

ارزیابی مدل‌های ORYZA2000 و VSM در شبیه‌سازی عملکرد برنج تحت مدیریت‌های آبیاری

محمد رضا شبان^{۱*}، ابوطالب هزار جریبی^۲، محمد اسماعیل اسدی^۳ و خلیل قربانی^۴

چکیده

رشد بی‌سابقه تقاضا برای مصرف آب در بخش‌های صنعتی و شرب و کاهش میزان آب قابل استفاده در بخش کشاورزی موجب کاهش استفاده از آب در تولید برنج و در نتیجه تهدید تولید آن شده است. مدل‌های شبیه‌سازی گیاهان زراعی می‌توانند برای انجام مطالعات مختلف از جمله انتخاب گیاه و رقم مناسب برای کاشت، تعیین بهترین مدیریت زراعی و برآورد ظرفیت تولید منطقه‌ای استفاده شوند. هدف از این پژوهش، بررسی دقت و مقایسه مدل‌های ORYZA2000 و VSM با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای در شبیه‌سازی عملکرد برنج تحت تیمارهای آبیاری و تراکم کاشت می‌باشد. این آزمایش در قالب طرح بلوک کامل تصادفی با سه تکرار در منطقه گرگان واقع در شمال ایران در سال‌های ۱۳۹۹ و ۱۴۰۰ انجام گردید. مدیریت‌های آبیاری در سه سطح (آبیاری غرقاب و استفاده از سیستم‌های آبیاری تحت فشار شامل آبیاری قطره‌ای تیپ و آبیاری بارانی کلاسیک ثابت) به عنوان عامل اصلی و تراکم کاشت در سه سطح به عنوان عامل فرعی در نظر گرفته شد. ارزیابی مقادیر شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده عملکرد با استفاده از مولفه‌های ضریب تبیین، آزمون t، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (RMSEn) انجام گرفت. نتایج پژوهش نشان داد که ضریب تبیین و ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده عملکرد دانه به ترتیب ۹۱ و ۱۱/۵۴ درصد در مدل ORYZA2000 و در مدل VSM با استفاده از تصاویر سنجنده مودیس برابر با ۶۹ و ۷/۲۴ و با استفاده از تصاویر ریز مقیاس شده (نقشه‌های شاخص سطح برگ حاصل از سنجنده مودیس توسط ماهواره لندست ریز مقیاس شده) برابر با ۸۶ و ۹/۴۸ درصد تعیین گردید. مدل ORYZA2000 عملکرد دانه را در مقایسه با مدل VSM با دقت بیشتری برآورد کرد، اگر چه مدل VSM با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای ریز مقیاس شده دارای دقت قابل ملاحظه و مطلوبی بود که می‌توان از آن برای پشتیبانی نتایج آزمایش‌ها تحت شرایط مدیریت آبیاری و تراکم کشت استفاده نمود.

واژه‌های کلیدی: آبیاری، تراکم کشت، مدل ORYZA2000، مدل VSM، GIS.

ارجاع: شبان م. ر. هزار جریبی ا. اسدی م. ا. و قربانی خ. ۱۴۰۲. ارزیابی مدل‌های ORYZA2000 و VSM در شبیه‌سازی عملکرد برنج تحت مدیریت‌های آبیاری. مجله پژوهش آب ایران. ۴۸: ۱۱-۲۳. <https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2022.13993.2433>

۱- دانشجوی مقطع دکتری رشته علوم و مهندسی آب- آبیاری و زهکشی، بخش مهندسی آب دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.

۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران.

۳- دانشیار بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان گلستان، ایران.

۴- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران.

* نویسنده مسئول: mrezashaban@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۷/۲۶

مقدمه

برنج یکی از مهم‌ترین و پرطرفدارترین گیاهانی است که در تمامی شش قاره (آسیا، آفریقا، استرالیا، اروپا، آمریکای شمالی و آمریکای جنوبی) کشت می‌گردد (چوهان و همکاران، ۲۰۱۷) و سطحی معادل ۱۴۶/۵ میلیون هکتار از اراضی کشاورزی جهان را در بر می‌گیرد (مرومکار و همکاران، ۲۰۱۴). براساس آمار سازمان خواربار جهانی (FAO)، در سال ۲۰۱۸، ایران دارای ۵۸۰ هزار هکتار سطح زیر کشت و ۱/۹۹ میلیون تن تولید برنج و حدود ۱/۲ میلیون تن واردات برنج بوده است (فائو، ۲۰۲۰). ۷۰ درصد آب‌های شیرین موجود در دنیا، در بخش کشاورزی مصرف می‌شود که از این مقدار ۲ الی ۳۰ درصد آن به زراعت برنج اختصاص دارد. ایران نیز کشوری نیمه خشک با میانگین بارندگی سالانه برابر با ۲۴۰ میلی‌متر می‌باشد. تقریباً در کل مناطق شالیزار آبیاری با استفاده از روش مرسوم و با نکه داشتن ۵ - ۳ سانتی‌متر آب روی سطح خاک در فصل رشد انجام می‌شود و رشد گیاه در مناطقی که دارای سطح زیر کشت بالایی می‌باشند، به طور قابل توجهی تحت تاثیر تغییرات آب و هوایی و متعاقب آن کمبود آب قرار دارد (پن و همکاران، ۲۰۱۷). با توجه به میانگین پایین بارش در ایران و مشکلات ناشی از افزایش مصرف آب لازم است یک بازنگری کلی در روش‌های آبیاری برنج صورت گیرد. در استان‌های اصلی تولید برنج کشور، کشت سنتی به روش مرسوم از کارایی کمی برخوردار است (امیری و همکاران، ۲۰۱۱). اصولاً عملکرد پایین محصولات زراعی بواسطه کمبودهای موجود در محیط رشد نظیر آب، گیاهانی بوجود می‌آید که در مدیریت‌های زراعی به آن پرداخته نشده است (مولر و همکاران، ۲۰۱۲). در این راستا از مدل‌های شبیه‌ساز گیاهان زراعی برای انجام مطالعات مختلف از جمله انتخاب گیاه و رقم مناسب برای کاشت، تعیین بهترین مدیریت زراعی، برآورد ظرفیت تولید منطقه‌ای، تعیین خط‌مشی برای به‌نژادی، تعیین اولویت‌های تحقیقاتی، انتقال فناوری، طبقه‌بندی زراعی - بوم شناختی، پیش‌بینی اثرات تغییر اقلیم و عملکرد و همچنین تدوین و تبیین الگوی بهینه مصرف آب استفاده می‌شود (سلطانی و همکاران، ۱۹۹۹؛ رزگرنان و کلاین، ۲۰۰۳).

مدل ORYZA2000، رشد و نمو گیاه برنج را در شرایط مطلوب، محدودیت آبی و نیتروژن شبیه‌سازی می‌کند. در

تمامی این شرایط، فرض بر آن است که گیاه در برابر بیماری‌ها و علف‌های هرز محافظت شده و هیچ کاهش عملکردی از این عوامل در نظر گرفته نمی‌شود (بومن و ون لار، ۲۰۰۶). پژوهشگران مختلفی از مدل ORYZA2000 برای شبیه‌سازی رشد و نمو گیاه برنج در مدیریت‌های مختلفی نظیر آبیاری استفاده نمودند. نیسار و آرورا (۲۰۱۸) در شبیه‌سازی عملکرد برنج با مدل ORYZA2000 در تیمارهای آبیاری و تاریخ کاشت ریشه میانگین مربعات انحراف بین مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده عملکرد زیستی و دانه را به ترتیب ۱ و ۱۶ درصد گزارش نمودند. ون اوورت و همکاران (۲۰۱۶) با کمک مدل ORYZA2000، به بررسی برنج تحت آبیاری در سنگال پرداختند. نتایج این آزمایش نشان داد که با کمک مدل می‌توان تاریخ کاشت ارقام مختلف را در تراکم‌های کاشت متفاوت تعیین و قابلیت تولید برنج را تحت تاثیر خطرات اقلیمی بررسی کرد. امیری و همکاران (۲۰۱۱) با استفاده از مدل ORYZA2000 و آزمایش مزرعه‌ای به بررسی اثر تراکم کشت و مدیریت آبیاری روی عملکرد و بهره‌وری آب در جنوب ایران پرداختند. براساس نتایج، آبیاری با ۷۵ درصد تشت تبخیر و فاصله کاشت ۲۰ سانتی‌متر بهترین مدیریت در کشت برنج معرفی گردید (امیری و همکاران، ۲۰۱۱). تاریخ کاشت روی رشد و نمو فنولوژی گیاه و در نتیجه روی میزان بهره‌برداری آن از محیط تاثیرگذار است (بازوکی و همکاران، ۲۰۱۰). اعلایی بازکیایی و همکاران (۱۳۹۹) به بررسی مدل ORYZA2000 در شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری تولید برنج تحت مدیریت‌های زراعی پرداختند. دور آبیاری به عنوان عامل اصلی در چهار سطح شامل غرقاب دائمی و دور آبیاری ۵، ۱۰ و ۱۵ روز و تاریخ کاشت به عنوان عامل فرعی در سه سطح (اول، بیستم اردیبهشت و دهم خرداد) در نظر گرفته شدند. نتایج این پژوهش نشان داد که در بین مدیریت‌های آبیاری، با توجه به اجزای بهره‌وری آب، دور آبیاری غرقاب از نظر تعرق و مجموع تبخیر و تعرق و دور آبیاری ۱۵ روزه از نظر میزان آب ورودی به مزرعه و میزان آبیاری، بیشترین بهره‌وری را داشتند. همچنین ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده عملکرد دانه و عملکرد زیستی به ترتیب ۸ و ۶ درصد تعیین شد.

مدل VSM (Very Simple Model) یک مدل ساده برای شبیه‌سازی رشد گیاه و برآورد عملکرد محصول است که

و تراکم کشت 20^*20 در مراحل واسنجی و ارزیابی همبستگی خوبی داشت. با توجه به ضرورت حصول تولید اقتصادی مطلوب و ارزیابی دقت مدل‌ها در شبیه‌سازی عملکرد گیاهان زراعی و اهمیت آبیاری و تراکم کشت در حصول عملکرد مطلوب در کشت برنج، این پژوهش با هدف شبیه‌سازی عملکرد دانه برنج رقم فجر با استفاده از مدل‌های ORYZA2000 و VSM و استفاده از تصاویر ماهواره‌ای تحت شرایط مدیریت آبیاری و تراکم‌های مختلف در استان گلستان انجام گردید.

مواد و روش‌ها

به‌منظور ارزیابی مدل‌های ORYZA2000 و VSM در استان گلستان، آزمایشی بر پایه طرح بلوک کامل تصادفی با سه تکرار بر روی برنج رقم فجر طی فصل‌های زراعی ۱۳۹۹ و ۱۴۰۰ در حومه شهر گرگان (سرخنکلاته) انجام گردید. مزارع مورد مطالعه با مختصات جغرافیایی 29° تا 28° طول شرقی و 40° تا 40° عرض شمالی با تراز ۱۰۲ متر از سطح دریا در شمال ایران واقع شده بودند. تیمارهای آبیاری شامل سه سطح، آبیاری غرقاب (TPR-FI) و استفاده از سیستم‌های آبیاری تحت فشار شامل ۱- آبیاری قطره‌ای تیپ (DSR-DI) و ۲- آبیاری بارانی کلاسیک ثابت (DSR-SI) و تراکم در سه سطح شامل $D_1 = 15 * 15$ ، $D_2 = 20 * 20$ و $D_3 = 30 * 30$ می‌باشد. کرت‌های آزمایشی این پژوهش به طول ۱۰ و عرض ۵ متر در نظر گرفته شد و فاصله کرت‌ها نیز از هم برابر با نیم متر بود. در تیمار غرقابی از زمان انتقال نشاها به زمین مدنظر (خرداد ماه)، تا رسیدن محصول مزرعه در حالت غرقاب نگه داشته شد. در سیستم‌های آبیاری تحت فشار کشت برنج به صورت خشکه‌کاری انجام گردید و برنامه آبیاری (حجم آبیاری) نیز در طول دوره رشد گیاه با استفاده از داده‌های پنج ساله آب و هواشناسی منطقه مورد مطالعه و مدل AquaCrop محاسبه و بر همین اساس دور آبیاری آن به صورت یک روز در میان در نظر گرفته شد.

خصوصیات فیزیکی و هیدرولیکی خاک محل آزمایش قبل از کشت (نشاکاری و خشکه کاری) در سه عمق، در آزمایشگاه آب و خاک اندازه‌گیری گردید که در جدول ۱ قابل مشاهده است. کودهای مورد نیاز نظیر اوره و پتاس طبق توصیه کودی برای هر یک از مزارع اعمال گردید.

در عین نیاز به اطلاعات ورودی کم، از دقت قابل قبولی نیز برخوردار است. یکی دیگر از فناوری‌های نوینی که در این راستا مورد استفاده قرار می‌گیرد، سنسجش از دور است. این فناوری می‌تواند با پیش‌بینی عملکرد گیاه پیش از برداشت در بسیاری از تصمیم‌گیری‌های کشاورزی متمر ثمر واقع گردد (نورالدین و همکاران، ۲۰۱۳) و بعنوان شاخصی برای توصیف واکنش کشاورزی نسبت به مدیریت منابع آب و خاک مورد استفاده قرار گیرد (باستینسن و علی، ۲۰۰۳). اینگبین و همکاران (۲۰۱۰) در پژوهشی مدل VSM را با استفاده از تصاویر مودیس و لندست واسنجی کردند، نتایج نشان داد که مدل عملکرد برنج در شرایط اقلیمی سرد را با تکیه بر شاخص سطح برگ به خوبی پیش‌بینی کرده است. همچنین نتایج تحقیق بر روی عملکرد برنج با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای نشان داد که بین عملکرد مشاهده شده و عملکرد پیش‌بینی شده تفاوت معنی داری وجود ندارد (ونگ و همکاران، ۲۰۱۰). صدوقی و همکاران (۱۳۹۶) به بررسی عملکرد برنج با استفاده از مدل VSM و تصاویر ماهواره‌ای در استان گیلان پرداختند. نتایج به دست آمده از مدل نشان داد که این مدل از توانایی مناسبی برای شبیه‌سازی عملکرد برنج برخوردار است و تصاویر ماهواره‌ای قابلیت مناسبی برای برآورد عملکرد محصول به عنوان ورودی مدل VSM دارند. ژانگ و همکاران (۲۰۱۷) در بررسی و مقایسه مدل‌های CERES-Rice، ORYZA2000، RCM، Model Beta و SIMRIW مشاهده کردند که ۵۰ سری از مولفه‌ها تنها در صورتی به افزایش دقت مدل‌ها کمک خواهند کرد که مدل‌ها در هر محیطی به خوبی واسنجی شوند. به عبارت دیگر عدم قطعیت حاصل از مولفه‌های مدل باید کمتر از خطای حاصل از ساختار مدل باشد. ابراهیمی راد و همکاران (۱۳۹۸) با استفاده از مدل‌های CERES-Rice و ORYZA2000 به بررسی بیلان و بهره‌وری آب در کشت برنج تحت مدیریت‌های آبیاری و تراکم کاشت پرداختند. تیمارهای آبیاری شامل غرقاب کامل، اشباع، آبیاری با دور ۸ روز تا گلدهی، آبیاری با دور ۸ روز بعد از گلدهی و آبیاری با دور ۸ روز در کل دوره رشد و تراکم کشت در سه سطح (15^*15 ، 20^*20 و 25^*25 سانتی‌متر) بودند. مدل ORYZA2000 عملکرد دانه را در مقایسه با مدل CERES-Rice با دقت بیشتری برآورد کرد. مقادیر برآورد شده و پیش‌بینی شده تیمار آبیاری با دور ۸ روز تا گلدهی

داده‌های هواشناسی مورد نیاز شامل داده‌های روزانه حداقل و حداکثر دما، مقدار بارندگی، تابش و سرعت باد در سال‌های زراعی ۱۳۹۹ و ۱۴۰۰ تهیه شد (جدول ۲).

همچنین اطلاعات مربوط به سال‌های زراعی ۱۳۹۹ و ۱۴۰۰ در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و مولفه‌های ون‌گنوختن لایه‌های خاک مزرعه آزمایش

عمق (سانتی‌متر)	شن (درصد)	لوم (درصد)	رس (درصد)	θ_{sat} (درصد)	K_{sat} (cm/day)	θ_{FC} (درصد)	θ_{PWP} (درصد)	n	α (1/cm)	بافت خاک
۰-۱۰	۲۴	۲۲	۵۴	۴۳	۳۸/۴	۰/۲۱	۱۰	۱/۱	۰/۰۴۱	بافت خاک
۱۰-۲۰	۲۸	۲۱	۵۲	۴۱	۳۸/۲	۰/۱۹	۱۰	۱/۰۷	۰/۰۴	SI-L
۲۰-۳۰	۱۹	۲۴	۵۴	۴۰	۲۵/۴	۰/۱۸	۹	۱/۱	۰/۰۴۸	

جدول ۲- اطلاعات هواشناسی سال‌های ۱۳۹۹ و ۱۴۰۰ در محل پژوهش

سال	ماه	حداقل دما (C°)	حداکثر دما (C°)	سرعت باد (m/s)	تابش (KJ/m ² .d)	فشار هوا (Kpa)	بارش (mm)
۱۳۹۹	خرداد	۲۱	۳۳/۳	۱/۶۱	۳۸۲۴۹۳	۱/۷۶	۸/۶
	تیر	۲۳/۹	۳۵/۵	۱/۵۶	۴۵۰۸۹۱	۲/۱۵	۷/۳
	مرداد	۲۶/۱	۳۶/۴	۱/۴۳	۶۱۱۴۶۵	۲/۴۹	۴/۸
	شهریور	۲۲/۶	۳۳/۹	۱/۴۴	۶۷۹۳۸۴	۲/۵۷	۵/۳
	مهر	۲۱/۱	۳۱/۲	۱/۲۱	۴۲۱۴۶۹	۲/۳۸	۹/۲
۱۴۰۰	خرداد	۲۰/۱	۳۳/۷	۲/۲	۴۱۲۶۸۴	۱/۷۲	۷/۴
	تیر	۲۴/۴	۳۶/۸	۱/۷۴	۴۹۰۰۱۲	۲/۲	۴
	مرداد	۲۴/۷	۳۶/۵	۱/۴۸	۶۸۰۶۷۶	۲/۴۱	۳/۹
	شهریور	۲۳/۳	۳۴/۴	۱/۵۷	۶۹۰۹۴۲	۲/۶۶	۴/۵
	مهر	۲۰/۹	۳۲/۷	۱/۵	۵۱۲۳۴۸	۲/۴۵	۷/۳

جدول ۳- اطلاعات زراعی در دو سال مختلف و زمان‌بندی اجرای پژوهش

سال زراعی	نوع کشت	روش آبیاری	آماده‌سازی زمین	تاریخ بذریاشتی	تعداد روز خزانه	کاشت نشا	تعداد روز کل	تاریخ برداشت
۱۳۹۹	خشکه کاری	کلاسیک ثابت	۱۳۹۹/۰۳/۱۰	۱۳۹۹/۰۳/۱۳	۰	*	۱۱۹	۱۳۹۹/۰۷/۰۵
	خشکه کاری	تیپ	۱۳۹۹/۰۳/۱۰	۱۳۹۹/۰۳/۱۳	۰	*	۱۱۷	۱۳۹۹/۰۷/۰۳
	نشایی	غرقابی	۱۳۹۹/۰۳/۱۵	۱۳۹۹/۰۲/۱۸	۳۵	۱۳۹۹/۰۳/۲۲	۱۳۲	۱۳۹۹/۰۶/۲۶
۱۴۰۰	خشکه کاری	کلاسیک ثابت	۱۴۰۰/۰۳/۰۵	۱۴۰۰/۰۳/۰۹	۰	*	۱۲۱	۱۴۰۰/۰۷/۰۶
	خشکه کاری	تیپ	۱۴۰۰/۰۳/۰۶	۱۴۰۰/۰۳/۰۹	۰	*	۱۲۳	۱۴۰۰/۰۷/۰۸
	نشایی	غرقابی	۱۴۰۰/۰۳/۱۲	۱۴۰۰/۰۲/۱۵	۳۶	۱۴۰۰/۰۳/۲۰	۱۳۰	۱۴۰۰/۰۶/۲۰

توصیف مدل ORYZA2000

مدل ORYZA2000، رشد و نمو گیاه برنج آبی را در شرایط پتانسیل محصول، محدودیت آبی و محدودیت نیتروژن شبیه‌سازی می‌کند. برای شبیه‌سازی کلیه شرایط تولید، چندین شاخص با هم در ORYZA2000 جمع شده‌اند. مدل توانایی برآورد عوامل آب‌شناختی (تبخیر، تعرق و تلفات عمقی) را در شرایط مزرعه دارد. این مدل برای بررسی مقدار روزانه جذب CO_2 توسط کانوپی، براساس میزان تابش روزانه، دما و شاخص سطح برگ استفاده می‌گردد. میزان جذب روزانه براساس ترکیب

مقدار جذب CO_2 توسط برگ طی روز و در تمامی لایه‌های برگ در کانوپی محاسبه می‌شود که براساس میزان جذب، کربوهیدرات تولید شده در میان ریشه‌ها، ساقه‌ها، برگ‌ها خوشه تقسیم می‌شود. تاثیر خشکی بر گیاه شامل: لول شدن برگ، عقیم شدن سنبلک‌ها، کاهش توسعه برگ، تغییر الگوی تخصیص ماده خشک، افزایش عمق ریشه، تاخیر توسعه دوره رویشی، افزایش پیری برگ و کاهش میزان فتوسنتز در مدل محاسبه می‌شود. خصوصیات فیزیکی و هیدرولیکی مورد نیاز خاک در شرایط مدیریت آبیاری مدل شامل مولفه‌های هیدرولیکی

برنج با استفاده از برنامه DRATES در مدل، براساس زمان - گرما به چهار مرحله فنولوژیکی تقسیم می‌گردد: (۱) دوره رشد رویشی پایه (DVRJ) (۲) دوره رشد حساس به نور (DVRJ) (۳) دوره شکل‌گیری خوشه (DVRP) (۴) دوره پر شدن دانه (DVRR). سپس برنامه PARAM اجرا و سرعت رشد نسبی برگ (RGRLMX) و کسر ذخیره ساقه (FSTR) برای واسنجی مولفه‌های گیاهی محاسبه شد.

معادله ون‌گنوختن با کمک مدل RETC و اندازه‌گیری واقعی محاسبه گردید (امیری و رضایی، ۲۰۱۰). همچنین تعداد روز خزان، روز ظهور خوشه، مقدار و زمان آبیاری و در مورد برنج عملکرد شلتوک و عملکرد زیستی به عنوان مولفه‌های مدیریتی برای اجرای مدل در نظر گرفته شدند. برای واسنجی مولفه‌های گیاهی مدل از داده‌های اندازه‌گیری شده تحت شرایط تولید پتانسیل (آبیاری به صورت غرقاب) استفاده گردید (جدول ۴). دوره رشد و نمو

جدول ۴- اطلاعات ضرایب گیاهی مدل ORYZA2000

واحد	مقدار	عامل
ha leaf kg	{DVS,SLA}: ۰/۰۰-۰/۰۰۳۴-۰/۱۸-۰/۰۰۳۵-۰/۶۱-۰/۰۰۲۶-۰/۷۵-۰/۰۰۱۹- ۱/۱-۰/۰۰۲۵-۱/۳۷-۰/۰۰۲۷-۱/۹-۰/۰۰۱۹	سطح ویژه برگ
-	{DVS,DRLVT}: ۰/۰-۰/۰-۰/۰۷-۰/۰۰۰۳-۰/۹۹-۰/۰۱۷-۱/۲-۰/۰۰۲۴-۱/۸-۰/۰۰۳- ۱/۷-۰/۰۳	سرعت پیر شدن برگ ها
-	{DVS,FSH}: ۰/۰-۰/۰-۰/۰۷-۰/۰۳-۰/۸-۰/۸۱-۰/۹۹-۱/۴-۰/۹۶-۱/۶-۱/۰۱- ۱/۹-۱/۴	نسبت ماده خشک کل به اندام هوایی
-	{DVS,FLV}: ۰/۰-۰/۰۵-۰/۶-۰/۸۲-۰/۳-۱/۳-۰/۰۰-۱/۱-۰/۰۰-۲/۳-۰/۰۰- ۰/۰-۰/۴-۰/۶-۰/۳-۰/۸۱-۰/۷۵-۱/۱-۰/۴-۱/۱-۰/۰۰-۲/۱- ۰/۰۰	نسبت ماده خشک اندام هوایی به برگ
-	{DVS,FST}: ۰/۰-۰/۴-۰/۶-۰/۳-۰/۸۱-۰/۷۵-۱/۱-۰/۴-۱/۱-۰/۰۰-۲/۱- ۰/۰۰	نسبت ماده خشک اندام هوایی به ساقه
-	{DVS,FSO}: ۰/۰-۰/۶-۰/۰۰-۰/۸۱-۰/۰۰-۱/۰۱-۰/۶-۱/۶-۱/۰۰-۲/۳-۱/۰۰- ۰/۰۰	نسبت ماده خشک اندام هوایی به خوشه

قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر ارتقا یافت و سپس تاثیر آن بر دقت واسنجی‌ها در برآورد عملکرد برنج مورد بررسی قرار گرفت.

سنجده مودیس بطور روزانه شرایط جوی و آب و هوایی از قبیل دما و رطوبت را اندازه‌گیری می‌کند. با این سنجده می‌توان شاخص‌هایی نظیر شاخص‌های پوشش گیاهی (VIS)، شاخص سطح برگ (LAI) و شاخص تابش فعال فتوسنتزی (FRAR) شبیه‌سازی کرد.

ماهواره لندست-۸ (LDCM) با داشتن باندهای بیشتر نسبت به لندست‌های قبلی، دارای عملکرد بهتری برای نشان دادن جزئیات پدیده‌های موجود در زمین می‌باشد. به دلیل قدرت تفکیک مکانی بالای تصاویر ماهواره لندست و دوره بازدید روزانه سنجده مودیس در تخمین تغییرات شاخص سطح برگ از تصاویر هر دو به صورت همزمان استفاده گردید. تاریخ تصاویر اخذ شده توسط سنجده مودیس برای سال زراعی مورد نظر در جدول زیر ارائه شده است (جدول ۵).

توصیف مدل VSM و برداشت تصاویر ماهواره‌ای

در بخش دوم این پژوهش از تصاویر سنجنده‌های مودیس (MODIS)، لندست-۸ (Landsat-8) و نیز از داده‌های آزمایشگاهی برای برآورد عملکرد استفاده شد. مدل VSM یک مدل گیاهی ساده است که با توجه به اطلاعات ورودی اندک از دقت قابل قبولی در برآورد عملکرد مزرعه‌ای برنج برخوردار است، اما به دلیل عدم قطعیت در داده‌های ورودی، کاربرد مدل در مطالعات منطقه‌ای با محدودیت روبرو است. این محدودیت با تلفیق مدل با داده‌های ماهواره‌ای قابل رفع شدن است. در این پژوهش پس از تلفیق مدل VSM با داده‌های ماهواره‌ای تابش طول موج کوتاه و شاخص سطح برگ، تاثیر ارتقای قدرت تفکیک مکانی داده‌های ماهواره‌ای شاخص سطح برگ بر برآورد عملکرد برنج مورد بررسی قرار گرفت. تصاویر شاخص سطح برگ پس از استخراج از تصاویر سنجنده مودیس با قدرت تفکیک مکانی ۲۵۰ متر با استفاده از روش‌های ریزمقیاس شده و کاربرد تصاویر ماهواره لندست-۸ تا

جدول ۵- تاریخ تصاویر مودیس اخذ شده برای سال زراعی ۲۰۲۱

تصاویر	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱
تاریخ	۲۳ می	۲۸ می	۲ جون	۸ جون	۱۲ جون	۲۱ جون	۳۰ جون	۷ جولای	۱۳ جولای	۲۱ جولای	۲۹ جولای

$$T_v = T_r - T_0 \quad \text{and} \quad T_r = T_n - T_f \quad (2)$$

۷ میانگین تشعشع ورودی روزانه از زمان کاشت تا زمان گلدهی (T_v) ($\text{MJ d}^{-1} \text{m}^{-2}$)، r میانگین تشعشع ورودی روزانه از زمان گلدهی تا زمان برداشت (T_r) ($\text{MJ d}^{-1} \text{m}^{-2}$)، ϵ_v بازده استفاده از نور قبل از زمان گلدهی، ϵ_r بازده استفاده از نور بعد از زمان گلدهی (g MJ^{-1}) و HI شاخص برداشت می‌باشد. با استفاده از نقاط نمونه‌برداری شده و با کمک ابزار زمین آمار در نرم‌افزار ArcGIS، بازده استفاده از نور پس از زمان گلدهی ($r\epsilon_r$) به روش IDW درون‌یابی گردید. این روش برای مناطق همگن و فاقد تنوع و تغییرات توپوگرافی در منابع و مقالات بسیاری پیشنهاد شده است (نوروزی و همکاران، ۲۰۱۴).

برای استخراج شاخص سطح برگ از داده‌های ماهواره‌ای از شاخص پوشش گیاهی بهنجار شده یا NDVI و شاخص گیاهی اصلاح شده نسبت به بازتابش خاک یا SAVI استفاده می‌شود. این شاخص‌ها از نسبت تفاضل و تجمع بازتابش نرمال شده از باندهای مادون قرمز و قرمز حاصل می‌شود (هوته، ۱۹۸۸) و با استفاده از یک تابع نمایی به شکل زیر محاسبه می‌گردد:

$$LAI = - \frac{\ln \frac{C_1 - SAVI}{C_2}}{C_3} \quad (3)$$

که در این معادله، C_1 ، C_2 و C_3 ضرایب ثابتی هستند که مقدارشان بستگی به نوع محصول دارد. این ضرایب برای گیاه برنج به ترتیب برابر با ۰/۶۹، ۰/۵۹ و ۰/۹۱ در نظر گرفته می‌شود (چادوری و همکاران، ۱۹۹۴). برای استخراج شاخص سطح برگ از تصاویر سنجنده مودیس بایستی اعداد رقومی ثبت شده در تصاویر مودیس به صورت اعداد صحیح و به فرمت HDF ذخیره شود. بازتاب‌پذیری و تابش برای هر یک از باندها با کسر ضرایب offset و ضرب نتیجه حاصل در ضریب scale مربوط به هر یک استخراج می‌گردد. در این مطالعه پس از تبدیل اعداد رقومی به بازتابش عملیات مربوط به تصحیحات هندسی و جدا کردن مزارع مورد مطالعه صورت گرفت و در نهایت اقدام به محاسبه SAVI و LAI شد. از آنجایی که استخراج شاخص سطح برگ از تصاویر خام ماهواره لندست-۸ به صورت اعداد رقومی DN است، ابتدا آن‌ها را به تابش و

به منظور برآورد عملکرد برنج، نخست تصاویر ماهواره‌ای لندست-۸ و سنجنده مودیس استخراج و مرز منطقه مورد مطالعه رسم شد و اطلاعاتی نظیر عملکرد واقعی و اندازه‌گیری‌های میدانی در مزارع گردآوری گردید. برای این منظور، ابتدا مزارع منتخب به لحاظ توزیع جغرافیایی مناسب و نوع بافت خاک در منطقه مورد مطالعه مشخص و اندازه‌گیری شاخص سطح برگ در این مزارع به صورت هر سه هفته یکبار انجام شد. برداشت گیاه از مزارع منتخب همراه با ریشه از زمین برداشت می‌شد. پس از جداسازی برگ‌ها از بوته با استفاده از دستگاه سطح برگ سنج (Leaf area meter)، اندازه‌گیری سطح برگ انجام می‌گرفت و با توجه به سطح برداشت، شاخص سطح برگ محاسبه شد. برای اندازه‌گیری عملکرد نیز در هنگام برداشت محصول از مزارع منتخب، قطعه‌ای به ابعاد یک متر مربع از بقیه مزرعه جدا و نمونه‌گیری انجام شد. سپس نمونه‌ها به آزمایشگاه منتقل و در آون به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند و در آخر توزین شدند.

مدل VSM با فرض الگوی مثلثی برای تغییرات سطح برگ، تجمع ماده خشک را متناسب با برخورد تابش خورشیدی به گیاه فرض می‌کند (فرض اول و دوم). اساس این مدل بر پیروی از سه فرضیه در زمینه فرایند رشد گیاه قرار دارد: (۱) شاخص سطح برگ، تحت تاثیر دما براساس یک الگوی مثلثی تغییر می‌کند. (۲) تجمع ماده خشک متناسب با برخورد تابش خورشید است و (۳) عملکرد با حاصلضرب ماده خشک کل و شاخص برداشت مشخص می‌شود. با در نظر گرفتن فرضیات گفته شده، عملکرد در مرحله برداشت به صورت زیر بیان می‌گردد:

$$Y = 0.85[1 - \exp(-0.55kL_r)](vT_v \epsilon_v + rT_r \epsilon_r)HI \quad (1)$$

که در این معادله، Y میزان عملکرد (g.m^{-2})، T_v و T_r به ترتیب تعداد روزها از آغاز افزایش خطی شاخص سطح برگ تا مرحله گلدهی و تعداد روزها از مرحله گلدهی تا مرحله برداشت می‌باشد که از معادلات زیر حاصل می‌گردد:

DVRJ = 0.000576 ; DVRI = 0.000664 ;
 DVRP = 0.001436 ; DCRR = 0.001992

همچنین سرعت رشد نسبی برگ (RGRLMX) و کسر ذخیره ساقه (FSTR) برای واسنجی مولفه‌های گیاهی محاسبه گردید، که نتایج آن در زیر مشاهده می‌کنید:

RGRLMX = 0.0072 ; FSTR = 0.544

متغیرهای آماری که برای ارزیابی (واسنجی و اعتبارسنجی) توانایی مدل در شبیه‌سازی عملکرد دانه برنج در طول ۲ سال زراعی مدنظر بود، در جدول ۶ ارائه شده است. نتایج نشان داد که ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) در محدوده ۲۷۱-۳۲۶ کیلوگرم در هکتار می‌باشد. مقدار ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (RMSEn) در طی همین دو فصل در محدوده ۱۲/۳۲-۱۱/۵۴ درصد به دست آمد. امیری لاریجانی و همکاران (۲۰۱۳) در شبیه‌سازی عملکرد دانه ارقام برنج در سنین مختلف گیاهچه‌ای با استفاده از مدل ORYZA2000، میانگین جذر میانگین مربعات خطای نرمال ۶ تا ۹ درصد را برای عملکرد دانه گزارش نمودند. همچنین ابراهیمی راد و همکاران (۱۳۹۸) در ارزیابی عملکرد و بهره‌وری آب برنج تحت مدیریت‌های آبیاری با استفاده از مدل ORYZA2000، مقدار ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده را برای عملکرد دانه در محدوده ۱۴/۷۸ تا ۱۳/۶۹ گزارش کردند. بررسی دامنه مقادیر عملکرد دانه واقعی (۴۲۸۹ تا ۴۷۴۶ کیلوگرم در هکتار) و شبیه‌سازی شده توسط مدل ORYZA2000 (با دامنه ۴۱۰۲ تا ۴۴۳۱ کیلوگرم در هکتار) نشان داد مقادیر شبیه‌سازی شده بین ۵ تا ۲۰ درصد خطا داشته است. نتایج آزمون t نشان می‌دهد که مقادیر عملکرد دانه شبیه‌سازی شده مدل در شرایط مدیریت آبیاری و فاصله کشت در سطح احتمال ۹۵ درصد شبیه مقادیر عملکرد دانه اندازه‌گیری شده است (جدول ۶). ارزیابی کارایی مدل در مرحله واسنجی نشان داد با ضریب کارایی نش- ساتکلیف ۰/۷۲، دارای دقت قابل قبولی می‌باشد. در مرحله اعتبارسنجی نیز نشان می‌دهد که مدل به خوبی توانسته برای سال صحت سنجی با ضریب ۰/۶۴ نتایج خوبی ارائه نماید. این نتایج رضایت بخش بوده و روند کاهش ضریب قابل قبول است. نتایج حاصل از تجزیه رگرسیون خطی (شکل ۱) بین مقادیر عملکرد دانه شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده نشان داد که ضریب تبیین (R^2) برای کل داده‌های دو سال آماری در این مدل برابر با ۰/۹۳ می‌باشد. با توجه به

سپس به بازتاب پذیری تبدیل کرده و پس از این مراحل اقدام به محاسبه SAVI و LAI گردید. در نهایت پس از تبدیل مقادیر عددی DN به تشعشع، مقدار قابلیت انعکاس یا بازتاب پذیری برای هر باند محاسبه گردید. بمنظور ریز مقیاس کردن نقشه‌های شاخص سطح برگ حاصل از سنجنده مودیس با استفاده از تصاویر ماهواره لندست-۸ و افزایش قدرت تفکیک مکانی نقشه‌های شاخص سطح برگ از روش نسبت‌ها (وظیفه دوست، ۲۰۰۷) استفاده شد.

(۴)
$$LAI_{L,d} = GM(LAI_{M,d}) * \left[\frac{LAI_{L,june2}}{GMLAI_{M,june2}} \right]$$

که در آن $LAI_{L,d}$ نقشه شاخص سطح برگ ریز مقیاس شده از ۲۵۰ متر به ۳۰ متر برای هر روز دلخواه، $GM(LAI_{M,d})$ مقدار میانگین شاخص سطح برگ کل پیکسل‌های تصاویر سنجنده مودیس با قدرت کانی ۲۵۰ متر، $LAI_{L,june2}$ نقشه شاخص سطح برگ برای تصاویر ماهواره لندست-۸ هم زمان است. پس از ریز مقیاس کردن تصاویر مودیس براساس تصویر لندست مقدار شاخص سطح برگ در هر پیکسل برآورده گردید. پس از آماده کردن نقشه‌های شاخص سطح برگ از تصاویر مودیس و همچنین از تلفیق تصاویر مودیس و لندست در کنار داده‌های تابش موج کوتاه جذب شده از سایت نوا به صورت NCEP/NCAR و سایر ورودی‌های مورد نیاز، مقدار عملکرد در محیط نرم‌افزار MATLAB شبیه‌سازی گردید. برای سنجش صحت مدل‌ها، از آماره‌های ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (RMSEn)، ضریب کارایی مدل نش- ساتکلیف (NS) و ضریب تبیین (R^2) استفاده شد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2} \quad (5)$$

$$RMSEn = 100 \frac{RMSE}{M_0} \quad (6)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_i (Q_{m,i} - Q_s)^2}{\sum_i (Q_{m,i} - Q_m)^2} \quad (7)$$

در این معادلات، n تعداد مشاهدات، S_i مقدار شبیه‌سازی شده، O_i مقدار مشاهده شده و M_0 میانگین مقادیر مشاهده شده است.

نتایج و بحث

برآورد عملکرد برنج با استفاده از مدل ORYZA2000

ضرایب به دست آمده برنج (رقم فجر) از کالیبراسیون مدل ORYZA2000 که با استفاده از برنامه DRATES به دست آمد برابر است با:

مقادیر ضریب تبیین، ریشه میانگین مربعات خطا و ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده خصوصیات مورد ارزیابی مدل در شرایط مدیریت آبیاری و فاصله کشت، می‌توان نتیجه گرفت که مدل توانایی شبیه‌سازی عملکرد دانه برنج را با دقت مناسب دارد و می‌توان از این مدل در برنامه‌ریزی آبیاری و فاصله کاشت برنج استفاده نمود.

جدول ۶- ارزیابی نتایج شبیه‌سازی شاخص‌های گیاهی مدل ORYZA2000 در شرایط واسنجی و اعتبارسنجی

سال	RMSE	RMSEn	CVs	T test	EF	P _{mean}	O _{mean}	R ²	NS
۱۳۹۹	عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار)	۳۲۶	۱۲/۳۲	۱۰/۱	۰/۵۳	۰/۷۶	۴۱۰۲	۰/۷۳	۰/۷۲
۱۴۰۰	عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار)	۲۷۱	۱۱/۵۴	۶/۳	۰/۷۹	۰/۸۴	۴۴۳۱	۰/۹۱	۰/۶۴

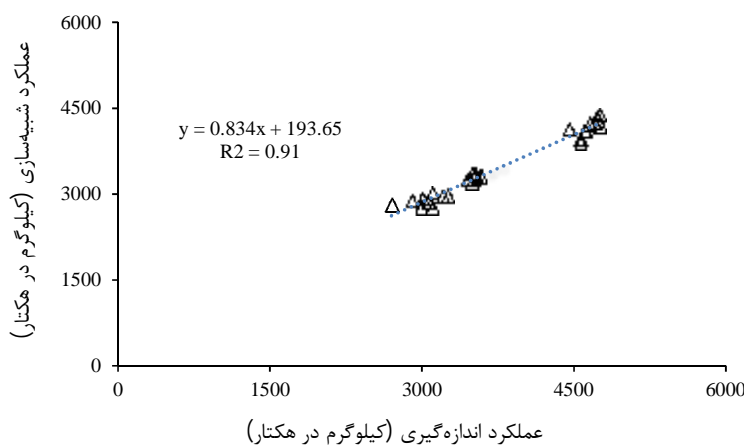
ریشه میانگین مربعات خطا: RMSE، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده: RMSEn، ضریب تغییرات مقادیر مشاهده شده: CVs، آزمون تی: T test، کارایی مدل: EF، مقادیر شبیه‌سازی شده: P_{mean}، مقادیر مشاهده شده: O_{mean}، ضریب تبیین: R²، شاخص نش-ساتکلیف: NS.

برآورد عملکرد برنج با استفاده از مدل VSM و

تصاویر ماهواره‌ای

با استفاده از مدل VSM و به کمک روش IDW (درون‌یابی)، نقشه‌های مربوطه در محیط ArcGIS تهیه شدند. روند تغییرات شاخص سطح برگ مشاهده شده در مزارع منتخب و برآورده شده از سنجش از دور در شکل ۲ نشان داده شده است. همچنین مقادیر معیارهای ارزیابی برآورد شاخص سطح برگ با استفاده از اطلاعات ماهواره‌ای در دو حالت استفاده از تصاویر ریز مقیاس شده (نقشه‌های شاخص سطح برگ حاصل از سنجنده مودیس توسط ماهواره لندست ریز مقیاس می‌گردد) و سنجنده مودیس در جدول ۷ آورده شده است. طبق این جدول دامنه تغییرات معیار ME در تصاویر ریز مقیاس شده بین ۰/۵۱۲ تا ۰/۹۶۷ و در تصاویر سنجنده مودیس بین ۰/۲۴۶ تا ۰/۷۶ می‌باشد. دامنه تغییرات RMSE برای تصاویر ریز مقیاس شده بین ۰/۱۷۴ و ۰/۴۱۹ و برای

تصاویر سنجنده از نوع مودیس بین ۰/۲۸۲ تا ۰/۷۳۲ می‌باشد. طبق این جدول میانگین مقادیر RMSE در تصاویر ریز مقیاس شده و مودیس به ترتیب برابر با ۰/۲۶۷ و ۰/۵۵ به دست آمد. مایر و همکاران (۲۰۱۱) نیز در تحقیقی مشابه، مقدار RMSE را در تعیین شاخص سطح برگ از تصاویر ماهواره‌ای برابر با ۰/۵۲ گزارش کردند. با توجه به میانگین مقادیر معیارهای ارزیابی مشخص شد که تصاویر ریز مقیاس شده برای برآورد شاخص سطح برگ از دقت بیشتری نسبت به تصاویر سنجنده مودیس برخوردارند. مقدار متوسط خطای نسبی در تصاویر ریز مقیاس شده و مودیس به ترتیب برابر با ۰/۲۸ و ۰/۴۶ به دست آمد. بر این اساس بهره‌گیری از اطلاعات ماهواره‌ای در برآورد تغییر مکانی و زمانی شاخص سطح برگ علاوه بر صرفه جویی در وقت و هزینه می‌تواند دقت مورد انتظار را نیز برآورده سازد.

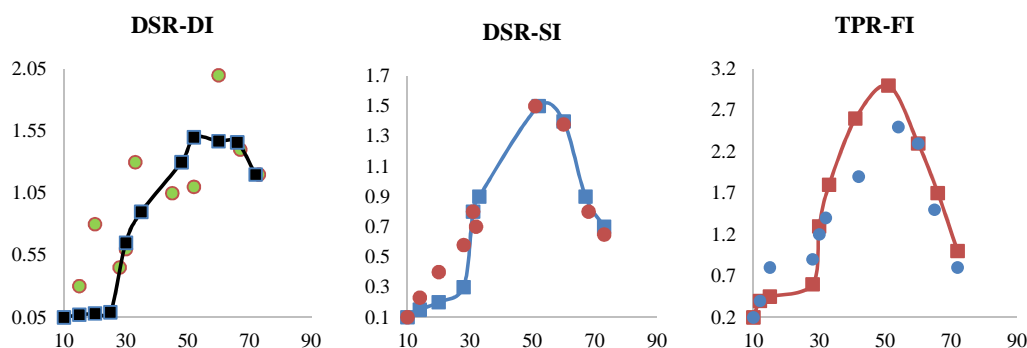


شکل ۱- مقایسه عملکرد دانه شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده در سال‌های مورد نظر نسبت به خط ۱:۱

جدول ۷- مقادیر معیارهای ارزیابی برآورد LAI از سنجنده مودیس و ماهواره لندست در مزارع موجود در طرح

نام مزرعه	تصاویر سنجنده مودیس				تصاویر ریز مقیاس شده			
	RMSEn (%)	RMSE	ME	MAE	RMSEn (%)	RMSE	ME	MAE
نشایی-آبیاری غرقایی	۴۵/۶	۰/۲۸۲	۰/۴۱	۰/۲۷	۱۹/۲	۰/۱۷۴	-۰/۵۱	۰/۲۹
خشکه کاری-آبیاری بارانی	۵۸/۲	۰/۷۳۲	۰/۷۶	۰/۵۸	۳۴/۳	۰/۴۱۹	-۰/۷۵	۰/۴۱۵
خشکه کاری-آبیاری قطره‌ای	۵۵/۶۷	۰/۶۳۶	۰/۲۴	۰/۷۳	۴۱/۳	۰/۲۰۸	-۰/۹۷	۰/۱۴
میانگین Mean	۵۳/۱۲	۰/۵۵	۰/۳۰۸	۰/۴۶	۳۱/۶	۰/۲۶۷	-۰/۷۱	۰/۲۸

ریشه میانگین مربعات خطا: RMSE، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده: RMSEn، مقادیر شبیه‌سازی شده: Pmean، مقادیر مشاهده شده: Omean، میانگین مطلق خطا: MAE و بازده مدل: ME.

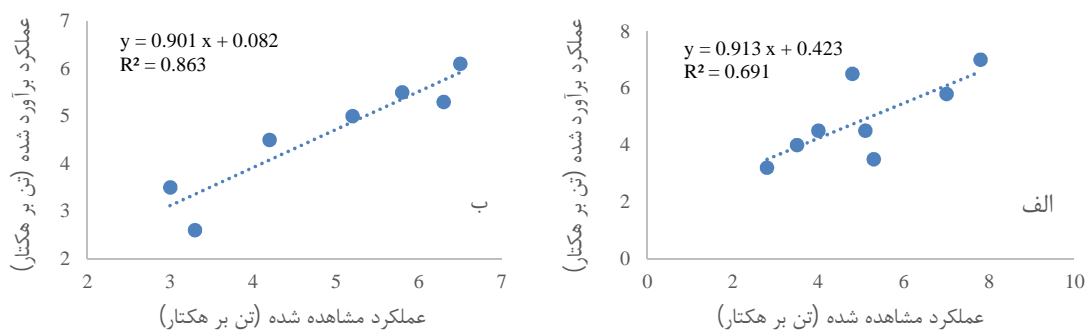


شکل ۲- روند تغییرات شاخص سطح برگ مزارع موجود در روزهای اندازه‌گیری شده (سنجش از دور ● و مشاهده شده ○) (محور افقی: روزهای اندازه‌گیری، محور عمودی: مقدار شاخص سطح برگ اندازه‌گیری شده)

ماهواره‌ای نشان داد که بین عملکرد مشاهده شده و عملکرد پیش‌بینی شده تفاوت معنی داری وجود ندارد. معیارهای آماری در برآورد عملکرد توسط مدل در فرآیند واسنجی و اعتبارسنجی برای سنجنده‌ها در جدول ۹ ارائه شده است. مطابق این جدول و همچنین در فرآیند اعتبارسنجی مدل، مقدار RMSEn از ۷/۲۴ درصد در حالت برآورد عملکرد توسط سنجنده مودیس به ۹/۴۸ درصد در حالت تصاویر ریز مقیاس شده (استفاده از هردو سنجنده) افزایش یافته است و همانطور که بیان گردید مقادیر ضریب تبیین از ۰/۶۹ در حالت اول به ۰/۸۶ در حالت دوم افزایش پیدا کرد. شاخص نش-ساتکلیف (NS) نیز به عنوان پارامتری برای ارزیابی کمی عملکرد مدل در حالت تصاویر ریز مقیاس شده در هر دو مرحله واسنجی و اعتبارسنجی نتایج قابل قبولی نشان داد، اما نتیجه این شاخص از تصاویر به دست آمده از سنجنده مودیس در مرحله اعتبارسنجی غیر قابل قبول می‌باشد. مقادیر فوق و مقایسه آن‌ها نشان دهنده این نکته است که در شرایط واسنجی و اعتبارسنجی مدل، تصاویر ریز مقیاس شده برآورد بهتری از عملکرد برنج در منطقه نشان داد.

واسنجی و اعتبارسنجی مدل براساس اطلاعات مشاهده شده در سال‌های زراعی ۱۳۹۹ و ۱۴۰۰ صورت گرفت. مقدار پارامترهای مدل VSM حاصل از فرآیند واسنجی و اعتبارسنجی مدل در جدول ۸ نشان داده شده است. محدوده ضریب خاموشی (K)، بین ۰/۴ تا ۰/۷ است (هی و واکر، ۱۹۸۹)، که براساس واسنجی اعمال شده در دو حالت این مقدار برابر با ۰/۴۷ در نظر گرفته شد. همچنین میانگین شاخص (I_n) پس از واسنجی برابر با ۰/۴۵ در نظر گرفته شد. مقایسه عملکرد برآورد شده و عملکرد واقعی برنج در منطقه مورد مطالعه در شکل ۳ نشان داده شده است. با توجه به شکل مقدار ضریب تبیین عملکرد مشاهده شده و برآورد شده حاصل از تصاویر مودیس (الف) برابر با ۰/۶۹ و برای تصاویر ریز مقیاس شده (ب) برابر با ۰/۸۶ به دست آمد.

مقایسه شیب و عرض از مبدا خط روند مقادیر مشاهده شده و مقادیر حاصل از سنجش از دور با خط یک به یک با استفاده از آزمون F انجام گرفت. بر این اساس اختلاف معنی داری بین شیب و عرض از مبدا خط روند با خط یک به یک مشاهده نشد. نتایج تحقیق ونگ و همکاران (۲۰۱۰) نیز بر روی عملکرد برنج با استفاده از تصاویر



شکل ۳- مقایسه مقادیر عملکرد مشاهده شده و برآورد شده در استفاده از تصاویر مودیس (الف) و تصاویر ریز مقیاس شده (ب)

جدول ۸- مقدار پارامترهای مدل VSM حاصل از فرآیند واسنجی

K	I _h	é _v (g/Mj)	é _r (g/Mj)	v (Mj/d.m ²)	r (Mj/d.m ²)
۰/۴۷	۰/۴۵	۱/۱	۱/۱	۲۷/۷	۶۷/۸

جدول ۹- معیارهای آماری در برآورد عملکرد با استفاده از فرآیند واسنجی و اعتبارسنجی مدل و سنجنده‌ها

تصاویر ریز مقیاس شده	تصاویر سنجنده مودیس	سال	پارامترها
۲۹۶	۲۵۴	۱۳۹۹	RMSE
۱۰/۷۴	۸/۱		RMSEn
۳۹۸۷	۳۷۶۴		P _{mean}
۴۲۸۹	۴۲۸۹		O _{mean}
۰/۲۴	۰/۵۸۳		MAE
۰/۶۷	۰/۴۷		NS
۰/۸۱	۰/۶۵		R ²
۲۷۳	۲۲۶	۱۴۰۰	RMSE
۹/۴۸	۷/۲۴		RMSEn
۴۲۹۴	۴۰۵۷		P _{mean}
۴۷۴۶	۴۷۴۶		O _{mean}
۰/۲۳	۰/۵۲		MAE
۰/۶۱	۰/۳۱		NS
۰/۸۶	۰/۶۹		R ²

ریشه میانگین مربعات خطا: RMSE، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده: RMSEn، مقادیر شبیه‌سازی شده: P_{mean}، مقادیر مشاهده شده: O_{mean}، ضریب تبیین: R²، میانگین مطلق خطا: MAE و شاخص نش-ساتکلیف: NS.

مقایسه مدل‌های ORYZA2000 و VSM همراه با تصاویر ماهواره‌ای

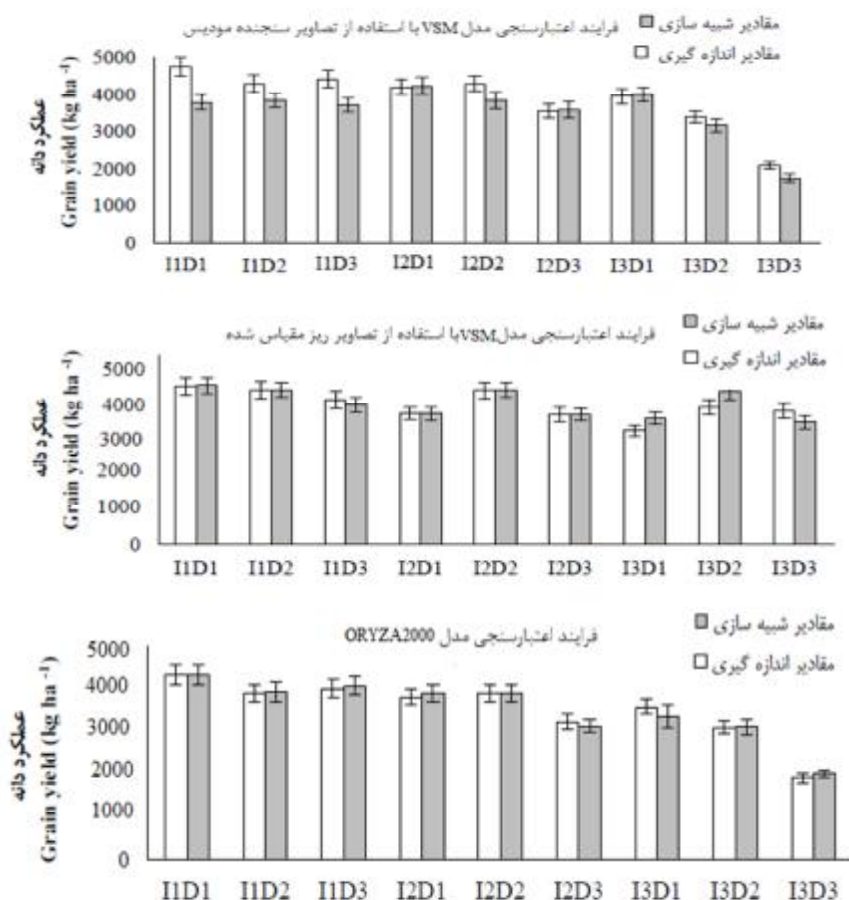
به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که مدل‌های ORYZA2000 و مدل VSM با استفاده از تصاویر ریز مقیاس شده از دقت قابل قبولی (خطای کمتر از ۲۰ درصد) برای شبیه‌سازی عملکرد گیاه برنج در شرایط مدیریت آبیاری و فاصله کاشت برنج برخوردار می‌باشند. همچنین در این مدل‌ها با توجه به نتایج آزمون t، ($P > 0.05$)، می‌توان نتیجه گرفت اختلاف معناداری بین داده‌های شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده وجود ندارد. طبق نتایج به دست آمده مدل ORYZA2000 از دقت بالاتری در شبیه‌سازی عملکرد دانه در شرایط واسنجی و

اعتبارسنجی ($R^2 = 0.91$ و $NS = 0.64$) نسبت به مدل VSM همراه با تصاویر ماهواره‌ای (تصاویر سنجنده مودیس $NS = 0.31$ ، $R^2 = 0.69$) و تصاویر ریز مقیاس شده ($NS = 0.61$ ، $R^2 = 0.86$) داشته است. اساس کار مدل VSM در برآورد و شبیه‌سازی عملکرد با استفاده از تصاویر سنجنده‌ی مودیس (MODIS)، ماهواره لندست-۸ (Landsat-8) و نیز از داده‌های آزمایشگاهی می‌باشد. در حالی که مدل ORYZA2000 براساس سرعت رشد متفاوت در مرحله گیاهچه، مرحله حساس به دوره نوری، مرحله آغاز شکل‌گیری خوشه و مرحله رشد رویشی، عملکرد را پیش‌بینی می‌کند (امیری و همکاران، ۲۰۱۴). طبق این بررسی، شبیه‌سازی عملکرد مدل ORYZA2000

عملکرد واقعی دانه کم می‌شود. تراکم کاشت 15×15 (D_1) و 20×20 (D_2) (به ترتیب با میانگین ۳۸۴۷ و ۴۰۳۶) بیشترین مقدار عملکرد دانه را به همراه داشته است که مدل‌های ORYZA2000 و VSM با استفاده از تصاویر ریز مقیاس شده به خوبی تغییرات عملکرد دانه را پیش‌بینی نموده‌اند. بیشترین مقدار خطای مدل‌ها در تخمین عملکرد در مرحله اعتبارسنجی، مدل VSM با استفاده از تصاویر سنجنده مودیس و ریز مقیاس شده و مدل ORYZA2000 به ترتیب در تیمارهای I_1D_1 ، I_3D_2 و I_3D_1 مشاهده شد. شرایط توامان محدودیت آب و تراکم کشت تاثیر متفاوتی بر رشد و نمو گیاه برنج در شرایط واقعی ایجاد می‌کند، بطوریکه در شرایط آبیاری به صورت قطرای و فاصله کشت 30×30 ، مدل VSM با استفاده از تصاویر سنجنده مودیس در تخمین عملکرد دقت کمتری داشت (شکل ۴).

در این پژوهش از دقت بالاتری برخوردار بوده است. طبق نتایج به دست آمده مدل VSM از میان پامترهای ورودی برای اجرا، بازده استفاده از نور و شاخص سطح برگ از حساسیت بیشتری در مدل برخوردار بودند و چون این پارامترها از تصاویر ماهواره‌ای استخراج می‌شوند، در برآورد عملکرد مخصوصا تصاویر ریز مقیاس شده می‌توانند نقش بسزایی داشته باشند. از آنجا که مدل ORYZA2000 یک مدل تخصصی برنج است، نیاز به اطلاعات بیشتری در مورد گیاه و خاک دارد و به تبع آن اطلاعات بیشتر منجر به شبیه‌سازی مطلوب‌تر می‌شود و نمی‌توان از محبوبیت و دقت مدل در استفاده کاربران چشم پوشی کرد.

در شکل ۴ مقایسه و ارزیابی مقدار عملکرد شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده دانه تحت مدیریت‌های آبیاری و تراکم کشت در سال‌های مختلف ارائه شده است، نتایج نشان داد که در مدیریت آبیاری به روش قطره‌ای (I_3) نسبت به آبیاری غرقابی (I_1) و بارانی کلاسیک ثابت (I_2) مقدار



شکل ۴- مقایسه و ارزیابی مقدار عملکرد دانه شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده تحت مدیریت‌های آبیاری و تراکم کشت (I_1 : آبیاری غرقابی، I_2 : آبیاری بارانی کلاسیک ثابت و I_3 : آبیاری قطره‌ای نواری تیپ، $15 \times 15 = D_1$ ، $20 \times 20 = D_2$ و $30 \times 30 = D_3$)

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، عملکرد برنج با استفاده از مدل ORYZA2000 و VSM همراه با فناوری سنسجش از دور برآورد شد. همانطور که مشاهده شد مدل‌های واسنجی شده در تخمین عملکرد محصول برای دامنه وسیعی از اطلاعات آزمایش موفق بوده و با دقت قابل قبولی عملکرد را تخمین زدند. بطوریکه هر دو مدل براساس مقادیر ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده کمتر از ۱۰ درصد و کارایی مدل و ضریب تبیین بالای ۰/۶۵ و انحراف ساختاری کمتر از ۲ درصد، دقت قابل قبولی در شبیه‌سازی عملکرد طی واسنجی و اعتبارسنجی مدل‌ها داشته‌اند. مدل ORYZA2000 با توجه به ضریب تبیین و کارایی مدل بالا (به ترتیب ۰/۹۱ و ۰/۸۴) دقت بالاتری در شبیه‌سازی عملکرد نسبت به مدل VSM همراه با تصاویر ریز مقیاس شده با ضریب تبیین و کارایی مدل و ترتیب ۰/۸۶ و ۰/۷۲ نشان داد. بنابراین این مدل از توانایی مناسبی برای تخمین عملکرد برنج در منطقه مورد مطالعه برخوردار می‌باشد. این پژوهش با توجه به نتایج کاربردی آن می‌تواند در سال‌های آتی در منطقه مورد نظر مورد استفاده قرار گیرد و برآورد محصول بر پایه آن انجام گردد که علاوه بر کاهش حجم عملیات میدانی در صرفه جویی هزینه‌ها نیز بسیار حائز اهمیت است.

منابع

۱. اعلایی بازکیایی پ. کامکار ب. امیری ا. کاظمی ح. و رضایی م. ۱۳۹۹. ارزیابی مدل ORYZA2000 در شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری تولید برنج تحت مدیریت‌های زراعی. مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک. ۲۷(۱): ۴۹-۶۹.
۲. ابراهیمی راد ح. بابازاده ح. امیری ا. و ص ح. ۱۳۹۸. ارزیابی بیلان و بهره‌وری آب برنج تحت مدیریت‌های آبیاری و تراکم کاشت با استفاده از مدل‌های Ceres-rice و ORYZA2000. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۱۳: ۱۶۵-۱۷۶.
۳. پازوکی ا. ر. کریمی نژاد م. و فولادی طروقی. ۱۳۸۹. تاثیر تاریخ کشت بر عملکرد گونه‌های مختلف زعفران در منطقه نطنز. فیزیولوژی گیاه. ۸(۲): ۳-۱۲.
۴. صدوقی ل. همایی م. نوروزی ع. و اسدی ص. ۱۳۹۶. برآورد عملکرد برنج با استفاده از مدل VSM و تصاویر ماهواره‌ای در استان گیلان. تحقیقات غلات. ۶(۱): ۳۹۷-۴۱۰.
5. Amiri Larijani B. Sarvestani Z. T. and Nematzadeh, G. A. 2013. Simulation of leaf area index, biomass and grain yield of rice cultivars at different seedling ages using ORYZA2000 model. Seed and Plant Production Journal. 29: 283-302.
6. Amiri E. Razavipour T. and Bannayan M. 2011. Evaluation of yield and water productivity in rice under irrigation management and plant density with use ORYZA2000 model.
7. Amiri E. and Rezaei M. 2010. Evaluation of water-nitrogen schemes for rice in Iran, using ORYZA2000 model. Communications in soil science and plant analysis. 41(20): 2459-2477.
8. 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.
9. Bastiaanssen W. G. and Ali S. 2003. A new crop yield forecasting model based on satellite measurements applied across the Indus Basin, Pakistan. Agriculture, ecosystems & environment. 94(3): 321-340.
10. Bouman B. A. M. and Van Laar H. H. 2006. Description and evaluation of the rice growth model ORYZA2000 under nitrogen-limited conditions. Agricultural Systems. 87(3): 249-273.
11. Choudhury B. J. Ahmed N. U. Idso S. B. Reginato R. J. and Daughtry C. S. 1994. Relations between evaporation coefficients and vegetation indices studied by model simulations. Remote sensing of environment. 50(1): 1-17.
12. Chowhan S. Haider M. R. Hasan A. F. M. F. Hoque M. I. Kamruzzaman M. and Gupta R. 2017. Comparative on farm performance of five modern rice varieties with two local cultivars. Journal of Bioscience and Agriculture Research. 13(01): 1074-1086.
13. FAO. 2020. Food and Agricultural Organization of the United Nations (sited in: http://www.fao.org/index_en.htm/, 1/1/2020.
14. Hay R. K. M. and Walker A. J. 1989. An Introduction to the Physiology of crop yield. Longman Scientific and Technical, New York. 292 p.

- remote sensing and geographical information. Ph.D. Dissertation, University of Wageningen, The Netherlands
27. Wang Y. P. Chang K. W. Chen R. K. Lo J. C. and Shen Y. 2010. Large-area rice yield forecasting using satellite imageries. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 12(1): 27-35.
 28. 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.
 29. Zhang S. Tao F. and Zhang Z. 2017. Uncertainty from model structure is larger than that from model parameters in simulating rice phenology in China. *Eur. J. Agron.* 87: 30-39.
 15. Huete A. R. 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote sensing of environment*. 25(3): 295-309.
 16. Maire G. Marsden, C. Verhoef, W. Ponzoni F. J. Seen D. L. Bégué A. and Nouvellon Y. 2011. Leaf area index estimation with MODIS reflectance time series and model inversion during full rotations of Eucalyptus plantations. *Remote Sensing of Environment*. 115(2): 586-599.
 17. Mueller N. D. Gerber J. S. Johnston M. Ray D. K. Ramankutty N. and Foley J. A. 2012. Closing yield gaps through nutrient and water management. *Nature*. 490(7419): 254-257.
 18. Murumkar R. P. Dongarwar U. R. Phad D. S. Borkar B. Y. and Pisalkar P. S. 2014. Performance testing of four row self propelled paddy transplanter. *International Journal of Science, Environment, and Technology*. 3(6): 2015-2019.
 19. Nisar S. and Arora V. K. 2018. Analysing dry-seeded rice responses to planting time and irrigation regimes in a subtropical environment using ORYZA2000 model. *Agricultural Research*. 7(4): 424-431.
 20. Noroozi A. A. Jalali N. Miri M. and Abbasi M. 2014. Estimating rice leaf area index at North Iran. *Journal of Soil and Water Resources Conservation*. 3(2): 1-10.
 21. Nouredin 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 Space Science*. 16(1): 125-131.
 22. Pan J. Liu Y. Zhong X. Lampayan R. M. Singleton G. R. Huang N. and Tian K. 2017. Grain yield, water productivity and nitrogen use efficiency of rice under different water management and fertilizer-N inputs in South China. *Agricultural Water Management*. 184: 191-200.
 23. Rosegrant M. W. and Cline S. A. 2003. Global food security: challenges and policies. *Science*. 302(5652): 1917-1919.
 24. Soltani A. Rahimzadeh Khoei F. Ghassemi-Golezani M. and Moghaddam M. 1999. Cicer: A computerized model for simulating chickpea growth and yield. *Agric. Sci.* 9(3): 89-106.
 25. Van Oort P. A. J. Balde A. Diagne M. Dingkuhn M. Manneh B. Muller B. and Stuerz S. 2016. Intensification of an irrigated rice system in Senegal: Crop rotations, climate risks, sowing dates and varietal adaptation options. *European Journal of Agronomy*. 80: 168-181.
 26. Vazifedoust M. 2007. Development of an agricultural drought assessment system: Integration of agrohydrological modelling,

