17.327	-0.62
DSGF	5.6	5.598	12.678	14.181	-1.50
DTGF	4.89	4.884	11.372	12.352	-0.98

جدول ۸- ارزیابی کارایی مدل AquaCrop

شاخص ها Parameters	ریشه میانگین مربعات خطا RMSE	ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده NRMSE	شاخص توافق ویلموت d	ضریب کفایت EF
Yield	0.27	5.12	0.95	1.00
Biomass	1.56	12.38	0.89	0.98

با دقت در نتایج به دست آمده مشاهده می شود بیشترین عملکرد مربوط به تیمار نشایی با آبیاری غرقابی و برابر ۷/۸۵۹ تن بر هکتار تخمین زده شد. پس از آن تیمارهای خشکه کاری آبیاری بارانی و قطره ای به ترتیب با عملکردهای دانه تخمینی ۵/۵۹۸ و ۴/۸۸۴ قرار گرفتند. نسبت عملکرد به آب مصرفی (بهره وری فیزیکی آب) و نیز نسبت ارزش ریزش ریالی عملکرد به حجم آب مصرفی در جدول ۹ ارائه شده است. اگرچه فرصت کافی برای رشد و نمو نشاها در خزانه و در نتیجه استقرار مطلوب تر در زمین، دسترسی بهتر و بیشتر به مواد غذایی، عدم وجود تنش آبی و کاهش تنش های محیطی به دلیل تعدیل دمایی توسط آب،

باعث برتری عملکرد برنج در شرایط کشت نشایی و آبیاری غرقابی می شوند، ولی همانطور که مشاهده می شود کشت نشایی بهره وری فیزیکی آب (WP) و بهره وری اقتصادی آب (EWP) بسیار کمتری نسبت به روش های خشکه کاری دارد. بیشترین حجم آب مصرفی مربوط به کشت نشایی و کمترین آن مربوط به روش کشت مستقیم و روش آبیاری قطره ای می باشد. این تفاوت در اندازه ای است که می توان ادعا کرد با ۶۱ درصد صرفه جویی آب می توان به ۷۰ درصد عملکرد در شرایط غرقابی دست یافت که به نظر رویکردی قابل قبول است.

جدول ۹- نیاز آبی و آب مصرفی در مزارع (m³/ha) (منبع: ذوالفقاری و همکاران، ۱۴۰۱)

تیمار Treatment	بهره وری فیزیکی WP (kg/m ³)	بهره وری اقتصادی EWP (Rial/m ³)
DSGF	0.53	117.079.43
DTGF	0.51	141.791.9
TFGF	0.3	82.704.88

کیازرمانی (۱۳۸۹) با تأکید بر نقش مهم مدیریت آبیاری در استفاده بهینه از منابع و افزایش بازده تولید و ضرورت توجه بیشتر به روش های صرفه جویانه نشان دادند که لازم است از منابع آب موجود به بهترین شکل استفاده شده و با اعمال مدیریت صحیح آبیاری، بهره وری آب در بخش کشاورزی در حد ممکن افزایش داده شود. در این راستا استفاده از مدل هایی همچون AquaCrop می تواند بسیار مفید و کاربردی باشد. تافته و همکاران (۲۰۲۵) با

تلفیق مدل AquaCrop با WinSRFR توانستند بهره وری را برای کشاورزان منطقه حمیدیه استان خوزستان تا ۴۵ درصد افزایش دهند. همچنین امداد و تافته (۲۰۱۷) با استفاده از مدل AquaCrop و با بررسی اثرات تغییر تاریخ کاشت بر عملکرد محصول به خوبی عملکرد گیاه را در شرایط مختلف تنش آبی ارزیابی نمودند. ابراهیمی پاک و همکاران (۲۰۲۲) در پژوهشی گزارش کردند که تنظیم دقیق میزان آبیاری و کوددهی می تواند تأثیر قابل توجهی بر

افزایش عملکرد محصول و بهره‌وری مصرف آب داشته باشد. آنها برای شبیه‌سازی آزمایش از نرم‌افزار AquaCrop استفاده نمودند و نتایج ارزیابی آماره‌های خطا این مدل را مناسب نشان داد. امداد و تافته (۲۰۱۷) همچنین از این مدل برای شبیه‌سازی مدیریت دقیق عمق آب آبیاری استفاده کردند و با افزایش عملکرد محصول و کاهش مصرف آب، بهره‌وری آبی گندم را از ۰/۳۲ به ۰/۷۸ افزایش دادند. تمامی این پژوهش‌ها بر اهمیت وجود مدل‌های قوی برای شبیه‌سازی محصولات کشاورزی تأکید می‌کنند. این مدل‌ها ابزارهای بسیار کارآمدی برای شبیه‌سازی شرایط مختلف مدیریتی و افزایش میزان بهره‌وری محصول هستند.

نتیجه‌گیری

با توجه به کمبود منابع آب، استفاده از روش‌های نوین آبیاری برنج ناگزیر خواهد بود و لذا استفاده از مدل‌های گیاهی در این زمینه کمک شایانی است. نتایج این پژوهش نشان داد که مدل AquaCrop به خوبی توانست تاج پوشش، زیست‌توده و عملکرد برنج را تحت رژیم‌های مختلف آبیاری شبیه‌سازی کند، به طوری که $25/2 < NRMSE < 0/27$ در محدوده قابل قبول قرار گرفت. شاخص توافق با قرار گرفتن در بازه‌ی ۰/۹۸ تا ۰/۸۹ ارزیابی را مناسب نشان داد. از این رو، مدل AquaCrop می‌تواند به عنوان یک ابزار پشتیبان تصمیم‌گیری اطلاعات ارزشمندی را در طراحی شیوه‌های مدیریت کشت و آبیاری

ارائه دهد. با توجه به شرایط کمبود روز افزون منابع آب سطحی و زیرزمینی، استفاده از مدل‌هایی که دقت مناسبی در شبیه‌سازی عملکرد محصول با بهره‌وری آب بیشتر بسیار ارزشمند خواهد بود. این یافته‌ها همچنین می‌تواند به عنوان راهنمایی برای توجیه کشاورزان نسبت به استفاده از روش‌های صرفه‌جویانه‌تر و افزایش بهره‌وری آب توسط مدیران پروژه، مشاوران، مهندسان آبیاری مورد استفاده قرار گیرد. توسعه کاربرد چنین مدل‌هایی برای رسیدن به بهره‌وری آب بیشتر می‌تواند برنامه‌ریزان و سیاست‌گذاران در امر کشت برنج را راهنمایی کرده و چشم‌انداز خوبی برای امنیت غذایی آینده کشور خشک و نیمه‌خشک ایران در راستای پایداری سرزمین فراهم نماید.

تشکر و قدردانی

در این بخش، از همکاری و مساعدت مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و سازمان جهاد کشاورزی استان گلستان برای حمایت‌های معنوی و ارائه آمار و اطلاعات مربوط به خشکه‌کاری برنج در سال‌های ۱۳۹۷-۱۳۹۹ برای واسنجی مدل AquaCrop سپاسگزاریم.

تعارض منافع

در این مقاله تعارض منافی وجود ندارد و این مسئله مورد تأیید نویسندگان مقاله است.

فهرست منابع

۱. امیری، ابراهیم، رضایی، مجتبی. و شیرشاهی، فهیمه. ۱۳۹۸. بررسی عملکرد مدل AquaCrop در شرایط مدیریت تنش شوری و خشکی برنج. نشریه مدیریت آب در کشاورزی، ۶(۱): ۱۳-۲۲.
۲. پورغلام امیجی، مسعود، لیاقت، عبدالمجید. و خوش‌روش، مجتبی. ۱۳۹۹. ارزیابی مدل AquaCrop در تخمین عملکرد برنج تحت کشت آبیاری تناوبی. مهندسی آبیاری و آب ایران، ۱۱(۴۱): ۳۰۵-۳۲۰.
doi: 10.22125/iwe.2020.114972
۳. حسنی، محمد، افراسیاب، پیمان. و ابراهیمیان، حامد. ۱۳۹۴. ارزیابی مدل‌های AquaCrop و SALTMED در تخمین عملکرد محصول ذرت و شوری خاک. تحقیقات آب و خاک ایران، ۴۶(۳): ۴۹-۴۸.

۴. ذبیحی، ابوالفضل، درزی نفت چالی، عبدالله. و خوش-روش، مجتبی. ۱۳۹۵. آنالیز اثر تنش خشکی بر عملکرد، کارایی مصرف آب و شوری ناحیه ریشه برنج. تنش‌های محیطی در علوم زراعی، ۹ (۴):
<https://doi.org/10.22077/escs.2017.465>
۵. ذکری، فاطمه. ۱۳۹۱. شبیه‌سازی اثر نوسانات اقلیمی بر عملکرد برنج رقم هاشمی با استفاده از مدل AquaCrop در منطقه رشت. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران
۶. ذوالفقاری، پروین، هزارجریبی، ابوطالب، اسدی، محمداسماعیل. و امیری، ابراهیم. ۱۴۰۱. ارزیابی بهره‌وری فیزیکی- اقتصادی آب در روش‌های مختلف کاشت و آبیاری برنج رقم فجر در استان گلستان. پژوهش آب در کشاورزی، ۳۶ (۴): ۳۹۱-۴۰۴. doi: 10.22092/jwra.2023.360212.946
۷. رزاقی، محمد حسین، کیانی. علیرضا. و آبیاری، نور محمد. ۱۳۹۹. کشت نشایی و خشکه‌کاری برنج، راهکاری فنی و اقتصادی برای تولید برنج در شرایط استان گلستان، ۷ (۱): ۳۳-۴۴.
DOR: 20.1001.1.24764531.1399.7.1.4.1
۸. سعادت، زهرا، پیرمردیان، نادر، امیری، ابراهیم. و رضایی. مجتبی. ۱۳۹۱. ارزیابی مدل WOFOST در شبیه‌سازی عملکرد دو رقم برنج تحت رژیم‌های مختلف آبیاری. مجله پژوهش آب در کشاورزی. ۲۶ (۳): ۳۲۳-۳۳۷
doi:10.22092/jwra.2012.118985.۳۳۷
۹. کریمی فرد، مریم، ذاکری‌نیا، مهدی، کیانی، علیرضا، و فیض‌بخش، محمدتقی. ۱۳۹۹. تأثیر سامانه‌های آبیاری قطره‌ای و بارانی بر عملکرد برنج و بهره‌وری آب در دو روش کشت نشائی و کشت مستقیم بذر. آب و خاک، ۳۴ (۵): ۱۰۱۹-۱۰۳۲. <https://doi.org/10.22067/jsw.v34i5.84952>
۱۰. کیا زرماني، حجت. ۱۳۸۹. بررسی تأثیر تاریخ کاشت و خشکی آخر فصل بر خصوصیات کمی و کیفی شش رقم برنج در شمال ایران. پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته زراعت دانشکده علوم کشاورزی دانشگاه شاهد. ۱۳۳ صفحه.
۱۱. کیانی، علیرضا، یزدانی، محمدرضا. و فیض‌بخش، محمدتقی. ۱۴۰۰. مقایسه روش‌های مستقیم و نشایی برنج تحت روش‌های مختلف آبیاری. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، ۳۵ (۶): ۷۷۹-۷۹۰.
<https://doi.org/10.22067/jsw.2021.69302.1036>
۱۲. معاونت آمار مرکز آمار، فناوری اطلاعات و ارتباطات. ۱۴۰۲. آمارنامه کشاورزی سال ۱۴۰۱، ج. اول: محصولات زراعی.
۱۳. موسوی، امیرحسین، اگدرنژاد، اصلا. و گیلانی، عبدالعلی. ۱۴۰۱. ارزیابی مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی واکنش ارقام مختلف برنج به روش کاشت. نشریه رویکردهای نوین در مهندسی آب و محیط‌زیست، ۱ (۱): ۶۴-۷۴.
<https://doi.org/10.22034/nawee.2022.153890>
۱۴. میراشد، سحر، امیری، ابراهیم. و عاشوری، مجید. ۱۳۹۲. شبیه‌سازی عملکرد دانه برنج رقم بهار با استفاده از مدل AquaCrop. دومین کنگره ملی کشاورزی ارگانیک. <https://civilica.com/doc/271928>
۱۵. میرفندرسکی، رامتین. ۱۳۹۸. تحلیل تأثیر تغییر اقلیم بر عملکرد و بهره‌وری مصرف آب برنج تحت مدیریت های آبیاری و زهکشی متناوب و زهکشی میان فصل. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران.
16. Abdul-Ganiyu, S., Kyei-Baffour, N., Agyare, W.A., et al. 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. 93-116 pp.

- https://doi.org/10.1007/978-981-10-4796-1_6
17. Adhikari, B. B. 2021. Review on scope and challenges of direct seeded rice in Nepal. *Agronomy Journal of Nepal*, 5(01), 88-96. <https://doi.org/10.3126/aj.n.v5i01.44786>
18. Amiri, E., 2016. Calibration and testing of the AquaCrop model for rice under water and nitrogen management. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 47(3), 387-403. <https://doi.org/10.1080/00103624.2015.1123719>
19. Amiri, E., Rezaei, M., Rezaei, E. E., and Bannayan, M. 2014. Evaluation of Ceres-Rice, AquaCrop and Oryza2000 models in simulation of rice yield response to different irrigation and nitrogen management strategies. *Journal of Plant Nutrition*, 37(11), 1749-1769. <https://doi.org/10.1080/01904167.2014.888750>
20. Anjum, S. A., Akbar, N., Ashraf, U., Khan, I., Shakoor, A., Ishfaq, M., Hanif, M. S., Shahid, M., and Shareef, M. 2019. Interactive effect of rice production systems and tillage systems in rice-wheat cropping system. *Pakistan Journal of Science*, 71, 21-27. <https://nja.pastic.gov.pk/PJS/index.php/PJS/article/view/1467>
21. Aslam, M., Hussain, S., Ramzan, M., and Akhter, M. 2008. Effect of different stand establishment techniques on rice yields and its attributes. *Journal of Animal and Plant Sciences*, 18, 80-82. https://thejaps.org.pk/docs/18_2-3_2008/08-828.pdf
22. Bhushan, L., Ladha, J. K., Gupta, R. K., Singh, S., Tirol-Padre, A., Saharawat, Y., Gathala, M., and Pathak, H. 2007. Saving of water and labor in a rice-wheat system with no-tillage and direct seeding technologies. *Agronomy Journal*, 99, 1288-1296. <https://doi.org/10.2134/agronj2006.0227>
23. Ebrahimipak, N., Egdarnejad, A., Tafteh, A., and Ansari, M. A. 2022. The effect of irrigation water management and fertilizer amount on AquaCrop accuracy and efficiency for tomato yield and water use efficiency simulation. *Irrigation and Water Engineering*, 12(3), 121-136. <https://doi.org/10.22125/iwe.2022.146391>
24. Elsadek, E., Zhang, K., Mousa, A., Ezaz, G. T., Tola, T. L., Shaghaleh, H., Hamad, A. A. A. and Alhaj Hamoud, Y. 2023. Study on the in-field water balance of direct-seeded rice with various irrigation regimes under arid climatic conditions in Egypt using the AquaCrop model. *Agronomy*, 13(2), 609. <https://doi.org/10.3390/agronomy13020609>
25. Emdad, M. R. and Tafteh, A. 2017. Evaluation of AquaCrop model for decreasing water stress effects due to different wheat planting date. *Journal of Agronomy and Plant Breeding*, 13(4), 75-83.
26. Emdad, M. R. and Tafteh, A. 2019. Determining the most suitable depth of irrigation water of wheat plant using the AquaCrop model in order to increase water use efficiency. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 13(2), 417-425. <https://doi.org/20.1001.1.20087942.1398.13.2.13.1>
27. Farooq, M., Kadambot, S. H. M., Rehman, H., Aziz, T., Lee, D., and Wahid, A. 2011. Rice direct seeding: Experiences, challenges and opportunities. *Soil and Tillage Research*, 111, 87-98. <https://doi.org/10.1016/j.still.2010.10.008>
28. Geerts, S., Raes, D., Garcia, M., et al. 2009. Simulating yield response of quinoa to water availability with AquaCrop. *Agronomy Journal*, 101, 499-508. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0137s>
29. Houma, A. A., Kamal, M. R., Mojid, M. A., Zawawi, M. A. M., and Rehan, B. M. 2021. Predicting climate change impact on water productivity of irrigated rice in Malaysia using FAO-AquaCrop model. *Applied Sciences*, 11(23), 11253. <https://doi.org/10.3390/app112311253>
30. Hsiao, T.C., Heng, L., Steduto, P., Rojas-Lara, B., Raes, D. and Fereres, E., 2009. AquaCrop—the FAO crop model to simulate yield response to water: III. Parameterization and testing for maize. *Agronomy Journal*, 101(3), pp.448-459. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0218s>
31. Ishfaq, M., Akbar, N., Khan, I., Anjum, S. A., Zulfikar, U., Ahmad, M., Ahmad, M. and Chattha, M. U. 2018. Optimizing row spacing for direct seeded aerobic rice under dry and moist fields. *Pakistan Journal of Agricultural Research*, 31(4), 291-299. <https://doi.org/10.17582/journal.pjar/2018/31.4.291.299>

32. Lin, L., Zhang, B., and Xiong, L. H. 2012. Evaluating yield response of paddy rice to irrigation and soil management with application of the AquaCrop model. *American Society of Agricultural and Biological Engineers* 55, 839-848.
<https://doi.org/10.13031/2013.41518>
33. Pereira, L. S., Paredes, P., Sholpankulov, E. D., et al. 2009. Irrigation scheduling strategies for cotton to cope with water scarcity in the Fergana Valley, Central Asia. *Agricultural Water Management* 96, 723-735. **<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2008.10.013>**
34. Pirmoradian, N., Saadati, Z., Rezaei, M. and Khaledian, M.R., 2020. Simulating water productivity of paddy rice under irrigation regimes using AquaCrop model in humid and semiarid regions of Iran. *Applied Water Science*, 10(7), 1-8.
<https://doi.org/10.1007/s13201-020-01249-5>
35. 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), 309-321. **<https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2020.03.03>**
36. Raes, D., Steduto, P., Hsiao, et al. 2018. AquaCrop Version 6.0 - 6.1 Reference Manual June, FAO, Rome, Italy.
37. Rowshon, M. K., Dlamini, N. S., Mojid, M. A., Adib, M. N. M., Amin, M. S. M. and Lai, S. H. 2019. Modeling climate-smart decision support system (CSDSS) for analyzing water demand of a large-scale rice irrigation scheme. *Agricultural Water Management*, 216, 138-152. **<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.01.002>**
38. Saadati, Z., Pirmoradian, N., and Rezaei, M. 2011. Calibration and evaluation of AquaCrop model in rice growth simulation under different irrigation managements. 21th International Congress on Irrigation and Drainage, October 19-23, Tehran, Iran, pp. 589-600. URI: **<http://hdl.handle.net/123456789/4389>**
39. Shafiei, M., Ghahraman, B., Saghafian, B., et al. 2014. Uncertainty assessment of the agro-hydrological SWAP model application at field scale: a case study in a dry region. *Agricultural Water Management*, 146, 324-334.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.09.008>
40. Taftah, A., Emdad, M. R. and Sedaghat, A. 2025. Improving irrigation management in wheat farms through the combined use of the AquaCrop and WinSRFR models. *Journal of Arid Land*, 17(2), 245-258. **<https://doi.org/10.1007/s40333-025-0005-y>**
41. Toumi, J., Er-Raki, S., Ezzahar, J., et al. 2016. Performance assessment of AquaCrop model for estimating evapotranspiration, soil water content and grain yield of winter wheat in Tensift Al Haouz (Morocco): Application to irrigation management. *Agricultural Water Management*, 163, 219-235. **<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.09.007>**
42. Tuong, T. P., Castillo, E. G., Cabangon, R. C., Boling, A. and Singh, U. 2002. The drought response of lowland rice to crop establishment practices and N-fertilizer sources. *Field Crops Research*, 74, 243-257. **[https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(01\)00213-1](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(01)00213-1)**
43. Vibhute, S. D., Sarangi, A., Singh, D. K., Bandyopadhyay, K. K., Parihar, S. S. and Kumar, D. 2022. Performance evaluation of AquaCrop model for rice (*Oryza sativa*) crop in Trans-Gangetic plains. *The Indian Journal of Agricultural Sciences*, 92(2), 199-202.
44. Xu, J., Bai, W., Li, Y., Wang, H., Yang, S. and Wei, Z. 2019. Modeling rice development and field water balance using AquaCrop model under drying-wetting cycle condition in eastern China. *Agricultural Water Management*, 213, 289-297.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.10.028>