

مقاله علمی-پژوهشی

بررسی اثر بروز رسانی ماده خشک حاصل از مشاهدات زمینی و ماهواره‌ای بر دقت شبیه‌سازی عملکرد برنج رقم هاشمی با استفاده از مدل SWAP

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

چکیده

پیش‌بینی عملکرد گیاه پیش از برداشت با استفاده از مدل‌های شبیه‌ساز و فناوری سنجش‌ازدور در مدیریت کشاورزی پایدار بسیار حائز اهمیت است. پژوهش حاضر باهدف کاربرد تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲ در بهبود دقت مدل SWAP برای شبیه‌سازی عملکرد برنج رقم هاشمی در یکی از مزارع تحقیقاتی مؤسسه برنج کشور انجام شد. بدین منظور شاخص‌های گیاهی LAI، NDVI و SAVI برای دوره رشد گیاه برنج از تصاویر ماهواره‌ای استخراج شدند. همچنین شاخص سطح برگ به‌طور مستقیم و هفتگی در سطح مزرعه اندازه‌گیری و با شاخص‌های استخراجی از تصاویر ماهواره‌ای جهت ارائه بهترین معادله برای تخمین مقدار ماده خشک مقایسه شد. سپس با استفاده از معادله رگرسیون خطی چند متغیره مقدار ماده خشک از تصاویر ماهواره‌ای برآورد و در مدل SWAP به‌عنوان پارامتر ورودی داده شد. در نهایت عملکرد اندازه‌گیری شده با مقادیر شبیه‌سازی توسط مدل SWAP با و بدون استفاده از تصاویر ماهواره‌ای مقایسه شد. نتایج نشان داد خطای مدل در حالتی که مقدار ماده خشک اندازه‌گیری شده به‌عنوان ورودی مدل در نظر گرفته شد ۳/۹۳ درصد معادل ۳۹۶/۸۸ کیلوگرم بر هکتار بوده و مدل از دقت قابل قبولی ($R^2 = 0.95$) برخوردار بوده است. لیکن زمانی که مقدار ماده خشک برآورد شده از تصاویر ماهواره‌ای به‌عنوان ورودی مدل داده شد، مدل مقدار عملکرد شلتوک را با ضریب تبیین برابر با ۰/۹۹ و خطای ۲/۰۴ درصد معادل ۲۴۱/۲۰ کیلوگرم بر هکتار شبیه‌سازی کرد. در نهایت بر اساس نتایج به‌دست آمده به‌روزرسانی مدل SWAP با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سبب بهبود دقت شبیه‌سازی شده و مدل با دقت بالاتری توانست عملکرد برنج را شبیه‌سازی کند.

واژه‌های کلیدی: سنجش‌ازدور، شاخص‌های گیاهی، شبیه‌سازی، ماده خشک گیاه

مقدمه

غذای اصلی بیش از نیمی از مردم جهان به‌ویژه کشورهای درحال توسعه را تشکیل می‌دهد (FAO, 2017). سطح زیر کشت برنج در ایران حدود ۶۲۲۹۹۱ هکتار است. در استان گیلان در سال زراعی ۹۷-۹۶ سطح زیر کشت برنج ۲۲۰۰۰۰ هکتار با میزان تولید ۱۰۹۳۶۶۵ تن و عملکرد ۴۹۷۱ کیلوگرم در هکتار بوده است (بی‌نام، ۱۳۹۸). اگرچه در کشور ایران، کشت برنج دارای اهمیت زیادی است لیکن در سال‌های اخیر به علت بروز کم‌آبی و کاهش کیفیت آب‌های مورد استفاده کشت برنج در معرض خطر قرار گرفته است (Saadat & Homae, 2015). پیش‌بینی عملکرد گیاه پیش از برداشت با استفاده از فناوری سنجش‌ازدور در بسیاری از تصمیم‌گیری‌های کشاورزی

گیاه برنج (*Oryza sativa* L.) پس از گندم دومین محصول عمده زراعی از نظر سطح زیر کشت در جهان بوده که

^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: Email: 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

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۱/۲۲

همچنین در تحقیقی زرات-ولدرز و همکاران با استفاده از شاخص‌های گیاهی، شاخص سطح برگ گیاه بادام را توسط دستگاه Accupar تخمین زدند و به این نتیجه رسیدند که همبستگی بالایی بین شاخص سطح برگ برآورد شده و اندازه‌گیری شده وجود دارد (Zarate-Valdez et al., 2012). شاخص تفاضل نرمال‌شده‌ی پوشش گیاهی (NDVI) از پرکاربردترین نمونه‌های محاسبات بانندی است که به‌منظور محاسبه درصد پوشش گیاهی و وضعیت سبزیگی یک منطقه طی دوره‌های مختلف رشدی به کار می‌رود و نشانه شدت و ضعف پوشش گیاهی در یک منطقه می‌باشد (رابطه ۱). مقدار این شاخص بین -۱ تا +۱ متغیر بوده که هر چه به ۱ نزدیک‌تر باشد بیانگر پوشش گیاهی بیشتر و متراکم‌تر است (علی‌آبادی و همکاران، ۱۳۹۳).

$$NDVI = \frac{p_{nir} - p_{red}}{p_{nir} + p_{red}} \quad (1)$$

که در آن p_{nir} و p_{red} به ترتیب مقادیر مربوط به باند قرمز و مادون قرمز نزدیک است.

در برخی مطالعات با کاربرد هم‌زمان سنجش‌ازدور و مدل‌های عددی، عملکرد گیاه به‌خوبی برآورد شده است (Leon et al., 2003). طبق نتایج به‌دست‌آمده در جنوب اسپانیا استفاده از شاخص NDVI بهتر از LAI توانست عملکرد گیاهی را تخمین بزند (Padilla et al., 2012). شاخص تعدیل‌شده پوشش گیاهی برای خاک (SAVI)، همان شاخص تصحیح‌شده‌ی NDVI است. این شاخص اولین بار توسط هوته در سال ۱۹۸۸ ارائه شد و هدف از محاسبه آن به حداقل رساندن اثرات خاک پس‌زمینه بر روی سیگنال‌های پوشش گیاهی به‌وسیله ترکیب کردن فاکتور تنظیم‌کننده خاک (L) با معادله NDVI است (Huete., 1988). این شاخص که از رابطه ۲ به‌دست می‌آید، اثرات خاک زمینه و رطوبت خاک را در شاخص NDVI کاهش می‌دهد.

$$SAVI = \frac{(P_{nir} - P_{red})}{(P_{nir} + P_{red} + L)} (1 + L) \quad (2)$$

سودمند است (Noureldin et al., 2013). با استفاده از علم سنجش‌ازدور می‌توان از تصاویر ماهواره‌ای اطلاعات مربوط به خاک، شرایط رشد گیاه و محصول را استخراج نمود (بابائیان و همکاران، ۱۳۹۲). با داشتن این اطلاعات می‌توان انواع تنش‌های محیطی و خسارت‌های ناشی از آن‌ها را که در بهره‌وری و عملکرد محصولات مؤثر هستند شناسایی و کنترل کرد (نوروزی و همکاران، ۱۳۹۲). بدین منظور پژوهشگران از شاخص‌های گیاهی مختلف استفاده می‌کنند که برخی از مهم‌ترین آن‌ها شاخص سطح برگ (LAI)، شاخص تفاضل نرمال‌شده‌ی پوشش گیاهی (NDVI) و شاخص تعدیل‌شده‌ی گیاهی برای خاک (SAVI) است.

ماهواره سنتینل ۲ ماهواره‌ای مدار قطبی با دوره بازگشت ۵ روزه و دارای ۱۳ باند طیفی در محدوده‌های مرئی، مادون قرمز نزدیک و مادون قرمز طول موج کوتاه با توان تفکیک مکانی ۱۰، ۲۰ و ۶۰ متری بوده که شامل دو ماهواره A و B می‌باشد.

شاخص سطح برگ (LAI) کمیته بدون واحد بوده که به‌عنوان سطح کل برگ گیاه در واحد سطح زمین تعریف‌شده (Comba et al., 2020) و یکی از متغیرهای کلیدی است که برای مطالعات گیاهی مانند عملکرد، رشد گیاه، جذب نور، تبخیر-تعرق و همچنین پاسخ گیاه به کودها و آبیاری به کار می‌رود (Liu et al., 2015). محاسبه دقیق شاخص LAI سبب افزایش دقت برآورد عملکرد، تبخیر-تعرق و زیست‌توده گیاهی از طریق سنجش‌ازدور و مدل‌سازی می‌شود (رضایی و همکاران، ۱۳۹۵). هرچند مطالعات صحرائی نتایج قابل قبولی ارائه می‌دهد لیکن به دلیل محدودیت‌های اجرایی و تعداد بالای نمونه‌های آزمایشی، این کار هزینه‌بر و زمان‌بر بوده و استفاده از مدل‌های شبیه‌ساز می‌تواند جایگزین مناسبی برای مشکلات ناشی از مطالعات میدانی باشد. در تحقیقی که بخشنده و همکاران (۱۳۹۰)، با استفاده از دستگاه AccuPAR انجام دادند شاخص سطح برگ را برای گیاه گندم با استفاده از دو روش مستقیم (نمونه‌گیری تخریبی) و غیرمستقیم اندازه‌گیری کردند. نتایج نشان داد که بین روش مستقیم و غیرمستقیم از نظر ضرایب معادله اختلاف معنی‌داری وجود ندارد.

توجه به اینکه کشت برنج در شمال کشور از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، پژوهش حاضر باهدف مقایسه عملکرد اندازه‌گیری شده برنج رقم هاشمی با مقادیر شبیه‌سازی شده توسط مدل SWAP با و بدون استفاده از تصاویر ماهواره‌ای انجام شد. در نهایت کاربرد تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲ در بهبود دقت شبیه‌سازی مدل SWAP مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

مشخصات منطقه پژوهش

پژوهش حاضر در یکی از مزارع شالیزاری به مساحت تقریبی ۴۹۶۴ مترمربع در مؤسسه تحقیقات برنج کشور واقع در شهر رشت با موقعیت جغرافیایی بین طول شرقی ۳۰° ۳۸' ۴۹ تا ۳۳° ۳۸' ۴۹ و عرض شمالی ۱۳° ۱۲' ۳۷ تا ۱۵° ۱۲' ۳۷ و ارتفاع تقریبی ۲۴ متر پایین‌تر از سطح دریا در سال ۱۳۹۷ طراحی و اجرا شد. رقم برنج مورد استفاده در این پژوهش رقم هاشمی بود. پس از آماده‌سازی زمین به صورت دستی در تاریخ ۲۷ اردیبهشت‌ماه نشاءها به زمین منتقل و نشاکاری بافاصله کاشت ۲۵ سانتی‌متر انجام شد. نمونه‌گیری از گیاه به‌منظور اندازه‌گیری مقدار عملکرد اندام‌های مختلف گیاه برنج (ریشه، ساقه، برگ و شلتوک) در زمین مورد مطالعه در دو تکرار به صورت کاملاً تصادفی طی فصل رشد انجام شد. در تاریخ ۱۷/۵/۹۷ برنج مزرعه پژوهشی به مرحله رسیدگی رسید و در تاریخ ۲۷/۵/۹۷ اقدام به برداشت محصول برنج شد. پیش از برداشت محصول، برای بررسی عملکرد برنج تولیدشده اقدام به نمونه‌برداری از ۵ گوشه مختلف زمین با استفاده از کوادرات با ابعاد ۱ مترمربع شد. نمونه‌برداری از مناطقی انجام شد که بیش‌ترین مقدار تراکم پوشش گیاهی را در مزرعه مورد مطالعه داشتند. مکان هندسی نقاط نمونه‌برداری در محیط ARC GIS 10.6 با تعریف یک فضای مجازی متناسب با سیستم حقیقی زمین، مشخص شدند (شکل ۱). روند کلی انجام پژوهش نیز در شکل ۲ ارائه شده است.

که در آن L فاکتور تصحیح بدون بعد است. مقدار این پارامتر برای پوشش گیاهی متراکم، متوسط و ضعیف به ترتیب ۰، ۰/۵ و ۱ است.

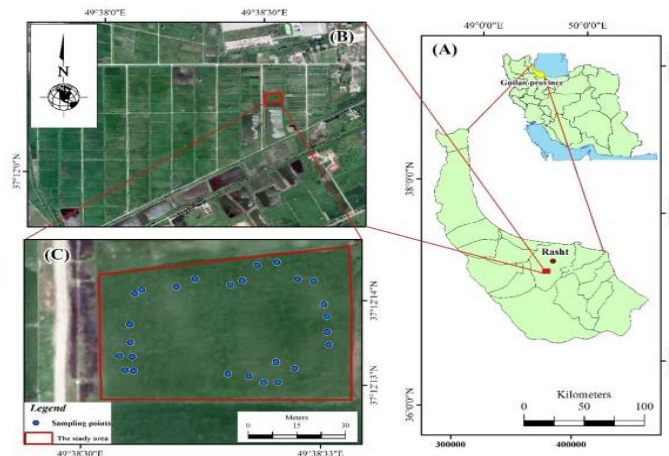
نتایج تحقیقات امینی‌بازبانی و همکاران (۱۳۹۳) حاکی از آن است که با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و سنجش‌ازدور می‌توان نیاز واقعی آب گیاه را که متأثر از سطح کشت واقعی و الگوی کشت است، تعیین کرد. بینگ‌بین و با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای مادیس و لندست در شرایط اقلیمی سرد عملکرد محصول برنج را با استفاده از شاخص سطح برگ برآورد کردند و به این نتیجه دست یافتند که عملکرد برنج در شرایط سرد کمی کمتر از شرایط اقلیمی مرطوب می‌باشد همکاران (Yingbin et al., 2010).

با توجه به اینکه میزان عملکرد محصول به اثرات متقابل بین خاک، آب، گیاه و اتمسفر بستگی دارد، مدل‌های شبیه‌ساز رشد گیاه تغییرات عملکرد محصول ناشی از تغییرات این عوامل را به‌خوبی نشان می‌دهند. 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 اندازه‌گیری مزرعه‌ای انجام می‌دهد. 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 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 چند دهه گذشته استفاده از مدل‌های آگروهیدرولوژیک متعدد به‌منظور شبیه‌سازی رشد و عملکرد گیاهان در مناطق مختلف ایران مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند و نتایج مطلوبی در مقایسه با آزمایش‌های صحرایی داشته است. با

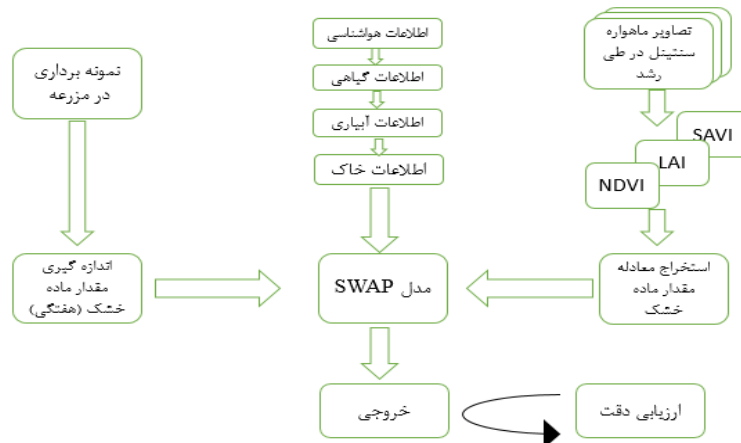
محاسبه شاخص سطح برگ

به منظور اندازه‌گیری شاخص سطح برگ، برداشت گیاه طی مرحله رشد به صورت هفتگی و در دو تکرار با چارچوب استاندارد ۰/۵ متر در ۰/۵ متر انجام شد. برای جلوگیری از لوله شدن و کاهش سطح برگ، نمونه‌گیری در ساعات اولیه روز انجام و نمونه‌ها در داخل سطل آب قرار گرفته و بلافاصله به آزمایشگاه

منتقل شدند. مقدار سطح برگ متعلق به هر چارچوب استاندارد با استفاده از دستگاه سطح برگ مدل lai-2000LiCOR برحسب سانتی‌متر مربع به دست آمد و با تبدیل آن به مترمربع و تقسیم بر مساحت سطح سایه‌انداز شش بوته (ابعاد چارچوب استاندارد)، شاخص سطح برگ محاسبه شد.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی مزرعه مورد آزمایش و نقاط نمونه‌برداری در مؤسسه تحقیقات برنج کشور



شکل ۲- نمای کلی روند انجام پژوهش حاضر

تهیه و جهت انجام تصحیحات هندسی و رادیومتریک و در نهایت استخراج شاخص‌های پوشش‌های گیاهی وارد محیط نرم‌افزار ENVI 5.3 شده و شاخص‌های پوشش گیاهی شامل LAI، NDVI و SAVI استخراج شدند. تاریخ اخذ تصاویر مورد

استخراج شاخص‌های گیاهی از تصاویر ماهواره‌ای

سنسینل ۲

در این پژوهش تصاویر ماهواره‌ای سنسینل ۲ برای مراحل مختلف رشد از پایگاه داده <https://scihub.copernicus.eu>

جهت استخراج مقادیر Digital Number (DN) شاخص‌های به‌دست‌آمده کلیه لایه‌ها به سیستم مختصات UTM-ZONE 39 انتقال داده‌شده و GIS Ready شدند. سپس مقادیر شاخص سطح برگ در نقاط نمونه‌برداری با استفاده از نرم‌افزار ArcMap 10.6.1 استخراج شدند.

استفاده و نیز زمان نمونه‌برداری از مزرعه در جدول ۱ 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

جدول ۱- تاریخ نمونه‌برداری از مزرعه و تصاویر مورد استفاده در استخراج شاخص‌های گیاهی

شماره تصویر	تاریخ نمونه‌برداری از مزرعه	مراحل رشد برنج	تاریخ اخذ تصویر	مختصات جغرافیایی نمونه‌برداری (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، ۴۱۱۸۳۳۴
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، ۴۱۱۸۳۳۸
۱۰	۱۳۹۷/۰۵/۲۰	رسیدگی	۱۳۹۷/۰۵/۲۳	۳۷۹۵۳۴، ۴۱۱۸۳۶۱

در جدول ۲ ارائه شده است. پس از اینکه اطلاعات مورد نیاز برای مدل RETC فراهم شد، پارامترهای هیدرولیکی مورد نیاز برای زیر مدل خاکی مدل SWAP برای هر لایه از خاک مزرعه مورد پژوهش با استفاده از نرم‌افزار RETC محاسبه شد (جدول ۳).

ورودی و خروجی‌های مدل SWAP

داده‌های مورد نیاز در مدل شبیه‌ساز SWAP شامل اطلاعات خاک، آبیاری، پارامترهای گیاهی و داده‌های هواشناسی است. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی اندازه‌گیری شده در خاک شالیزار مورد مطالعه شامل درصد اجزای تشکیل‌دهنده خاک، ماده آلی و جرم ویژه ظاهری خاک بوده که

جدول ۲- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی مورد نیاز برای محاسبه پارامترهای هیدرولیکی خاک مزرعه

عمق خاک (سانتی‌متر)	بافت خاک	شن	سیلت	رس	ماده آلی	جرم ویژه ظاهری (گرم بر سانتی‌متر مکعب)
۰-۱۰	رسی	۱۴	۳۹	۴۷	۱/۷۲	۱/۱۰
۱۰-۲۰	رسی	۱۷	۳۹	۴۴	۱/۵۴	۱/۲۰
۲۰-۳۰	رسی سیلتی	۹	۴۴	۴۷	۱/۲۵	۱/۳۲

جدول ۳- پارامترهای هیدرولیکی برآورد شده توسط مدل RETC

عمق لایه خاک	رطوبت باقی مانده	رطوبت اشباع	هدایت هیدرولیکی اشباع	پارامتر n در مدل ون گنوختن	پارامتر α در مدل ون گنوختن
(سانتی متر)			(سانتی متر بر روز)		(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

مقدار شوری آب آبیاری نیز ۱/۶۱ دسی‌زیمنس بر متر بود. تقویم آبیاری در شکل ۳ ارائه شده است.

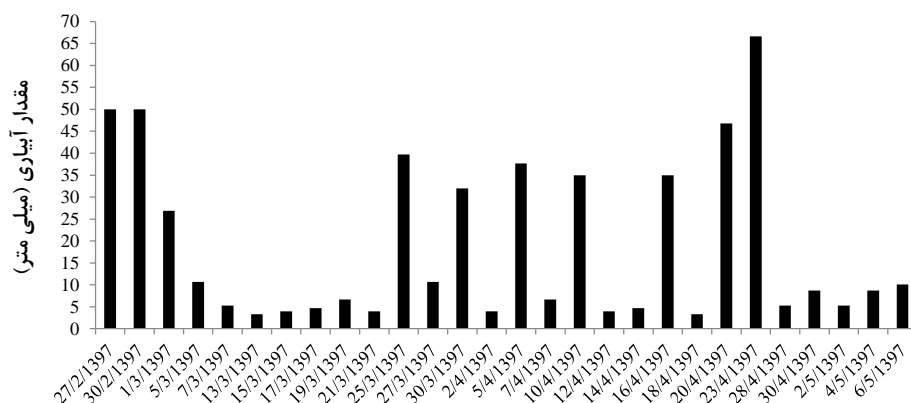
داده‌های هواشناسی با گام زمانی روزانه منطقه شامل تابش خورشیدی، دمای کمینه و بیشینه روزانه، درصد رطوبت نسبی، بارندگی، میانگین سرعت باد در ارتفاع ۲ متری و تبخیر-تعرق مرجع می‌باشد که در پژوهش حاضر این پارامترها از ایستگاه سینوپتیک مرکز تحقیقات هواشناسی کشاورزی رشت (مجاور مؤسسه تحقیقات برنج کشور)، به‌عنوان نزدیک‌ترین و قابل اعتمادترین ایستگاه هواشناسی دریافت شد. میزان تابش روزانه نور خورشید با استفاده از مدل آنگستروم و داده‌های ساعات آفتابی محاسبه گردید. میانگین ماهانه اطلاعات مذکور برای دوره رشد برنج در سال زراعی مورد آزمایش در جدول ۵ ارائه شده است.

داده‌های گیاهی شامل تاریخ کاشت، گل‌دهی و رسیدگی محصول به‌ترتیب تاریخ‌های ۹۷/۰۲/۲۷، ۹۷/۰۴/۱۳ و ۹۷/۰۵/۱۷، 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، شاخص سطح برگ که به‌صورت هفتگی اندازه‌گیری شد، وزن تر و خشک اجزای گیاه (ساقه، برگ، ریشه و خوشه) و ارتفاع گیاه در فواصل ۶ روزه در مراحل مختلف رشد گیاه است. خلاصه این اطلاعات در جدول ۴ ارائه شده است.

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، مدت‌زمان هر آبیاری و مدت‌زمان غرقاب مزرعه است. در پژوهش حاضر فواصل آبیاری پس از کاهش مقدار آب به‌اندازه ۲ سانتی‌متر از سطح خاک بوده و

جدول ۴- خلاصه اطلاعات گیاهی طی دوره رشد برنج

مرحله رشد گیاه	تاریخ	LAI	ارتفاع گیاه (سانتی‌متر)	وزن خشک اجزای گیاه (کیلوگرم بر هکتار)		
				ریشه	ساقه	برگ
کاشت	۹۷/۰۲/۲۷	۰/۰۵۵	۳۰/۵۰	۱۴/۴۳	۲۶/۲۲	۴/۶۷
پنجه‌زنی	۹۷/۰۳/۰۸	۱/۱۹۴	۳۸/۲۰	۶۰/۷۰	۵۰/۶۷	۷۰/۰۰
گل‌دهی	۹۷/۰۴/۱۳	۲/۲۲۲	۴۲/۰۰	۶۵/۰۰	۱۰۱/۵۰	۷۰/۰۰
خوشه‌دهی	۹۷/۰۴/۲۰	۱/۸۸۳	۱۴۸/۰۰	۴۵۶/۵	۱۷۴۳/۰۰	۷۲۴/۶۷
رسیدگی	۹۷/۰۵/۱۷	۰/۶۴۹	۱۶۱/۰۰	۷۹۱/۴	۴۰۰۳/۰۰	۱۰۲۹/۶۲



شکل ۳- مقدار و زمان آبیاری در پژوهش حاضر

جدول ۵- میانگین داده‌های هواشناسی برای دوره رشد برنج در منطقه مورد مطالعه در سال زراعی ۱۳۹۷

ماه	تابش خورشیدی (کیلوژول بر مترمربع بر روز)	دمای کمینه (درجه سانتی‌گراد)	دمای بیشینه (درجه سانتی‌گراد)	حداقل رطوبت نسبی (درصد)	حداکثر رطوبت نسبی (درصد)	میانگین سرعت باد در ارتفاع ۲ متری (متر بر ثانیه)	بارندگی (میلی‌متر)	تبخیر-تعرق مرجع (میلی‌متر)
اردیبهشت	۱۶۱۴۱/۵	۱۴/۲	۲۴/۵۱	۵۴/۶۷	۹۲/۴۸	۱/۹۷	۳۷/۲	۱۰۶/۰۶
خرداد	۱۹۹۱۲/۳	۱۸/۲	۲۷/۸۷	۵۵/۹۶	۹۳/۱۶	۲/۰۲	۴۸/۷	۱۳۱/۹۵
تیر	۲۲۵۰۴/۸	۲۲/۹۵	۳۳/۳۳	۵۳/۳۲	۹۱/۷۴	۲/۰۳	۳۰/۸	۱۶۳/۴۱
مرداد	۱۵۸۲۳/۰	۲۲/۷۸	۳۱/۳۹	۶۰/۲۶	۹۳/۲۰	۲/۰۸	۶۸/۳	۱۱۴/۸۰

واسنجی مدل

برای استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی تحلیل حساسیت، واسنجی و صحت‌یابی مدل ضروری می‌باشد. عمل واسنجی و صحت‌سنجی بر اساس مقادیر اندازه‌گیری شده عملکرد شلتوک، بیوماس کل و مقدار ماده خشک طی 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. با یک تخمین اولیه از پارامترهای حساس، مدل SWAP کالیبره و سپس با پارامترهای گیاهی و خاکی مشاهداتی مقایسه شد. به منظور 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 با مشاهدات صحرائی پارامتر عملکرد محصول برنج مقایسه گردید و از ضرایب واسنجی شده آن برای کالیبراسیون مدل SWAP استفاده شد. این پارامترها طوری تعیین شدند که نتایج شبیه‌سازی مدل، کمترین خطا و بیش‌ترین سازگاری را با مقادیر اندازه‌گیری شده در مزرعه داشته باشند (جدول ۶).

به منظور ارزیابی و مقایسه مقدار ماده خشک و عملکرد شلتوک اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده با مدل SWAP و

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

که در آن‌ها p_i و O_i به ترتیب مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده، n تعداد نمونه‌ها و \bar{O} و \bar{P} میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده است. جهت انجام پردازش‌های لازم و محاسبات بر روی تصاویر ماهواره‌ای از نرم‌افزار ENVI 5.3 و برای تهیه و استخراج نقشه‌های موردنیاز از نرم‌افزار ArcMap10.6.1 استفاده شد. همچنین برای استخراج ضرایب هیدرولیکی خاک از نرم‌افزار RETC و برای انجام محاسبات آماری و ترسیم گراف و نمودارها از نرم‌افزار Excel 2010 استفاده شد.

بدون استفاده از تصاویر ماهواره‌ای از آماره‌های R^2 (ضریب تبیین)، RMSE (ریشه میانگین مربع خطا)، nRMSE (ریشه میانگین مربع خطای نرمال شده) و EF (کارایی مدل) استفاده شد (صدوقی و همکاران، ۱۳۹۵). بیان ریاضی این آماره‌ها به شرح زیر است.

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \right]^2 \quad (۳)$$

$$RMSE = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right)^{0.5} \quad (۴)$$

$$nRMSE = \frac{\left(\frac{100 \times \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right)^{0.5}}{\bar{O}} \quad (۵)$$

جدول ۶- 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
۰/۰۰۱ - 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

نتایج و بحث

مقدار ماده خشک اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده با مدل SWAP طی دوره رشد در شکل ۴ نشان داده شده است. با توجه به وزن ماده خشک به دست آمده از مدل SWAP و مقایسه آن با مقدار اندازه‌گیری شده طی دوره رشد می‌توان نتیجه گرفت که مدل با دقت بالا و ضریب تبیین برابر با ۰/۹۸ و ۰/۹۲ به ترتیب برای مرحله رویشی و زایشی، مقدار ماده خشک را تخمین زده و همبستگی بین داده‌های اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده بالا بوده است. همچنین مدل در مرحله رسیدگی نیز با دقت قابل قبولی ($R^2=0/82$) مقدار ماده خشک را تخمین زده است (شکل ۴-ب).

در این پژوهش عملکرد شلتوک شبیه‌سازی شده با استفاده از مدل SWAP در دو حالت استفاده از مقدار ماده خشک اندازه‌گیری شده در زمین و مقدار ماده خشک هفتگی برآورد شده از تصاویر ماهواره سنتینل ۲ به عنوان ورودی مدل SWAP بررسی و سپس با عملکرد اندازه‌گیری شده شلتوک در زمان برداشت مقایسه شد. با توجه به تغییرات عوامل متعدد در شرایط مزرعه‌ای، به‌طور کلی، نتایج شبیه‌سازی عملکرد با توجه به واسنجی مدل SWAP، مطلوب بوده است.

مقایسه ماده خشک اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی

شده با مدل SWAP

۵/۹۳ توانسته مقدار ماده خشک را با دقت بالا تخمین بزند (جدول ۷). نتایج پژوهش امیری و شیرشاهی (۱۳۹۶) نیز برای شبیه‌سازی عملکرد و کارایی مصرف آب ذرت با استفاده از مدل SWAP در شیراز نشان داد که در حالت کلی دقت این مدل برای شبیه‌سازی پارامترهای موردنظر قابل قبول بود. پژوهش حاضر با نتایج مطالعات ون دام و مالیک (Van Dam and Malik, 2003) و سینگ (Singh, 2004) نیز که مناسب بودن مدل SWAP را در شبیه‌سازی بیوماس کل و پانیکول نشان دادند، هم‌راستا بوده است.

جدول ۷- آماره‌های محاسبه‌شده برای ارزیابی وزن ماده خشک اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده توسط مدل SWAP بدون استفاده از تصاویر ماهواره‌ای

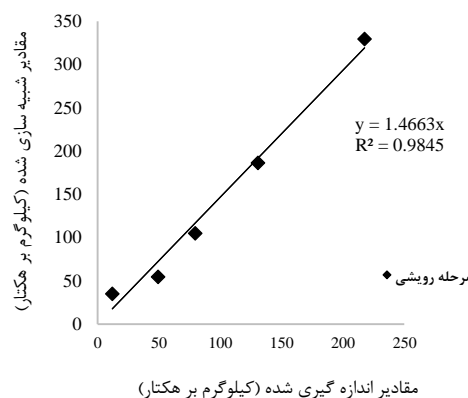
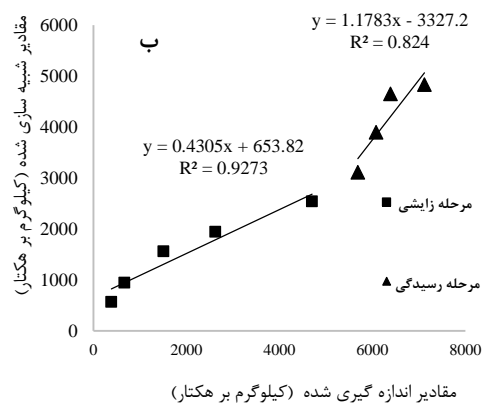
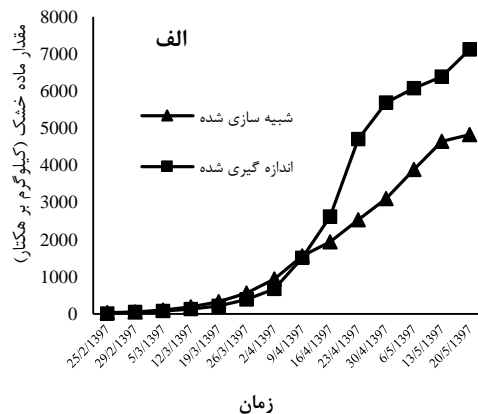
مرحله رشد	RMSE	nRMSE	EF	R ²
	(کیلوگرم بر هکتار)	(درصد)		
رویشی	۱۵/۴۱	۵/۹۳	۰/۹۹	۰/۹۸
زایشی	۳۲۹/۲۹	۵/۲۰	۰/۹۸	۰/۹۲
رسیدگی	۱۰۶۵/۷۲	۳/۰۷	۰/۹۷	۰/۸۲

برآورد ماده خشک با استفاده از معادله شاخص‌های

گیاهی برآورد شده از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲

به‌منظور ارائه معادله‌ای برای تخمین مقدار ماده خشک از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲ از شاخص‌های گیاهی LAI، NDVI و SAVI استفاده شد. در ابتدا رابطه بین مقادیر برآورد شده هرکدام از شاخص‌های گیاهی نسبت به ماده خشک اندازه‌گیری شده مورد ارزیابی قرار گرفت (شکل ۵). بر اساس نتایج به‌دست آمده در ابتدای رشد برنج، مقدار شاخص سطح برگ برآورد شده کم بوده و با افزایش زمان در دوره رشد مقدار آن افزایش یافته و به مقدار بیشینه خود رسیده و هنگام پر شدن دانه‌ها سطح برگ نیز کاهش یافت که با نتایج رضایی و همکاران (۱۳۹۵) همخوانی داشت.

با توجه به رابطه غیرخطی که بین مقدار ماده خشک و شاخص‌های گیاهی برآورد شده از تصاویر سنتینل ۲ وجود داشته (شکل ۵)، معادله رگرسیون خطی چند متغیره (Multivariate



شکل ۴- مقایسه مقدار ماده خشک اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده با مدل SWAP بدون استفاده از تصاویر ماهواره‌ای (الف) و همبستگی بین آن‌ها در مراحل مختلف رشد (ب)

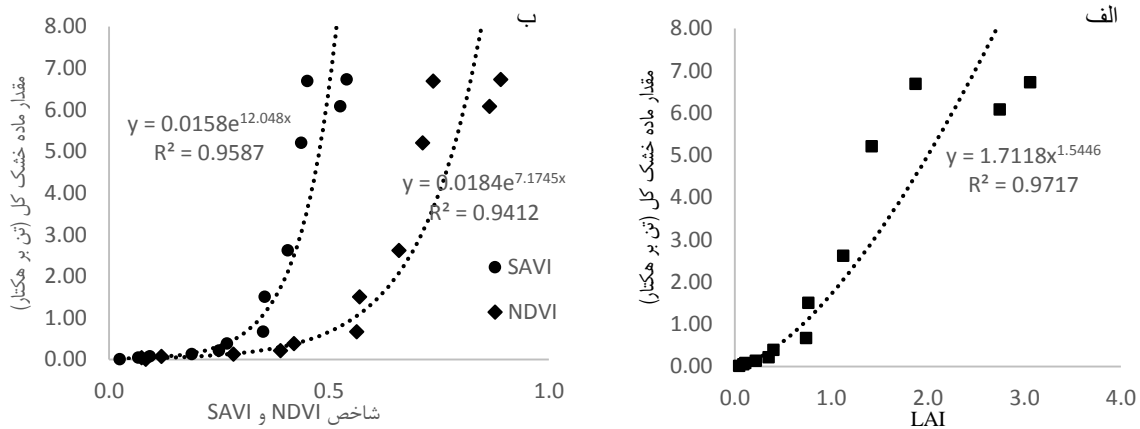
نتایج حاصل از آنالیز شاخص‌های آماری وزن ماده خشک شبیه‌سازی شده با مدل نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده در مزرعه نیز بیانگر آن است که در مرحله رویشی مدل بهترین دقت را داشته و با مقدار RMSE و nRMSE برابر با ۱۵/۴۱ و

همبستگی بالایی برخوردار بوده‌اند. همچنین بر اساس شاخص - های آماری محاسبه شده در هر سه مرحله رشدی، مدل توانسته با استفاده از اطلاعات تصاویر ماهواره‌ای که به‌عنوان ورودی مدل SWAP داده شده بود مقدار ماده خشک را با دقت بسیار بالا و خطای کم ($R^2 > 0.95$ و $nRMSE < 5$) شبیه‌سازی کند. همچنین، مقادیر EF نشان می‌دهد که مدل SWAP به‌روز شده با اطلاعات تصاویر ماهواره‌ای از کارایی بسیار خوبی برای شبیه‌سازی ماده خشک برخوردار بوده است.

Linear Regression) زیر (معادله ۷) به‌دست آمد و مقدار ماده خشک طی دوره رشد برنج محاسبه شد.

$$\text{Total dry mass (ton/ha)} = \exp((0.152+0.52) \times (\text{LAI}+5.63) \times (\text{NDVI}-10.93) \times \text{SAVI}) \quad (7)$$

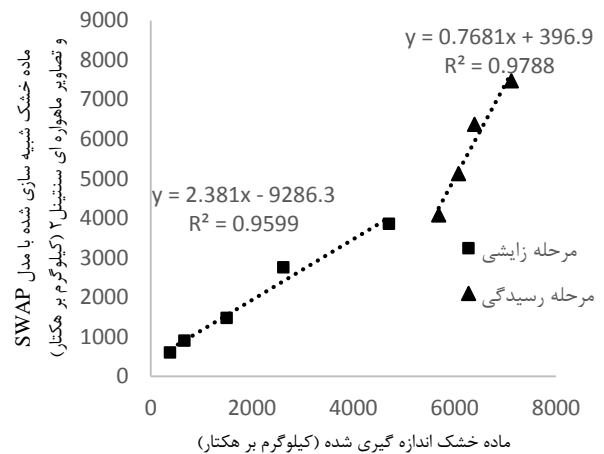
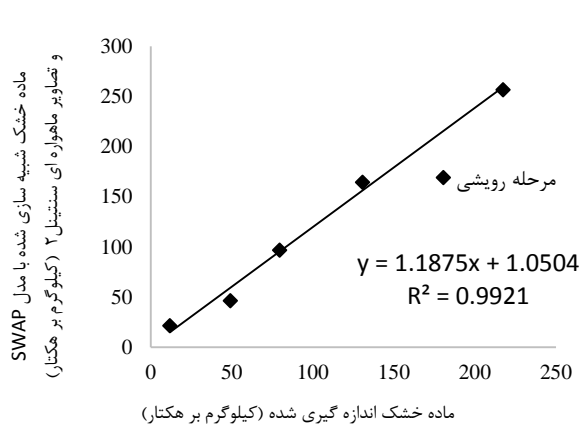
سپس مقادیر ماده خشک شبیه‌سازی شده توسط مدل با استفاده از اطلاعات تصاویر ماهواره‌ای نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده مورد ارزیابی قرار گرفت. همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده از



شکل ۵- رابطه بین مقدار ماده خشک اندازه‌گیری شده با LAI (الف) و NDVI و SAVI (ب) برآورد شده از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲ طی دوره رشد

جدول ۸- آماره‌های محاسبه شده برای ارزیابی وزن ماده خشک اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده توسط مدل SWAP با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای

مرحله رشد	RMSE	nRMSE	EF	R ²
	(کیلوگرم بر هکتار)	(درصد)		
رویشی	۲۷/۲۵	۳/۵۹	۰/۹۹	۰/۹۹
زایشی	۳۱۸/۱۶	۴/۰۹	۰/۹۸	۰/۹۵
رسیدگی	۸۹۶/۴۴	۱/۴۱	۰/۹۹	۰/۹۷



شکل ۶- رابطه بین مقدار ماده خشک اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی توسط مدل SWAP با استفاده از اطلاعات تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲

داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده عملکرد و کارایی مصرف آب برنج با استفاده از مدل SWAP را به ترتیب برابر با ۰/۷۰ و ۰/۹۰ به دست آوردند. در تحقیق دیگری به منظور ارزیابی دقت مدل SWAP در برآورد عملکرد برنج، نتایج نشان داد که همبستگی بسیار بالایی ($R^2 > 0.9$) بین داده‌های اجزای عملکرد اندازه‌گیری شده برنج (ساقه، ریشه، برگ و شلتوک) و شبیه‌سازی شده با مدل SWAP وجود داشت (پندی و همکاران، ۱۳۹۸).

در پژوهش حاضر مقدار عملکرد نهایی شلتوک که در سطح زمین به صورت مستقیم اندازه‌گیری شد ۴۱۹۷/۲۰ و مقدار عملکرد شبیه‌سازی شده در دو حالت با و بدون استفاده از تصاویر ماهواره‌ای به ترتیب ۴۰۸۲/۰۰ و ۳۶۹۷/۰۰ کیلوگرم بر هکتار به دست آمد.

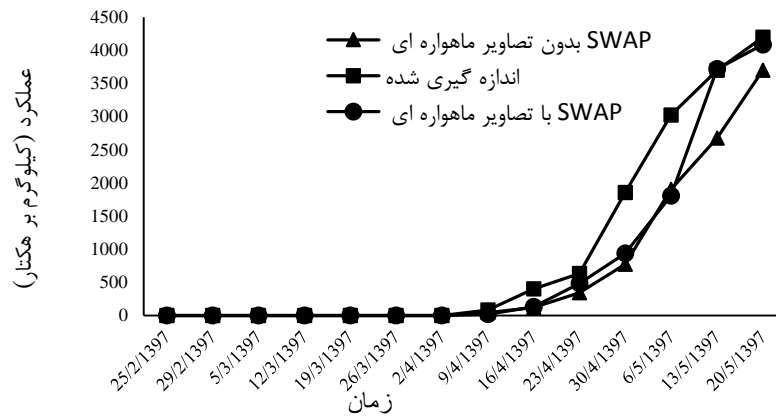
مقایسه عملکرد شلتوک اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده توسط مدل SWAP با و بدون استفاده از تصاویر ماهواره‌ای

مقادیر عملکرد اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده توسط مدل SWAP با و بدون استفاده از اطلاعات تصاویر ماهواره‌ای طی دوره رشد گیاه در شکل ۷ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقادیر شبیه‌سازی شده بدون استفاده از تصاویر ماهواره‌ای از دقت خوبی برخوردار بوده، لیکن بر اساس آماره‌های به دست آمده شبیه‌سازی عملکرد مدل SWAP با استفاده از اطلاعات مقدار ماده خشک برآورد شده از تصاویر ماهواره‌ای به عنوان ورودی مدل از دقت بالاتری برخوردار بوده است (جدول ۹).

موسوی و همکاران (۱۳۹۸) در پژوهشی همبستگی بین

جدول ۹- آماره‌های محاسبه شده برای ارزیابی دقت مدل SWAP در شبیه‌سازی عملکرد برنج با و بدون استفاده از تصاویر ماهواره‌ای

عملکرد شبیه‌سازی شده با مدل SWAP	RMSE	nRMSE	R^2	EF
	(کیلوگرم بر هکتار)	(درصد)		
با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای	۲۴۱/۲۰	۲/۰۴	۰/۹۹	۰/۹۹
بدون استفاده از تصاویر ماهواره‌ای	۳۹۶/۸۸	۳/۹۳	۰/۹۵	۰/۹۸



شکل ۷- مقدار عملکرد شلتوک اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده توسط مدل SWAP با و بدون استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر کارایی مدل SWAP در شبیه‌سازی عملکرد شلتوک برنج در دو حالت اندازه‌گیری مستقیم ماده خشک در زمین و مقدار ماده خشک برآورد شده از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲ به‌عنوان ورودی مدل مورد بررسی قرار گرفت. ابتدا مدل SWAP با استفاده از پارامترهای فیزیکی که به‌طور مستقیم اندازه‌گیری شدند، مقدار عملکرد نهایی (شلتوک) را با دقت بالا و R^2 برابر با ۰/۹۵ و RMSE برابر با ۳۹۶/۸۸ کیلوگرم بر هکتار شبیه‌سازی کرد. سپس با ارائه بهترین و مناسب‌ترین معادله، مقدار ماده خشک از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲ باهدف صرفه‌جویی در زمان و هزینه و نیز بدون ورود به مزرعه برای نمونه‌برداری از گیاه به‌دست آمد. نتایج نشان داد که استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲ برای شبیه‌سازی عملکرد نهایی شلتوک در مدل SWAP سبب بهبود دقت مدل شده و مدل توانست با دقت بالاتر ($R^2=0/99$) و ($RMSE=241/20$) و درصد خطای کمتری ($nRMSE=2/04$) عملکرد نهایی شلتوک را شبیه‌سازی کند. به‌طورکلی نتایج این مطالعه نشان داد تلفیق سنجش‌ازدور و مدل SWAP سبب بهبود دقت مدل در شبیه‌سازی شده و با کاهش خطای می‌توان عملکرد محصول را با دقت بالاتر و نزدیک‌تر به شرایط واقعی برآورد کرد. با توجه به اینکه داده‌های ماهواره‌ای با دقت بالا پارامترهای بیوفیزیکی نظیر شاخص سطح برگ و مقدار ماده خشک را برآورد می‌کنند، استفاده از این اطلاعات در مدل‌های

آماره R^2 بیانگر نسبت پراکندگی بین مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده است و بر این اساس همبستگی بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده توسط مدل SWAP با استفاده از اطلاعات تصاویر ماهواره‌ای بیشتر از حالت شبیه‌سازی بدون استفاده از تصاویر ماهواره‌ای بوده و درصد خطا نیز در آن کمتر است. همچنین بر اساس آماره EF کارایی مدل SWAP برای شبیه‌سازی عملکرد نهایی شلتوک در حالت استفاده از اطلاعات تصاویر ماهواره‌ای بیشتر از حالت شبیه‌سازی بدون استفاده از تصاویر ماهواره‌ای است. شیرشاهی و همکاران (۱۳۹۳) در تحقیقی به‌منظور برآورد عملکرد دانه و ارزیابی کارایی مصرف آب از مدل آگروهیدرولوژیک SWAP استفاده کردند. بر اساس شاخص‌های آماری محاسبه‌شده برای بازه ۱۰ ساله ۱۳۷۹ تا ۱۳۸۹ $RMSE$ و $nRMSE$ که به ترتیب ۲۳۴ کیلوگرم در هکتار و پنج درصد گزارش شد، مدل SWAP عملکرد محصول را با دقت قابل قبولی شبیه‌سازی کرد. در پژوهش دیگری به‌منظور بررسی دقت مدل SWAP در شبیه‌سازی شاخص سطح برگ و عملکرد برنج، نتایج نشان داد که مدل SWAP با $RMSE$ و R^2 برابر با ۰/۵۲ و ۰/۹۹ در مرحله واسنجی و مقادیر ۰/۱۵۷ و ۰/۹۸ در مرحله اعتبارسنجی قادر به شبیه‌سازی شاخص سطح برگ برنج رقم هاشمی در دشت آستانه-کوچصفهان بود (حیدریان خلیلی، ۱۳۹۶).

مدل SWAP در بخشی از شبکه آبیاری و زهکشی درودزن. نشریه پژوهش آب در کشاورزی. ۲۸ (۲): ۲۷۳-۲۸۳.

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.

علی‌آبادی، ک.، انتظاری، ع. و اسکندری، ن. ۱۳۹۳. تخمین پارامترهای فیزیکی (زی‌توده) پوشش گیاهی با استفاده از داده‌های سنجش‌ازدوری. مطالعات جغرافیایی مناطق خشک. ۱۵(۴): ۲۳-۳۳.

موسوی، س.ا.ح.، اگدرنژاد، ا. و گیلانی، ع. ۱۳۹۸. شبیه‌سازی عملکرد و کارایی مصرف آب ارقام مختلف برنج تحت شرایط مختلف کاشت با استفاده از دو مدل SWAP و AquaCrop. نشریه مدیریت آب در کشاورزی. ۶(۱): ۱۲۳-۱۳۴.

نوروزی، ع.ا.، جلالی، ن.، میری، م. و عباسی، م. ۱۳۹۲. برآورد شاخص سطح برگ گیاه برنج در شمال ایران. نشریه حفاظت منابع آب‌و خاک. ۳(۲): ۱-۱۰.

Comba, L., Biglia, A., Aimonino, D.R., Tortia, C., Mania, E., Guidoni, S. and Gay, P. 2020. Leaf Area Index evaluation in vineyards using 3D point clouds from UAV imagery. Precision Agriculture. 21(4): 881-896.

FAO, 2017. FAOSTAT. Statistical Databases. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <http://www.fao.org>.

Huete, A.R. 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). Remote sensing of environment. 25(3): 295-309.

Leon, C.T., Shaw, D.R., Cox, M.S., Abshire, M.J., Ward, B., Wardlaw, M.C. and Watson, C. 2003. Utility of remote sensing in predicting crop and soil characteristics. Precision Agriculture. 4(4): 359-384.

Liu, J., Sun, S., Wu, P., Wang, Y. and Zhao, X. 2015. Evaluation of crop production, trade, and consumption from the perspective of water resources: A case study of the Hetao irrigation district, China, for 1960-2010. Science of The Total Environment. 505: 1174-1181.

Noureldin, N., Aboelghar, M., Saudy, H. and Ali, A. 2013. Rice yield forecasting models using satellite imagery in Egypt. The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science. 16(1): 125-131.

شبیه‌سازی سبب بهبود دقت متغیرهای درونی در مدل می‌شود؛ بنابراین مدل‌های کالیبره شده و بروز رسانی شده در مدیریت بهتر فرایند تولید و عملکرد محصول ارجحیت داشته و در ارزیابی عملکرد محصول در مقیاس مزرعه‌ای کاربرد دارد.

منابع

امیری، ا. و شیرشاهی، ف. ۱۳۹۶. ارزیابی عکس‌العمل ذرت دانه‌ای به مدیریت کم‌آبیاری با استفاده از مدل SWAP. نشریه اکوفیزیولوژی گیاهان زراعی. ۱۱ (۴): ۷۷۴-۷۵۹. امینی بازبانی، س.، زارع ایبانه، ح. و اکبری، م. ۱۳۹۳. برآورد دما و شاخص پوشش گیاهی سطح زمین با استفاده از سنجش‌ازدور در دشت همدان. پژوهش‌های جغرافیایی طبیعی. ۴۶ (۳): ۳۳۳-۳۴۸.

بابائیان، ا.، همایی، م. و نوروزی، ع.ا. ۱۳۹۲. برآورد رطوبت خاک سطحی با استفاده از تصاویر رادار ENVISAT/ASTER. نشریه پژوهش آب در کشاورزی. ۲۷(۴): ۶۱۱-۶۲۲.

بی‌نام، ۱۳۹۸. آمارنامه کشاورزی سال ۱۳۹۶-۱۳۹۷ (جلد اول: محصولات زراعی). وزارت جهاد کشاورزی. ۹۵ صفحه.

بخشنده، ا.، سلطانی، ا. و غدیریان، ر. ۱۳۹۰. اندازه‌گیری شاخص سطح برگ با استفاده از دستگاه AccuPAR گندم. تولید گیاهی. ۱۸(۴): ۹۷-۱۰۲.

پندی، ح.، اسدی کپورچال، ص.، وظیفه‌دوست، م. و رضایی، م. ۱۳۹۸. ارزیابی دقت مدل SWAP در برآورد عملکرد برنج رقم هاشمی. شانزدهمین کنگره علوم خاک ایران. شهرپور، زنجان، ایران.

حیدریان خلیلی، م. ۱۳۹۶. بهینه‌سازی مدیریت آبیاری اراضی شالی‌زاری تحت شرایط شوری با استفاده از مدل SWAP و الگوریتم ژنتیک. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. گروه مهندسی آب. دانشگاه گیلان.

رضایی، م.، وظیفه‌دوست، م.، دواتگر، ن.، پیرمرادیان، 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.

شیرشاهی، ف.، بابازاده، ح.، کاوه، ف. و امیری، ا. ۱۳۹۳. ارزیابی کارایی مصرف آب و برآورد عملکرد گندم با استفاده از

- Padilla, F., Maas, S., González-Dugo, M., Mansilla, F., Rajan, N., Gavilán, P. and Domínguez, J. 2012. Monitoring regional wheat yield in Southern Spain using the GRAMI model and satellite imagery. *Field Crops Research*. 130: 145-154.
- Saadat, S. and Homae, M. 2015. Modeling sorghum response to irrigation water salinity at early growth stage. *Agricultural Water Management*. 152: 119-124.
- Singh, R. 2004. Simulation on direct and cyclic use of saline waters for sustaining cotton-wheat in a semi-arid area of north-west India", *Agricultural Water Management*. 66(2): 153-162.
- Van Dam, J.C. and Malik, R.S. 2003. Water productivity of irrigated crops in Sirsa district, India. Integration of remote sensing, crop and soil model and geographical information systems, WATPRO Final Report.
- Yingbin, H., Uchida, S., Huajun, T., Youqi, C. and Jia, L. 2010. Application of TERRA/MODIS images, TM images and weather data to assess the effect of cold damage on rice yield. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 3(2): 31-38.
- Zarate-Valdez, J.L., Whiting, M.L., Lampinen, B.D., Metcalf, S., Ustin, S.L. and Brown, P.H. 2012. Prediction of leaf area index in almonds by vegetation indices. *Computers and Electronics in Agriculture*. 85: 24-32.

Investigation the Effect of Observed and Estimated Dry Matter from Satellite Imagery on the Accuracy of Hashemi Rice Yield Simulation Using SWAP Model

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

Abstract

Predicting crop yields before harvest using simulation models and remote sensing technology is very important in sustainable agricultural management. The objective of this study was to use Sentinel 2 satellite images to improve the accuracy of SWAP model to simulate Hashemi rice yield in one of the research farms at the Rice Research Institute of Iran. For this purpose, LAI, NDVI and SAVI indices were derived from satellite images for growth period of plant. Also, leaf area index was measured directly and weekly at the field level and compared with indices derived from satellite images to provide the best equation for estimating the amount of dry matter. Then, using multivariate linear regression equation, the amount of dry matter was estimated from satellite images and given as the input parameter in the SWAP model. Finally, the measured yield was compared with the simulated values by the SWAP model with and without using satellite imagery. The results showed, when measured dry matter was as the model input, the error of model was 3.93% equal to 396.88 kg/ha and the model accuracy was acceptable ($R^2=0.95$). but when the estimated dry matter from the satellite imagery was modeled as input, the model simulated the yield value of paddy with R^2 equal to 0.99 and an error of 2.04% equal to 241.20 kg/ha. Finally, based on the obtained results, updating the SWAP model using satellite imagery improved the simulation accuracy and the model was able to simulate rice yield with higher accuracy.

Keywords: Dry Matter, Remote Sensing, Simulation, Vegetation Indices

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

Received: 31 December 2020

Accepted: 10 February 2021

