

مقاله علمی-پژوهشی

کارایی مدل SWAP بروز رسانی شده با تصاویر ماهواره‌ای و مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد برنج رقم هاشمی در استان گیلان

آدینه عبدی^۱، صفورا اسدی کپورچال^{۲*}، مجید وظیفه دوست^۳، مجتبی رضایی^۴ و اصلان اگدرنژاد^۵

چکیده

امروزه استفاده از مدل‌های شبیه‌ساز در مدیریت بهینه فرآیند تولید و عملکرد محصول در مقیاس مزرعه‌ای از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. با توجه به اینکه تلفیق سنجش‌ازدور و مدل سبب افزایش دقت شبیه‌سازی می‌شود، پژوهش حاضر باهدف ارزیابی دو مدل SWAP تلفیق‌شده با تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲ و AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد گیاه برنج رقم هاشمی در یکی از مزارع تحقیقاتی مؤسسه تحقیقات برنج کشور انجام شد. پارامترهای اندازه‌گیری شده که مورد مقایسه دو مدل مذکور قرار گرفتند شامل مقدار ماده خشک اجزای گیاه طی دوره رشد بود. ارزیابی مقادیر شبیه‌سازی‌شده و اندازه‌گیری شده نشان داد که ریشه میانگین مربعات خطا در عملکرد شلتوک شبیه‌سازی‌شده توسط مدل SWAP به‌روزرسانی شده با تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲ در دو مرحله زایشی و رسیدگی به ترتیب ۶/۲۸ و ۱۴۲/۴۰ کیلوگرم بر هکتار و در مدل AquaCrop به ترتیب ۹/۵۵ و ۳۳۸/۴۶ کیلوگرم بر هکتار به دست آمد. بر اساس نتایج به دست آمده از آمارها می‌توان نتیجه گرفت که هر دو مدل AquaCrop و SWAP به‌روزرسانی شده با تصاویر ماهواره‌ای عملکرد شلتوک و زیست‌توده برنج رقم هاشمی را با دقت بالایی پیش‌بینی کردند. لیکن با اندکی تفاوت ($R^2=0.96$) مدل AquaCrop نسبت به مدل SWAP به‌روزرسانی شده با تصاویر ماهواره‌ای در شبیه‌سازی مقدار شلتوک از دقت کمتری برخوردار بود و مدل SWAP که ورودی‌هایش توسط داده‌های به‌دست‌آمده از تصاویر ماهواره‌ای بروز رسانی شده بود، در مراحل مختلف از دقت بالاتری برای شبیه‌سازی عملکرد شلتوک برخوردار بوده و می‌توان با اطمینان بیشتری جهت شبیه‌سازی عملکرد محصول برنج به آن اکتفا نمود.

واژه‌های کلیدی: تصویر ماهواره‌ای، شاخص سطح برگ، شالیزار، شبیه‌سازی، مدل‌های رشد گیاهی

مقدمه

امروزه استفاده از مدل‌های شبیه‌ساز در بسیاری از مسائل مربوط به مدیریت آب‌و‌خاک کاربرد داشته و مدل‌های متعددی برای مسائل مربوط به حرکت آب در خاک و رشد محصول طراحی شده است. یکی از این مدل‌ها، مدل SWAP است که قابلیت بالایی در شبیه‌سازی عملکرد محصول و نیز حرکت آب در خاک و اجزای بیلان آب دارد. مدل SWAP یک مدل آگروهیدرولوژی است که با در نظر گرفتن داده‌های خاک، آب، اتمسفر و گیاه، شبیه‌سازی و پیش‌بینی عملکرد محصول را با دقت مناسبی نسبت به مقادیر اندازه‌گیری‌شده و مزرعه‌ای انجام می‌دهد (Besalatpour et al., 2012).

یکی دیگر از مدل‌های شبیه‌ساز رشد گیاهان مدل AquaCrop است که توسط سازمان خواروبار کشاورزی و

^۱ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه علوم خاک، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران
^۲ استادیار، گروه علوم خاک، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران (* نویسنده مسئول: safooraasadi@guilan.ac.ir)
^۳ استادیار، گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران
^۴ استادیار پژوهش، مؤسسه تحقیقات برنج کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، رشت، ایران
^۵ استادیار، گروه علوم و مهندسی آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۳/۱۱

نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که این مدل برای شبیه‌سازی پارامترهای موردنظر از دقت بالایی برخوردار بود. عبدالگانو و همکاران در بررسی آثار آبیاری بر عملکرد برنج با مدل AquaCrop ضریب تبیین به‌دست‌آمده در شبیه‌سازی عملکرد زیستی را بین ۰/۸۳ تا ۱ گزارش کردند (Abdul-Ganiyu et al., 2018). نتایج تحقیق اعلائی بازکیایی و همکاران (۱۳۹۹) نشان داد که مدل AquaCrop با ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده برابر با ۹ و ۵ درصد به ترتیب برای عملکرد دانه و عملکرد زیستی جهت اجرا در شرایط دسترسی به داده‌های اندازه‌گیری شده کم‌تر، مطلوب است. علیزاده و همکاران (۱۳۸۹) به‌منظور ارزیابی شبیه‌سازی عملکرد گیاه گندم با استفاده از مدل AquaCrop به این نتیجه رسیدند که مدل از دقت کافی در تخمین عملکرد محصول در شرایط آبیاری کامل و کم آبیاری برخوردار بوده است. حیدری‌نیا و همکاران (۱۳۹۱) با استفاده از مدل AquaCrop به برنامه‌ریزی آبیاری برای گیاه آفتاب‌گردان در اهواز پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که مدل دقت بالایی در شبیه‌سازی عملکرد داشته است و میزان ریشه میانگین مربعات خطا بین عملکرد مشاهده‌شده و اندازه‌گیری شده کمتر از ۵ درصد بوده است. نتایج پژوهش برزیکار و همکاران (۱۳۹۹) باهدف ارزیابی مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری آب گندم در دشت هندیجان نشان داد که این مدل برای شبیه‌سازی هر دو پارامتر عملکرد و بهره‌وری آب دچار خطای بیش‌برآوردی شد. نتایج پژوهش سیاحی و همکاران (۱۳۹۹) بر روی گیاه چغندر قند بیانگر آن بود که هر دو مدل SWAP و AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری آب چغندر قند در دوره‌های مختلف آبیاری از دقت بالایی برخوردار بوده و قابل استفاده است. طی سالیان اخیر مطالعات مختلفی در رابطه با شبیه‌سازی عملکرد محصول در بخش کشاورزی انجام شده است. لیو و همکاران در برآورد نیاز آبیاری ذرت تحت آبیاری قطره‌ای آبیاری عمیق را در دوره ۳۰ ساله شبیه‌سازی نمودند و نتایج صرفه‌جویی ۱۴ درصد مصرف در آبیاری قطره‌ای نسبت به کشت دیم را نشان داد (Liu et al., 2018). آلمی و همکاران طی فصل کشت جو در سال‌های ۲۰۰۶، ۲۰۰۸ و ۲۰۰۹ در اتیوپی با اعمال

به‌منظور شبیه‌سازی رشد و عملکرد گیاهان زراعی مختلف بسط داده شده است (Geerts and Raes, 2009). اساس کار این مدل شبیه‌سازی پاسخ عملکرد محصولات گیاهی به آب است و در شرایطی که آب عامل مهمی در تولید محصول است، عملکرد دانه را بر اساس تعرق روزانه، پیش‌بینی می‌کند (FAO, 2020; Jin et al., 2018). مدل AquaCrop علی‌رغم ساده‌تر بودن نسبت به سایر مدل‌های گیاهی به دلیل نیاز به داده‌های کمتر و برخورداری از دقت قابل‌قبول در شبیه‌سازی رشد و عملکرد گیاهان متعددی استفاده شده است (برزیکار و همکاران، ۱۳۹۹؛ ابراهیمی پاک و همکاران، ۱۳۹۷).

برنج با نام علمی *Oryza sativa* L. از مهم‌ترین منابع غذایی انسان بوده به طوری که غذای بیش از پنجاه درصد از مردم جهان را تشکیل می‌دهد (FAO, 2017). در ایران نیز این محصول به‌عنوان یکی از پر مصرف‌ترین و عمده‌ترین محصولات زراعی با سطح زیر کشت حدود ۸۹۲۲۱۳ هکتار، معادل ۷/۵۲ درصد از سطح کل محصولات زراعی کشور را شامل می‌شود (بی‌نام، ۱۳۹۹). با توجه به مشکلات موجود در جامعه کشاورزی اندازه‌گیری کلیه پارامترهای مورد نیاز در طول دوره رشد برنج و در نهایت مقدار عملکرد محصول در سطح مزرعه بسیار وقت‌گیر و هزینه‌بر بوده و استفاده از مدل‌های شبیه‌ساز رشد گیاهان در این زمینه بسیار موفق عمل می‌کنند (امیری و شیرشاهی، ۱۳۹۶).

موسوی و همکاران (۱۳۹۸) در تحقیقی با عنوان شبیه‌سازی عملکرد و کارایی مصرف آب ارقام مختلف برنج تحت شرایط مختلف کاشت به این نتیجه رسیدند که بیش‌ترین، کم‌ترین و میانگین اختلاف بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده با مدل SWAP به ترتیب برابر با ۲/۱، ۰/۱۶ و ۰/۶۷ تن بر هکتار بوده و مدل با کارایی ۰/۹۹ و ضریب تبیین ۰/۷۱، ابزاری قدرتمند در برآورد عملکرد برنج بوده است. در تحقیق دیگری کریمی و همکاران (۱۳۹۹) استفاده از مدل SWAP را برای شبیه‌سازی عملکرد، زیست‌توده و بهره‌وری آب ذرت دانه‌ای با دقت بالایی پیشنهاد کردند. پندی و همکاران (۱۳۹۹) از مدل SWAP برای شبیه‌سازی عملکرد و اجزای عملکرد گیاه برنج استفاده کردند.

گیاهی و مرحله رشد متفاوت بوده به طوری که در دوره ابتدایی شاخص NDVI و در مرحله پوشش کامل شاخص SAVI رابطه خطی بهتری با شاخص سطح برگ داشتند (رضایی و همکاران، ۱۳۹۵).

در تحقیقی باهدف برقراری رابطه رگرسیونی بین عملکرد ارقام محلی و پر محصول برنج در سال ۱۳۹۱ که با استفاده از شاخص‌های گیاهی به دست آمده از تصاویر ماهواره لندست ۷ در شالیزارهای شهرستان شفت، انجام شده بود، نتایج نشان داد که تفاوت معنی داری بین مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده وجود ندارد و مقدار ضریب تبیین ۰/۷۰ و ۰/۶۶ بین عملکرد واقعی و برآورد شده می‌تواند ناشی از تغییر شرایط کاشت و مدیریت زراعی، آفات و امراض گیاهی، وضعیت آب و هوایی منطقه و بسیاری از متغیرهای محیطی باشد (یاقوتی و همکاران، ۱۳۹۷).

تاکنون مطالعه‌ای برای مقایسه مدل SWAP بروز رسانی شده با تصاویر ماهواره‌ای و مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد برنج انجام نشده است. با توجه به اینکه کشت برنج در شمال کشور به‌عنوان کشت غالب بسیار حائز اهمیت بوده و برآورد عملکرد پیش از برداشت محصول در مدیریت بهتر فرآیند تولید و عملکرد محصول نقش به‌سزایی دارد، پژوهش حاضر باهدف مقایسه کارایی مدل SWAP بروز رسانی شده با تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲ و مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد برنج و ارزیابی دقت مدل‌های مذکور انجام شد.

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر به‌منظور ارزیابی مدل AquaCrop و مدل SWAP به‌روزرسانی شده با استفاده از اطلاعات به‌دست‌آمده از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲ در شبیه‌سازی عملکرد شلتوک و مقدار ماده خشک گیاهی و مقایسه آن با مقادیر واقعی در یکی از شالیزارهای مؤسسه تحقیقات برنج کشور واقع در شهر رشت در سال ۱۳۹۷ طراحی و اجرا شد. رقم برنج مورد استفاده در این پژوهش رقم هاشمی بود که در تاریخ ۲۷ اردیبهشت‌ماه نشاءها به زمین منتقل شد. اولین نمونه‌برداری برای محاسبه پارامترهای گیاهی در روز

سناریوهای آبیاری کامل و کم آبیاری و شبیه‌سازی آن با مدل AquaCrop نتیجه گرفتند که مدل در پیش‌بینی عملکرد دانه و مقدار کل ماده خشک در شرایط کم‌آبیاری بیش‌برآورد می‌نماید (Alemie et al., 2010). کومار و همکاران در هند با استفاده از مدل AquaCrop به بررسی دقت در شبیه‌سازی عملکرد محصول با استفاده از تیمارهای شوری مختلف در گیاه گندم پرداختند و نتایج آن‌ها نشان داد که همبستگی بین برآورد عملکرد دانه، بیوماس و بهره‌وری آب به ترتیب ۰/۸۵، ۰/۷ و ۰/۷ بوده و مدل در برآورد عملکرد دانه در مقایسه با بیوماس و بهره‌وری آب از دقت بالاتری برخوردار بوده است (Kumar et al., 2014).

از سوی دیگر پیش‌بینی عملکرد گیاه پیش از برداشت با استفاده از فناوری سنجش‌ازدور در بسیاری از تصمیم‌گیری‌های کشاورزی بسیار سودمند است (Noureldin et al., 2013). تصاویر ماهواره‌ای با در اختیار قرار دادن اطلاعات مکانی در سطح وسیع امکان پیش‌بینی محصول را برای کاربران با کمی‌سازی روابط بین پارامترهای زراعی و خواص طیفی گیاه فراهم کرده است (Johnson, 2014). با استفاده از تخمین عملکرد محصول توسط سنجش‌ازدور می‌توان سیستم کنونی کشاورزی را به سمت کشاورزی دقیق و علمی سوق داد (یاقوتی و همکاران، ۱۳۹۷). ماهواره سنتینل ۲ با دوره بازگشت ۵ روزه دارای ۱۳ باند طیفی در محدوده‌های مرئی، مادون‌قرمز نزدیک و مادون‌قرمز طول موج کوتاه با توان تفکیک مکانی ۱۰، ۲۰ و ۶۰ متری بوده که شامل دو ماهواره A و B است که ماهواره Sentinel-2A و Sentinel-2B، به ترتیب در ۲۳ ژوئن ۲۰۱۵ و ۷ مارس ۲۰۱۷ به فضا پرتاب شدند.

صدوقی و همکاران (۱۳۹۵) در پژوهشی امکان استفاده از مدل VSM و تصاویر ماهواره‌ای برای تخمین عملکرد برنج در استان گیلان را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که تصاویر ماهواره‌ای از قابلیت مناسبی برای برآورد عملکرد برنج به‌عنوان ورودی مدل VSM برخوردار بود. در پژوهش دیگری که از تصاویر ماهواره‌ای لندست برای تخمین LAI برنج استفاده شد، نتایج بیان‌گر آن بود که دقت این روش بسته به میزان پوشش

تقرقی و غلظت دی‌اکسید کربن نرمال شده است، به وزن بیوماس قسمت هوایی گیاه تبدیل می‌شود (معادله ۲).

$$B_i = WP \times \left[\frac{Tr_i}{ET0_i} \right] \quad (2)$$

که در آن B_i وزن تولیدشده قسمت هوایی گیاه در روز برحسب گرم بر مترمربع، Tr_i مقدار تعرق روزانه برحسب میلی‌متر و $ET0_i$ تبخیر-تعرق گیاه مرجع در روز برحسب گرم بر مترمربع است که مقدار آن در شرایط اقلیمی مشابه، برای گیاهان C3 و C4 ثابت و برابر است (Steduto et al., 2007). در مدل AquaCrop برای محاسبه عملکرد از معادله زیر استفاده می‌شود.

$$Y = F_{HI} \times HI_0 \times B \quad (3)$$

که در آن Y عملکرد دانه، HI_0 شاخص برداشت مرجع، B بیوماس خشک و F_{HI} ضریبی است که شاخص برداشت مرجع را تنظیم می‌کند (Raes et al., 2012).

هرچند مدل AquaCrop مبنی بر فرآیندهای بیوفیزیکی پیچیده استوار است (Steduto et al., 2009) لیکن نیاز به پارامترهای ورودی کم و ساده‌ای دارد. پارامترهای ورودی موردنیاز این مدل به دودسته پارامترهای ثابت و متغیر تقسیم می‌شود. اطلاعات اقلیم شامل دمای حداکثر و حداقل روزانه، بارش روزانه و میانگین سالانه غلظت CO_2 اتمسفر است. این داده‌ها از ایستگاه سینوپتیک مرکز تحقیقات هواشناسی کشاورزی رشت (مجاور مؤسسه تحقیقات برنج کشور)، به‌عنوان نزدیک‌ترین قابل‌اعتمادترین ایستگاه هواشناسی دریافت شد و مقدار ET_0 نیز از روش معادله فائو پنمن-مانتیت محاسبه شد (Allen et al., 1998). 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_{WP}) است (جدول ۱). اطلاعات مدیریت و خصوصیات گیاهان در مدل AquaCrop از پنج قسمت اصلی (فنولوژی، کانوپی گیاه، تعرق گیاه، بیوماس تولیدشده و عملکرد قابل‌برداشت) تشکیل شده است که بیشتر در

نشاکاری در تاریخ ۱۳۹۷/۲/۲۷ و سپس به‌صورت هفتگی در دو تکرار با استفاده از کوادرات ۰/۵ متر در ۰/۵ متر انجام شد. در تاریخ ۹۷/۵/۱۷ برنج مزرعه پژوهشی به مرحله رسیدگی رسید و در تاریخ ۹۷/۵/۲۷ اقدام به برداشت محصول برنج شد. پیش از برداشت محصول، برای بررسی عملکرد نهایی شلتوک اقدام به نمونه برداری از ۵ گوشه مختلف زمین با استفاده از کوادرات با ابعاد ۱ مترمربع شد.

مدل AquaCrop

مدل AquaCrop مبنی بر فرآیندهای بیوفیزیکی با در نظر گرفتن یک ساختار مداوم از خاک، گیاه و هوا است (Raes et al., 2018). یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های مدل AquaCrop شبیه‌سازی پوشش گیاهی است و از تبخیر-تعرق مرجع (ET_0) و مقدار ضریب تعرق گیاهی (KcTr) استفاده می‌کند که به‌نوبه خود مقدار زیست‌توده تولیدشده را تعیین می‌کند (Zeleeke, 2019). مدل AquaCrop از معادله دورنبوس و کاسام (۱۹۷۹) که در آن ET نسبی، اساس محاسبه عملکرد و به‌صورت زیر است، به‌دست آمده است (Doorenbos and Kassam, 1979).

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

که در آن، Y_x بیانگر 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 است. همچنین مدل AquaCrop با تفکیک تبخیر از تعرق، با ارائه یک مدل ساده رشد توسط پارامتر پیری تاج پوشش گیاهی، شبیه‌سازی عملکرد نهایی (Y) به‌عنوان تابعی از زیست‌توده نهایی (B) و شاخص برداشت (HI) و تفکیک اثرات تنش آبی در چهار جزء رشد پوشش تاجی گیاه، پیری پوشش تاجی گیاه، بسته شدن روزنه‌ها و کاهش تعرق و شاخص برداشت توسعه‌یافته است. تفکیک ET به Tr و E ، از اثر مصرف غیر تولیدی آب از طریق E به‌ویژه در زمانی که شرایط پوشش گیاهی کامل نیست جلوگیری می‌کند. تعرق روزانه (Tr_i)، با استفاده از (ET_0) و بهره‌وری آب (WP) که با استفاده از نیاز

ارتباط با فرآیندهای دینامیک گیاه زراعی است.

مدل SWAP

SWAP یک مدل آگروهیدرولوژیکی بسیار جامع برای شبیه‌سازی جریان آب و انتقال املاح در خاک، تخمین نیاز آبی و عملکرد محصول است که بر اساس ارتباط فیزیکی بین پارامترهای خاک، آب، اتمسفر و گیاه است (پندی و همکاران، ۱۳۹۹). حرکت آب در خاک در این مدل بر اساس معادله ریچاردز (معادله ۴) محاسبه می‌شود. با استفاده از این معادله و محاسبه جذب آب توسط ریشه مقدار محصول برآورد می‌شود.

$$C_w(h) \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[k(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] - S(z) \quad (4)$$

که در آن، C_w ظرفیت آب خاک، h ش خاک، z و عمق و زمان، θ رطوبت خاک، k ضریب هدایت هیدرولیکی خاک و S جذب آب توسط گیاه است.

داده‌های موردنیاز مدل SWAP شامل اطلاعات خاک، آبیاری، پارامترهای گیاهی و داده‌های هواشناسی است. در این مطالعه به منظور محاسبه پارامترهای هیدرولیکی خاک با استفاده از نرم‌افزار RETC از اطلاعات درصد اجزای تشکیل‌دهنده خاک تا عمق توسعه ریشه در سه لایه ۰-۱۰، ۱۰-۲۰ و ۲۰-۳۰ سانتی‌متری و جرم ویژه ظاهری خاک استفاده شد. برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی اندازه‌گیری شده در خاک شالیزار مورد مطالعه در جدول ۱ ارائه شده است. پس‌ازاینکه اطلاعات

موردنیاز برای مدل RETC فراهم شد، پارامترهای هیدرولیکی موردنیاز برای زیر مدل خاکی مدل SWAP برای هر لایه از خاک مزرعه مورد پژوهش با استفاده از نرم‌افزار RETC به دست آمد (جدول ۲). داده‌های گیاهی شامل تاریخ کاشت، گل‌دهی و رسیدگی محصول به ترتیب تاریخ‌های ۹۷/۰۴/۱۳، ۹۷/۰۲/۲۷ و ۹۷/۰۵/۲۰، زمان کاشت تا سبز شدن، زمان لازم برای رسیدن به حداکثر رشد یا حداکثر پوشش گیاهی، عمق ریشه در دوره اول رشد، عمق نهایی ریشه، تراکم کاشت، ضریب گیاهی، ارتفاع گیاه، شاخص سطح برگ و وزن خشک اجزای گیاه (شامل ریشه، ساقه، برگ و خوشه) در طول دوره رشد بود. داده‌های آبیاری شامل دبی آب آبیاری که با استفاده از WSC فلوم تیپ ۳ اندازه‌گیری شد، ارتفاع آب غرقاب در هر دوره آبیاری با فواصل روزانه، مدت زمان هر آبیاری و مدت زمان غرقاب مزرعه بود.

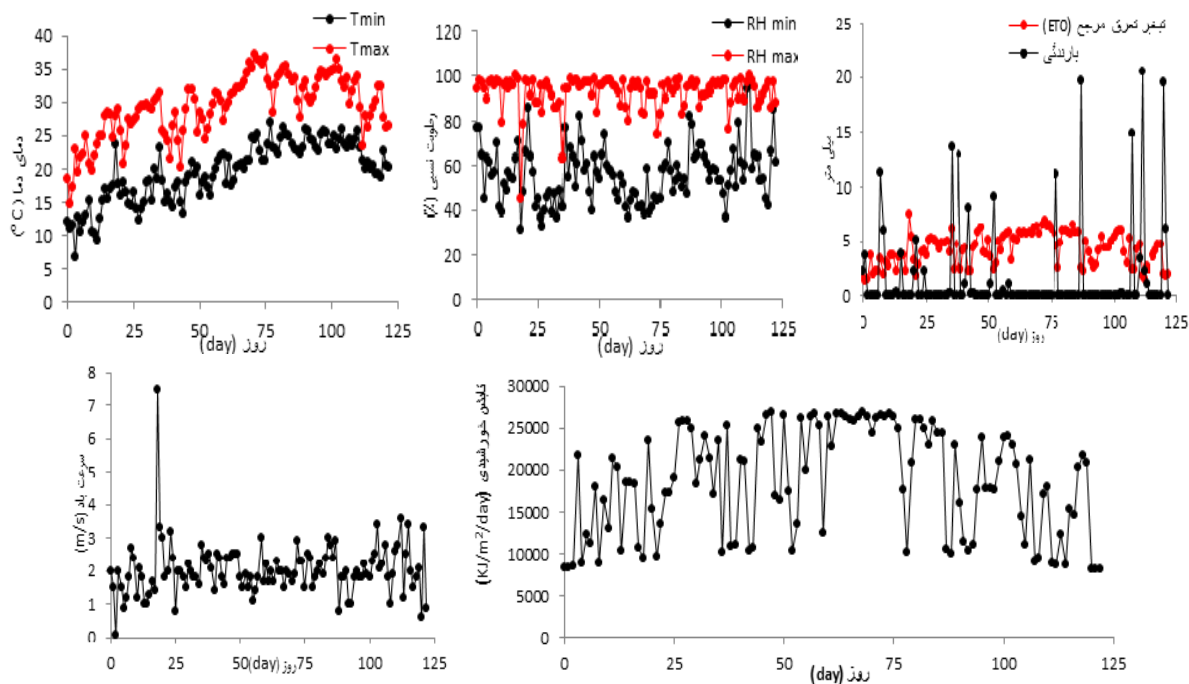
در پژوهش حاضر فواصل آبیاری پس از کاهش مقدار آب به اندازه ۲ سانتی‌متر از سطح خاک صورت گرفت و مقدار شوری آب آبیاری برابر با ۱/۶۱ دسی‌زیمنس بر متر بود. داده‌های هواشناسی با گام زمانی روزانه منطقه شامل تابش خورشیدی، دمای کمینه و بیشینه روزانه، درصد رطوبت نسبی، بارندگی، میانگین سرعت باد در ارتفاع ۲ متری و تبخیر-تعرق مرجع بوده که در پژوهش حاضر این پارامترها از ایستگاه سینوپتیک رشت که در مجاور مؤسسه تحقیقات برنج کشور قرار دارد، به‌عنوان نزدیک‌ترین و قابل اعتمادترین ایستگاه هواشناسی دریافت شد. اطلاعات مذکور برای دوره رشد برنج در سال زراعی مورد آزمایش در شکل ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک شالیزار مورد مطالعه

عمق خاک	جرم ویژه ظاهری	رطوبت ظرفیت زراعی	رطوبت نقطه پژمردگی	ماده آلی	رس	سیلت	شن	بافت خاک
سانتی‌متر	گرم بر سانتی‌متر مکعب	درصد حجمی	درصد	درصد		درصد		-
۰-۱۰	۱/۱۰	۰/۴۰	۰/۲۷	۱/۷۲	۴۷	۳۹	۱۴	رسی
۱۰-۲۰	۱/۲۰	۰/۴۰	۰/۳۰	۱/۵۴	۴۴	۳۹	۱۷	رسی
۲۰-۳۰	۱/۳۲	۰/۴۱	۰/۳۰	۱/۲۵	۴۷	۴۴	۹	رس سیلتی

جدول ۲- پارامترهای هیدرولیکی برآورد شده توسط مدل RETC

عمق لایه خاک (سانتی متر)	رطوبت باقی مانده	رطوبت اشباع	هدایت هیدرولیکی اشباع (سانتی متر بر روز)	پارامتر n در مدل ون گنوختن	پارامتر α در مدل ون گنوختن (یک بر سانتی متر)
۰-۱۰	۰/۱۰۴	۰/۵۶۰	۵۱/۲۲	۱/۳۵۰	۰/۰۱۶۸
۱۰-۲۰	۰/۰۹۹	۰/۵۲۲	۳۰/۴۱	۱/۳۸۰	۰/۰۱۴۴
۲۰-۳۰	۰/۰۹۹	۰/۴۹۸	۱۳/۲۵	۱/۳۶۵	۰/۰۱۳۷



شکل ۱- میانگین داده‌های هواشناسی برای دوره رشد برنج در منطقه مورد مطالعه در سال زراعی ۱۳۹۷

استفاده شد. سپس با مشاهدات صحرایی پارامتر عملکرد محصول برنج مقایسه گردید و از ضرایب واسنجی شده آن در مدل استفاده شد. برخی از مهم‌ترین پارامترهای گیاهی ثابت و واسنجی شده مورد استفاده در مدل AquaCrop در جدول ۳ ارائه شده است.

در مدل SWAP نیز با یک تخمین اولیه از پارامترهای حساس، مدل واسنجی و سپس با مقادیر مشاهداتی مقایسه شد. به‌منظور واسنجی مدل SWAP از مدل غیرخطی تخمین پارامتر PEST استفاده شد که در آن پارامترهایی که بر مقدار خروجی داده‌ها و نیز بر رشد گیاه تأثیر بسزایی دارد، نظیر سطح ویژه برگ (SLA)، شاخص سطح برگ در مرحله جوانه‌زنی (LAIEM) و راندمان مصرف نور (EFF) انتخاب شدند. سپس

واسنجی و صحت‌سنجی مدل AquaCrop و SWAP

برای استفاده از مدل‌های شبیه‌ساز تحلیل حساسیت، واسنجی و صحت‌سنجی مدل ضروری است. عمل واسنجی و صحت‌سنجی بر اساس مقادیر اندازه‌گیری شده عملکرد شلتوک، بیوماس کل و مقدار ماده خشک در طول دوره رشد انجام شد.

در این پژوهش، نمونه‌برداری در دو تکرار و در هر تکرار ۱۴ نمونه طی فصل رشد برداشت شد. از داده‌های اندازه‌گیری شده در تکرار اول برای واسنجی و از داده‌های اندازه‌گیری شده در تکرار دوم برای صحت‌سنجی استفاده شد. به‌منظور واسنجی مدل AquaCrop از پارامترهایی که بر مقدار خروجی داده‌ها تأثیرگذار است و همچنین بر رشد گیاه تأثیر بسزایی دارد،

با مشاهدات صحرایی پارامتر عملکرد محصول برنج مقایسه SWAP استفاده شد (جدول ۴).

جدول ۳- برخی پارامترهای گیاهی مورد استفاده در مدل Aquacrop

توضیح	واحد	میزان	پارامتر
پیش فرض	درجه سانتی‌گراد	۱۰	دمای پایه رشد
پیش فرض	درجه سانتی‌گراد	۴۰	دمای بالا
واسنجی	درصد در هر روز	۹/۲۴	ضریب کاهش پوشش در پیری
واسنجی	-	۰/۵	آستانه بالای ضریب تنش آبی خاک برای گسترش تاجی گیاه
پیش فرض	-	۳	ضریب شکل منحنی ضریب تنش آبی خاک برای بسته شدن روزنه‌ها
پیش فرض	-	۰/۶	آستانه بالای ضریب تنش آبی برای پیری پوشش تاجی گیاه
پیش فرض	-	۳	ضریب شکل منحنی ضریب تنش آبی خاک برای پیری پوشش تاجی
واسنجی	-	۰	حد بالای تخلیه آب جهت توسعه برگ‌ها
واسنجی	-	۰/۴	حد پایین تخلیه آب جهت توسعه برگ‌ها
واسنجی	گرم بر مترمربع	۱۹	بهره‌وری آب تعدیل شده
واسنجی	درصد	۰/۴۰	شاخص برداشت

جدول ۴- ضرایب واسنجی تخمین زده شده توسط PEST

مقدار بهینه	واحد	اختصار	پارامتر حساس در مدل SWAP
۰/۱۹۶	-	LAIEM	شاخص سطح برگ در مرحله جوانه‌زنی
-۰/۰۰۴	-	SLA	سطح ویژه برگ
۰/۷۰	-	KDIF	ضریب خاموشی برای پخش نور مرئی
۶/۰۰	ژول بر مترمربع بر ثانیه/کیلوگرم بر هکتار بر ساعت	EFF	راندمان مصرف نور
۳۲/۳۲	کیلوگرم بر هکتار بر ساعت	AMAX	حداکثر میزان همانندسازی دی اکسید کربن

تاریخ اخذ تصاویر مورد استفاده و نیز زمان نمونه‌برداری از مزرعه در جدول ۵ ارائه شده است. لازم به ذکر است جهت انتخاب بهترین تصویر از لحاظ عدم ابرناکی و به‌منظور بالا بردن دقت تصحیحات و پردازش تصاویر، نزدیک‌ترین تصاویر به زمان نمونه‌برداری از مزرعه انتخاب شدند. پس از استخراج شاخص‌های پوشش گیاهی جهت استخراج مقادیر DN شاخص‌های به‌دست‌آمده کلیه لایه‌ها به سیستم مختصات UTM-ZONE 39 انتقال داده‌شده و GIS Ready شدند. سپس مقادیر شاخص سطح برگ در نقاط نمونه برداری با استفاده از نرم‌افزار ArcMap 10.2 استخراج شدند.

استخراج برخی پارامترهای ورودی مدل SWAP از

تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲

در پژوهش حاضر تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲ برای مراحل مختلف رشد از پایگاه داده <https://scihub.copernicus.eu> تهیه و جهت انجام تصحیحات هندسی و رادیومتریک و درنهایت جهت استخراج پارامترهای گیاهی وارد محیط نرم‌افزار ENVI ver 5.3 شد. با استفاده از شاخص‌های پوشش گیاهی LAI، NDVI و SAVI به‌دست آمده از آن و با به‌دست آوردن معادلات مقدار اجزای ماده خشک گیاهی جهت ورودی مدل SWAP و بروز رسانی کردن مدل در طول دوره رشد استفاده شد.

جدول ۵- تاریخ نمونه برداری از مزرعه و تصاویر مورد استفاده در استخراج شاخص های گیاهی

شماره تصویر	تاریخ نمونه برداری از مزرعه	مراحل رشد برنج	تاریخ اخذ تصویر سنتینل ۲	مختصات جغرافیایی نمونه برداری (یوتی ام)
۱	۱۳۹۷/۰۳/۰۵	رویشی	۱۳۹۷/۰۳/۰۵	۳۷۹۵۱۲، ۴۱۱۸۳۶۱
۲	۱۳۹۷/۰۳/۱۹	رویشی	۱۳۹۷/۰۳/۲۰	۳۷۹۴۹۷، ۴۱۱۸۳۶۲
۳	۱۳۹۷/۰۳/۲۶	رویشی	۱۳۹۷/۰۳/۲۵	۳۷۹۴۸۱، ۴۱۱۸۳۵۸
۴	۱۳۹۷/۰۴/۰۲	زایشی	۱۳۹۷/۰۴/۰۴	۳۷۹۴۷۷، ۴۱۱۸۳۳۸
۵	۱۳۹۷/۰۴/۰۹	زایشی	۱۳۹۷/۰۴/۰۹	۳۷۹۵۱۴، ۴۱۱۸۳۲۶
۶	۱۳۹۷/۰۴/۱۶	زایشی	۱۳۹۷/۰۴/۱۴	۳۷۹۵۱۸، ۴۱۱۸۳۲۴
۷	۱۳۹۷/۰۴/۲۳	زایشی	۱۳۹۷/۰۴/۲۴	۳۷۹۴۷۴، ۴۱۱۸۳۳۳
۸	۱۳۹۷/۰۴/۳۰	رسیدگی	۱۳۹۷/۰۵/۰۳	۳۷۹۵۳۸، ۴۱۱۸۳۳۷
۹	۱۳۹۷/۰۵/۰۶	رسیدگی	۱۳۹۷/۰۵/۰۸	۳۷۹۴۷۸، ۴۱۱۸۳۲۸
۱۰	۱۳۹۷/۰۵/۲۰	رسیدگی	۱۳۹۷/۰۵/۲۳	۳۷۹۵۳۴، ۴۱۱۸۳۶۱

حالت مطلوب یا حالتی که مقادیر شبیه سازی شده و اندازه گیری شده مساوی باشند، برابر با صفر هستند. بدیهی است هرچه مقدار این دو مؤلفه به صفر نزدیک تر باشد مدل دقیق تر است. چنانچه مقدار ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده کمتر از ۱۰ باشد نشان دهنده حالت عالی شبیه سازی و بین ۱۰-۲۰ حالت خوب، بین ۲۰-۳۰ حالت متوسط و بالای ۳۰ نشانه حالت ضعیف شبیه سازی است (Jamieson et al., 1991).

در این پژوهش جهت انجام پردازش های لازم و محاسبات بر روی تصاویر ماهواره ای جهت بروز رسانی مدل SWAP از نرم افزار ENVI 5.3 و برای تهیه و استخراج نقشه های مورد نیاز از نرم افزار ArcMap 10.2 استفاده شد. همچنین برای استخراج ضرایب هیدرولیکی خاک از نرم افزار RETC و برای انجام محاسبات آماری و ترسیم گراف و نمودارها از نرم افزار Excel 2010 استفاده شد.

نتایج و بحث

در این پژوهش عملکرد شلتوک و مقدار ماده خشک اندازه گیری شده در سطح مزرعه با مقادیر شبیه سازی شده توسط

ارزیابی نتایج مدل های SWAP و AquaCrop

جهت ارزیابی آماری مقادیر شبیه سازی شده از آماره های ضریب تبیین (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (nRMSE) و کارایی مدل (EF) استفاده شد. بیان ریاضی آماره های مذکور به صورت روابط (۵) تا (۸) ارائه شده است (صدوقی و همکاران، ۱۳۹۵).

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2} \right]^2 \quad (5)$$

$$RMSE = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right)^{0.5} \quad (6)$$

$$nRMSE = \frac{100 \left(\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right)^{0.5}}{\bar{O}} \quad (7)$$

$$EF = \frac{(\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2)}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (8)$$

که در آن ها O_i و P_i به ترتیب مقادیر شبیه سازی شده و اندازه گیری شده، n تعداد نمونه ها و \bar{O} و \bar{P} میانگین مقادیر اندازه گیری شده و شبیه سازی شده است. مقادیر ریشه میانگین مربعات خطا و ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده در

شبیه‌سازی وزن ماده خشک دارد (شکل ۳). همچنین دقت مدل SWAP در شبیه‌سازی مقدار شلتوک در دو مرحله زایشی و رسیدگی با R^2 برابر با ۰/۹۹ نسبت به مدل AquaCrop ارجحیت دارد (شکل ۴). جنوبی و همکاران در تحقیقی به‌منظور افزایش کارایی مصرف آب گیاه برنج با استفاده از مدل SWAP در شمال کشور به این نتیجه رسیدند که مقدار RMSE برای عملکرد برنج برابر با ۴/۹۴ درصد بود و از این مدل برای شبیه‌سازی سناریوهای مختلف استفاده شد (Jonubi et al., 2018). نتایج تحقیقات موسوی و همکاران (۱۳۹۸) در شبیه‌سازی عملکرد و کارایی مصرف آب ارقام مختلف برنج تحت شرایط مختلف کاشت با استفاده از دو مدل AquaCrop و SWAP (بدون استفاده از سنجش‌ازدور) نشان داد که متوسط اختلاف عملکرد شبیه‌سازی شده توسط مدل‌های AquaCrop و SWAP با مقادیر مشاهداتی به ترتیب برابر با ۰/۶۷ و ۰/۶۴ تن بر هکتار بود. در تحقیقی به‌منظور شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری مصرف آب در کشت برنج تحت شرایط مدیریت آبیاری و تاریخ کاشت با مدل AquaCrop، نتایج تحقیق نشان داد که ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده عملکرد شلتوک و عملکرد زیستی به ترتیب ۹ و ۵ درصد است و همچنین با توجه به ضریب تبیین بالای ۰/۷ و کارایی بالای ۰/۶ مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد شلتوک و عملکرد زیستی از دقت مناسبی برخوردار بود (اعلایی بازکیایی و همکاران، ۱۳۹۸). در پژوهش حاضر متوسط اختلاف مقدار ماده خشک اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده با مدل SWAP به‌روزرسانی شده با تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲ طی مراحل مختلف رشد برابر با ۲۱/۹۶، ۴۱۸/۹۰ و ۴۷۳/۴۶۷ کیلوگرم بر هکتار بوده که بیان‌گر آن است، زمانی‌که مدل SWAP با تصاویر ماهواره‌ای به‌روزرسانی شده نسبت به مدل AquaCrop از توانایی و دقت بالاتر شبیه‌سازی برخوردار بوده است.

مدل SWAP بروز رسانی شده با تصاویر سنتینل ۲ و مدل AquaCrop مقایسه شد.

مدل AquaCrop

متغیرهای آماری مدنظر برای ارزیابی دقت مدل در شبیه‌سازی مقدار ماده خشک و عملکرد شلتوک طی دوره رشد برنج در جدول‌های (۶) و (۷) ارائه داده شده است. نتایج نشان داد که در مدل AquaCrop ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) برای مقدار ماده خشک به ترتیب در سه مرحله رویشی، زایشی و رسیدگی ۲۸/۳۰، ۴۸۰/۷۷ و ۷۲۸/۷۶ و برای عملکرد شلتوک به ترتیب در دو مرحله زایشی و رسیدگی ۹/۵۵ و ۳۳۸/۴۶ کیلوگرم در هکتار بود.

مدل SWAP

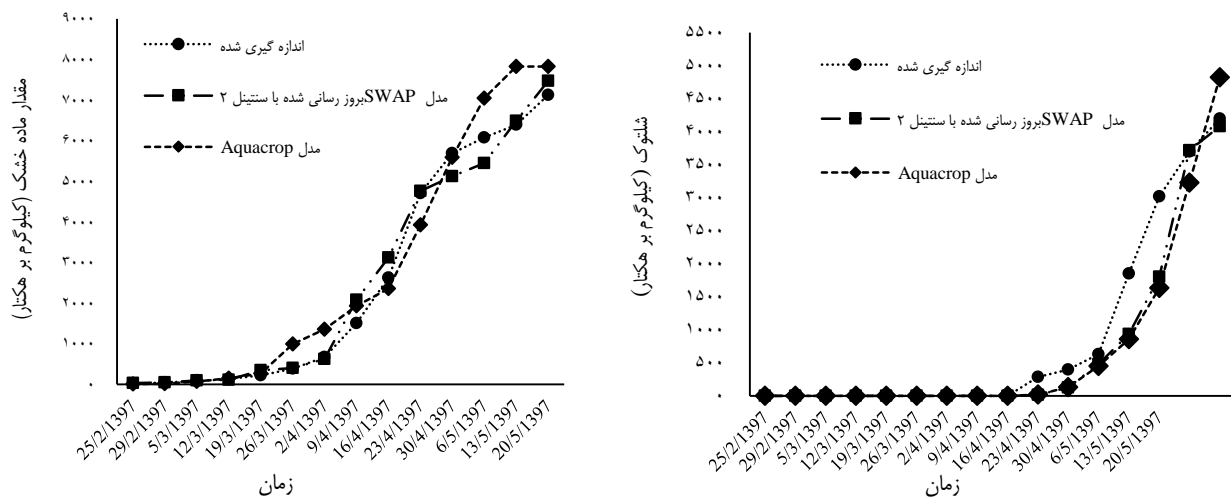
در مدل SWAP بروز رسانی شده با تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲ ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) برای مقدار ماده خشک به ترتیب در سه مرحله رویشی، زایشی و رسیدگی ۲۱/۹۶، ۴۱۸/۹۰ و ۴۷۳/۴۶۷ (جدول ۶) و برای عملکرد شلتوک به ترتیب در دو مرحله زایشی و رسیدگی ۶/۲۸ و ۱۴۲/۴۰ کیلوگرم در هکتار (جدول ۷) به‌دست آمد. مقدار ماده خشک و شلتوک اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده با دو مدل AquaCrop و مدل SWAP بروز رسانی شده طی دوره رشد در شکل ۲ نشان داده شده است. نتایج حاصل از رگرسیون خطی بین مقدار ماده خشک اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده توسط مدل نشان داد که ضریب تبیین (R^2) در هر مرحله از رشد برنج در مدل SWAP بروز رسانی شده نسبت به مدل AquaCrop از دقت بالاتری برخوردار بوده است و مقدار R^2 در مرحله رویشی، زایشی و رسیدگی به ترتیب در مدل SWAP ۰/۹۸، ۰/۹۸ و ۰/۹۶ و در مدل AquaCrop ۰/۹۴، ۰/۹۷ و ۰/۸۳ است که نشان از مناسب‌تر بودن مدل SWAP به‌روزرسانی شده در

جدول ۶- آماره‌های محاسبه‌شده برای ارزیابی وزن ماده خشک اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده توسط مدل SWAP بروز رسانی شده با تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲ و AquaCrop

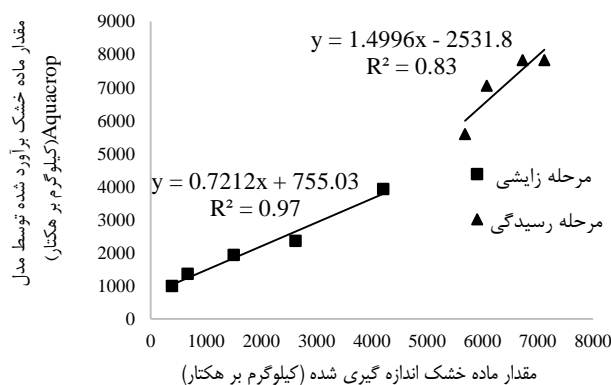
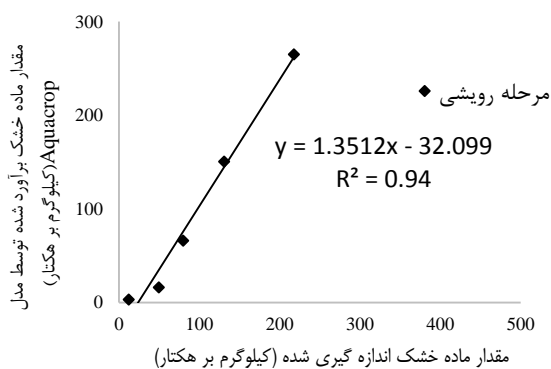
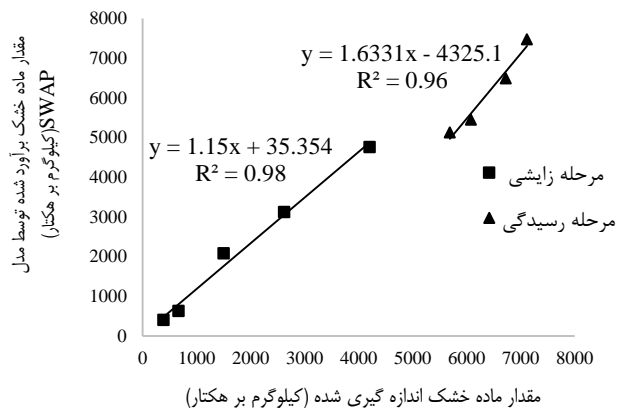
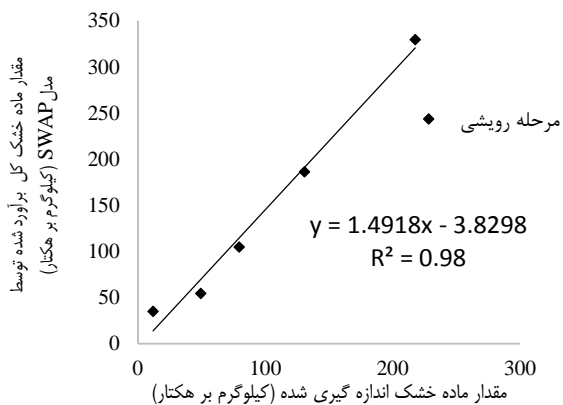
مدل	مرحله رشد	RMSE (کیلوگرم بر هکتار)	nRMSE (درصد)	EF	R ²
SWAP به‌روزرسانی شده	رویشی	۲۱/۹۶	۹/۳۲	۰/۹۹	۰/۹۸
	زایشی	۴۱۸/۹۰	۱۴/۷۳	۰/۹۹	۰/۹۸
	رسیدگی	۴۷۳/۴۶	۷/۳۹	۰/۹۹	۰/۹۶
AquaCrop	رویشی	۲۸/۳۰	۱۲/۰۲	۰/۹۹	۰/۹۴
	زایشی	۴۸۰/۷۷	۱۶/۹۰	۰/۹۸	۰/۹۷
	رسیدگی	۷۲۸/۷۶	۱۱/۳۸	۰/۹۷	۰/۸۳

جدول ۷- آماره‌های محاسبه‌شده برای ارزیابی وزن شلتوک اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده توسط مدل SWAP بروز رسانی شده با تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲ و AquaCrop

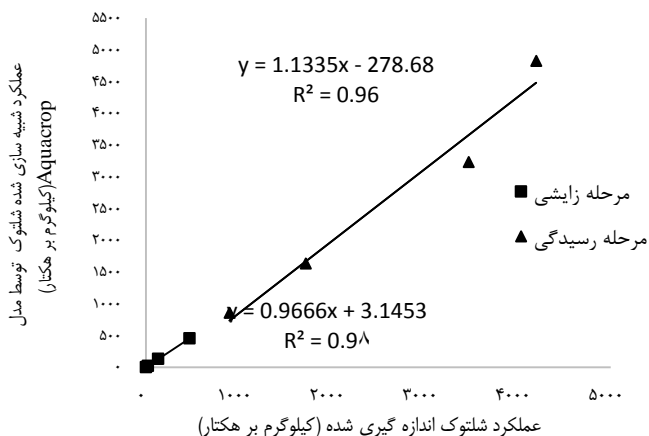
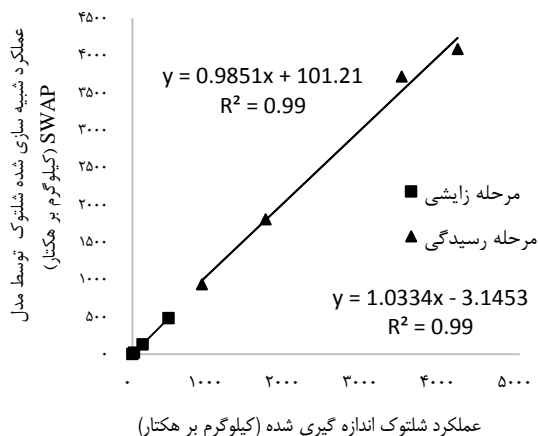
مدل	مرحله رشد	RMSE (کیلوگرم بر هکتار)	nRMSE (درصد)	EF	R ²
SWAP به‌روزرسانی شده	زایشی	۶/۲۸	۵/۱۰	۰/۹۹	۰/۹۹
	رسیدگی	۱۴۲/۴۰	۴/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹
AquaCrop	زایشی	۹/۵۵	۷/۷۵	۰/۹۹	۰/۹۸
	رسیدگی	۳۳۸/۴۶	۱۱/۸۷	۰/۹۸	۰/۹۶



شکل - مقایسه مقدار ماده خشک و شلتوک اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده با مدل SWAP به‌روزرسانی شده با تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲ و مدل AquaCrop



شکل ۳- مقایسه رابطه بین مقدار ماده خشک اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده توسط مدل SWAP بروز رسانی شده با تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲ و AquaCrop



شکل ۴- مقایسه رابطه بین مقدار شلتوک اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده توسط مدل SWAP بروز رسانی شده با تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲ و AquaCrop

نتیجه گیری

به طور کلی در این پژوهش هر دو مدل AquaCrop و SWAP به روزرسانی شده با تصاویر ماهواره‌ای عملکرد شلتوک و زیست توده برنج رقم هاشمی را با دقت بالایی پیش‌بینی کردند. لیکن با اندکی تفاوت ($R^2 = 0/96$) مدل AquaCrop نسبت به مدل SWAP به روزرسانی شده با تصاویر ماهواره‌ای در شبیه‌سازی مقدار شلتوک در مرحله آخر از دقت کمتری برخوردار بود و مدل SWAP که ورودی‌هایش با استفاده از داده‌های به دست آمده از تصاویر ماهواره‌ای بهینه شده بود، در مراحل مختلف از دقت بالاتری برای شبیه‌سازی عملکرد شلتوک برخوردار بود. با توجه به این که هر دو مدل AquaCrop و SWAP نسبت به مدل‌های مشابه نیاز به پارامترهای ورودی کمتری دارند، استفاده از این مدل‌ها جهت پیش‌بینی عملکرد و تأثیر مدیریت‌های مختلف بر تولید محصول توصیه می‌شود و در صورت دسترسی به تصاویر ماهواره‌ای می‌توان جهت افزایش کارایی و دقت شبیه‌سازی از تلفیق مدل و سنجش‌ازدور استفاده کرد. در نهایت، استفاده از مدل‌های فوق برای ارقام مختلف برنج در شرایط مدیریت‌های مختلف آبیاری و تاریخ کاشت‌های مختلف، به منظور استفاده بهینه از منابع آب و دستیابی به عملکرد بهینه محصول در شالیزارهای استان گیلان توصیه می‌شود.

منابع

ابراهیمی پاک، ن. ع.، اگدرنژاد، ا.، تافته، ا. و خدادادی دهکردی، د. ۱۳۹۷. بررسی کارایی مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد گیاه کلزا تحت سناریوهای کم‌آبیاری در دشت قزوین. تحقیقات آب و خاک ایران. ۴۹(۵): ۱۰۰۳-۱۰۱۵.

اعلایی بازکیایی، پ.، کامکار، ب.، امیری، ا.، کاظمی، ح.، رضایی، م. و اکبرزاده، س. ۱۳۹۸. شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری مصرف آب در کشت برنج تحت شرایط مدیریت آبیاری و تاریخ کاشت با مدل AquaCrop. نشریه حفاظت منابع آب و خاک. ۲(۲): ۱۷-۳۴.

اعلایی بازکیایی، پ.، کامکار، ب.، امیری، ا.، کاظمی، ح. و رضایی، م. ۱۳۹۹. ارزیابی مدل‌های گیاهی AquaCrop و ORYZA2000 در شبیه‌سازی عملکرد برنج تحت

مدیریت‌های زراعی در شهر رشت. نشریه پژوهش‌های زراعی ایران. ۱۸(۴): ۴۰۱-۴۱۲.

امیری، ا. و شیرشاهی، ف. ۱۳۹۶. ارزیابی عکس‌العمل ذرت دانه‌ای به مدیریت کم‌آبیاری با استفاده از مدل SWAP. اکوفیزیولوژی گیاهان زراعی. ۱۱(۴): ۷۵۹-۷۷۴.

برزیکار، م. ع.، اگدرنژاد، ا.، تافته، ا. و ابراهیمی پاک، ن. ع. ۱۳۹۹. شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری آب گندم در دشت هندججان با استفاده از مدل AquaCrop. مدیریت آب در کشاورزی. ۷(۱): ۵۳-۶۴.

بی‌نام، ۱۳۹۹. آمارنامه کشاورزی سال ۱۳۹۸-۱۳۹۷ (جلد اول: محصولات زراعی). وزارت جهاد کشاورزی. ۹۷ صفحه.

پندی، ح.، اسدی کپورچال، ص.، وظیفه‌دوست، م. و رضایی، م. ۱۳۹۹. شبیه‌سازی عملکرد و اجزای عملکرد گیاه برنج با استفاده از مدل SWAP و فناوری سنجش‌ازدور به منظور استفاده بهینه از منابع آب و خاک. محیط‌زیست و مهندسی آب. ۶(۴): ۳۷۴-۳۸۷.

حیدری نیا، م.، ناصری، ع. ع. و برومند نسب، س. ۱۳۹۱. بررسی امکان کاربرد مدل AquaCrop در برنامه‌ریزی آبیاری آفتابگردان در اهواز. مهندسی منابع آب. ۵(۱۲): ۳۷-۵۰.

رضایی، م.، وظیفه‌دوست، م.، دواتگر، ن.، پیرمردیان، ن.، مختاری، ش.، شاه‌نظری، ع.، رائینی‌سرجاز، م. و امیری، ا. ۱۳۹۵. استفاده از تصاویر ماهواره لندست در برآورد شاخص سطح برگ برنج در سطوح وسیع. مدیریت آب در کشاورزی. ۲(۳): ۵۳-۶۰.

سیاحی، ح.، اگدرنژاد، ا. و ابراهیمی پاک، ن. ع. ۱۳۹۹. مقایسه دو مدل AquaCrop و SWAP در شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری آب چغندر قند تحت دوره‌های مختلف آبیاری. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۱۴(۴): ۱۳۱۱-۱۳۲۱.

صدوقی، ل.، همایی، م.، نوروزی، ع. ا. و اسدی کپورچال، ص. ۱۳۹۵. برآورد عملکرد برنج با استفاده از مدل VSM و تصاویر ماهواره‌ای در استان گیلان. تحقیقات غلات. ۶(۳): ۳۹۷-۴۱۰.

علیزاده، ح. ع.، نظری، ب.، پارس‌نژاد، م.، رضایی‌اعتدالی، ه. و جانباز، ح. ر. ۱۳۸۹. ارزیابی مدل AquaCrop در مدیریت کم‌آبیاری گندم در منطقه کرج. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۴(۲): ۲۷۳-۲۸۳.

کریمی، ش.، اگدرنژاد، ا. و نخجوانی مقدم، م. م. ۱۳۹۹. ارزیابی مدل SWAP برای شبیه‌سازی دو رقم زودرس و متوسط

- A test of the computer simulation model ARC-WHEAT1 on wheat crops grown in New Zeland. *Field Crops Research*, 27(4): 337-350.
- Jin, X., Li, Z., Nie, C., Xu, X., Feng, H., Guo, W. and Wang, J. 2018. Parameter sensitivity analysis of the AquaCrop model based on extended fourier amplitude sensitivity under different agro-meteorological conditions and application. *Field Crops Research*. 226: 1-15.
- Johnson, D.M. 2014. An assessment of pre-and within-season remotely sensed variable for forecasting corn and soybean yields in the United States. *Remote Sensing of Environment*. 141(0):116-128.
- Jonubi, R., Rezaverdinejad, V. and Salemi, H. 2018. Enhancing field scale water productivity for several rice cultivars under limited water supply. *Paddy and Water Environment*. 16(1): 125-141.
- Kumar, P., Sarangi, A., Singh, D.K. and Parihar, S.S. 2014. Evaluation of aquacrop model in predicting wheat yield and water productivity under irrigation saline regimes. *Irrigation and Drainage*. 63(4): 474-487.
- Liu, Y., Yang, H. S., Li, J. S., Li, Y. F. and Yan, H. J. 2018. Estimation of irrigation requirements for drip-irrigated maize in a subhumid climate. *Journal of integrative agriculture*. 17(3): 60345-7.
- Noureldin, N.A., Aboelghar, M. A., Saady, H.S. and Ali, A.M. 2013. Rice yield forecasting models using satellite imagery in Egypt. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and SpaceSciences*. 16(1): 125-131.
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C. and Fereres, E. 2012. Reference manual AquaCrop, FAO, Land and Water Division, Rome, Italy.
- Raes, D.; Steduto, P.; Hsiao, et al. 2018. AquaCrop Version 6.0 - 6.1 Reference Manual June. FAO, Rome, Italy.
- Steduto, P., Hsiao, T. C. and Fereres, E. 2007. On the conservative behavior of biomass water productivity. *Irrigation Science*. 25(3): 189-207.
- Steduto, P., Hsiao, T.C., Raes, D. and Fereres, E. 2009. AquaCrop. The FAO crop model to predict yield response to water. *Agronomy Journal*. 101(3): 426-437.
- Zelege, K.T. 2019. Calibration and validation for faba bean (*Vicia faba* L.) under different agronomic managements. *Agronomy*. 9(6): 320: 1-20.
- رس ذرت دانه‌ای در تراکم‌های مختلف کاشت تحت آبیاری بارانی. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۱۱۴(۶): ۱۸۹۳-۱۹۰۷.
- موسوی، س. ا. ح.، اگدرنژاد، ا. و گیلانی، ع. ع. ۱۳۹۸. شبیه‌سازی عملکرد و کارایی مصرف آب ارقام مختلف برنج تحت شرایط مختلف کاشت با استفاده از دو مدل AquaCrop و SWAP. نشریه مدیریت آب در کشاورزی. ۱۲۳-۱۳۴: (۱)۶.
- یاقوتی، ح.، پذیرا، ا.، امیری، ا. و مسیح‌آبادی، م. ح. ۱۳۹۷. کاربرد تصاویر ماهواره‌ای و فناوری سنجش‌ازدور برای تخمین عملکرد برنج. نشریه حفاظت منابع آب و خاک. ۷(۳): ۵۵-۶۹.
- 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. Chapters in Book: Strategies for Building Resilience against Climate and Ecosystem Changes in Sub-Saharan Africa. Springer, Singapore. 93-116
- Alemie. A., Habtu, S., Hadgu, K. M. Kebede, A. and Dejene, T. 2010. Test of AquaCrop model in nTest of AquaCrop model in simulating biomass and yield of water deficient and irrigated barley (*Hordeum vulgare*). *Agricultural Water Management*. 97(11): 1838-1846.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. and Smith, M. 1998. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation and drainage. paper 56. Food and Agriculture Organization. Rome. Italy. 300 pp.
- Besalatpour, A. A., Hajabbasi, M. A., Ayoubi, S. and Jalalian, A. 2012. Identification and prioritization of critical sub-basins in a highly mountainous watershed using SWAT model. *Eurasian Journal of Soil Science*. 1(1): 58-63.
- Doorenbos, J. and Kassam, A.H. 1979. Yield response to water. FAO Irrigation and Drainage. Paper 33. Rome. 193 P.
- FAO, 2017. FAOSTAT. Statistical Databases. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <http://www.fao.org>.
- FAO. 2020. Food and Agricultural Organization of the United Nations. <http://www.fao.org>.
- Geerts, S. and Raes, D. 2009. Defecit irrigation as on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. *Agricultural Water Management*. 96(9): 1275-1284.
- Jamieson, P.D., Porter, J.R. and Wilson, D.R. 1991.

Capability of Updated SWAP Model with Satellite Images and AquaCrop Model in Simulating the Hashemi Rice Yield in Guilan Province

A. Abdi¹, S. Asadi Kapourchal^{2*}, M. Vazifedoust³, M. Rezaei⁴ and A. Egdernezhad⁵

Abstract

Nowadays, the use of simulation models is of great importance for optimal management of the production process and yield on farm scale. Due to the fact that combination of remote sensing with a model increases the accuracy of simulation, this study was conducted to evaluate the updated SWAP model combined with Sentinel 2 satellite images and AquaCrop model to simulate Hashemi rice yield in one of the research farms at the National Rice Research Institute of Iran. The measured parameters that were compared with two models included the quantity of dry matter of plant components during growth period. Evaluation of simulated and measured values indicated that the root mean square error of paddy and rice yield simulated with SWAP model updated with Sentinel 2 satellite images in two stages of reproductive and ripening were 6.28 and 142.40 kg/ha, respectively. Also, the RMSE values obtained for AquaCrop model were 9.55 and 338.46 kg/ha, respectively. Further evaluation of obtained statistics revealed that both SWAP updated with satellite images and AquaCrop models, can predict the yield and biomass of Hashemi cultivar with reasonably high accuracy. However, the AquaCrop model with a slight difference ($R^2=0.96$), was less accurate in simulating the quantity of paddy than the SWAP model updated with satellite images. Furthermore, when SWAP's inputs were updated by data obtained from satellite images, at different stages, provided a higher accuracy to simulate the yield of paddy. Thus, it can be fairly used to simulate the rice yield.

Keywords: Crop growth models, LAI, Paddy field, Satellite image, Simulation

¹ Graduated MSc, Department of Soil Science, Faculty of Agricultural Sciences, University Of Guilan, Rasht, Iran

² Assistant Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agricultural Sciences, University Of Guilan, Rasht, Iran (* Corresponding Author Email: safooraasadi@guilan.ac.ir)

³ Assistant Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Sciences, University Of Guilan, Rasht, Iran

⁴ Research Assistant Professor, Rice Research Institute of Iran, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Rasht, Iran

⁵ Assistant professor, Department of Water Sciences and Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran

Received: 16 April 2021

Accepted: 23 June 2021