



Journal of Hydraulics and Water Science

Online ISSN: 3092-6114
Journal homepage: <https://hws.tabrizu.ac.ir/?lang=en>



Research Article

Application of Satellite Data in Simulating Water Productivity in Rice Fields

Mojtaba Rezaei^{*1}, Naser Davatgar², Ebrahim Amiri³, Morteza Kamali⁴, Mohammad Mehdi Nakhjavani Moghaddam⁵

1-Assistant Professor, Rice Research Institute of Iran, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Rasht, Iran, (Email: mrezaei@yahoo.com)

2-Associate Professor, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran

3-Professor, Water Engineering Department, Lahijan Branch, Islamic Azad University, Lahijan, Iran

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

5-Assistant Professor, Agricultural Engineering Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran

Received: January 4, 2025

Accepted: February 8, 2025

Revised: February 7, 2025

Published online: March 20, 2025

*Corresponding Author's Email: mrezaei@yahoo.com

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Keywords:

DSSAT,
model,
paddy field,
ORYZA2000,
remote sensing

Background and Objectives

So far, many researches have been conducted with the aim of reducing water consumption and evapotranspiration and increasing water productivity in rice cultivation, which have led to the introduction of alternative irrigation methods such as Alternating wetting and drying. Determining the best irrigation method in each region and evaluating different scenarios of agricultural factors on water productivity in rice cultivation requires expensive and time-consuming field research in the same region. Researchers have suggested the use of Crop Growth Models to solve this problem. The ORYZA2000 model has been specially developed for use in rice research. The DSSAT model is also one of the most famous and widely used crop growth models, which has a special program for simulating rice. The results of researches using these models showed that the ORYZA2000 model has acceptable accuracy at the field level, but its accuracy decreases on a large scale. The proposed solution to solve this problem is to extract vegetation indices from satellite images according to the region and land cover. Vegetation indices obtained from remote sensing images can be used in leaf Area Index (LAI) estimation and crop yield modeling. Since most of the research conducted in the field of paddy yield modeling has been done at the field level and in completely homogeneous conditions, the generalization of these results to wider levels due to the loss of homogeneity in the conditions of agricultural and irrigation management and soil type, requires the use of innovative methods in determining paddy yield. Therefore, the aim of the current research is the feasibility of using remote sensing and satellite images in order to improve the accuracy of paddy yield simulation by the ORYZA2000 and DSSAT models on a large scale (paddy fields of Some-Sara city, Guilan province).

Methodology

All the information needed for the calibration and validation of the ORYZA2000 and DSSAT models was obtained from the previous research conducted in the lands of the Rice Research Institute of Iran (RRII) during the years. In order to evaluate the performance of the model on a large scale, 44 farms were selected from the farms of Some-Sara city of Gilan province. Agronomic management information was collected by surveillance from farmers in the form of a questionnaire including: nursery day, No. of days in nursery, No. of seedlings per hill, No. of hills per m², transplanting day, flowering of 50%, maturity day, fertilizer use and planting date. Finally, paddy yield was sampled and measured in these fields. Water use information was obtained from the Regional Water Corporation of Guilan province and entered in the model. The model was implemented in each of these fields and the performance value predicted by the model was compared with its measured value. Remote sensing data were obtained through the images of LANDSAT 5 and LANDSAT 7 satellites on the dates corresponding to the rice crop stages, including the flowering and harvest stages, and the LAI index was extracted and provided to the model to increase its simulation accuracy. After correcting the model using satellite images, the response of paddy yield and water productivity in the region with the scenarios of changing the height of irrigation water (regardless of puddling operation before hand-transplanting) including 250, 300, 400 and 500 mm were considered and the irrigation program in all the selected farms of Some-Sara region was entered into the model based on these scenarios. Finally, paddy yield and WP in these fields based on them was estimated.

Findings

The results of running the models in field scale showed that the NRMSE values for the ORYZA2000 and DSSAT models were 11 and 9 percent, respectively, in calibration and 9 and 8 percent, respectively, in validation. The results obtained from the estimation of paddy yield in 44 farms on a large scale by models and comparing with the measured data showed that the maximum value of the yield compared to its minimum is much lower than the actual value, but the average simulated yield by the model is very close to the average yield observed in the region. Correcting model coefficients by combining Leaf Area Index data obtained from satellite images with the models has significantly improved yield estimation (from 23.2 to 10.8 percent in the ORYZA2000 model and from 21 to 12.7 percent in the DSSAT model). Although the average simulated yield after correcting the model is slightly more different than the condition of not using satellite images, the use of satellite images has led to the minimum and maximum simulated yield when using satellite images in the form significantly improved. The results of applying the irrigation scenarios showed that the maximum water productivity is achieved in the amount of water consumed of 300 mm, but this means about 17% reduction in yield. Also, water consumption equal to 350 mm results in a 10% decrease in performance; But since the water consumption of 400 mm during the growing season did not show any decrease in yield and more water consumption did not increase the yield, therefore the recommendation of using 400 mm of water consumption during the growing season is more acceptable to It seems.

Conclusion

The results of the present study showed that after recalibrating the Oryza2000 and DSSAT models at the field level, theirs extension to a wider area using remote sensing data through LAI brings the simulation results of the model closer to the real conditions and can be used to evaluate different scenarios of increasing water productivity.



کاربرد داده‌های ماهواره‌ای در شبیه‌سازی بهره‌وری آب در مزارع برنج

مجتبی رضایی^{۱*}، ناصر دواتگر^۲، ابراهیم امیری^۳، مرتضی کمالی^۴، محمد مهدی نخبوانی مقدم^۵

۱- استادیار، مؤسسه تحقیقات برنج کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، رشت، ایران

۲- دانشیار، مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران

۳- استاد، گروه مهندسی آب، واحد لاهیجان، دانشگاه آزاد اسلامی، لاهیجان، ایران

۴- کارشناس، مؤسسه تحقیقات برنج کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، رشت، ایران

۵- استادیار، مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: mrezaei@yahoo.com

چکیده

کلمات کلیدی

سنجش از دور،
شالیزار،
مدل،
DSSAT
ORYZA2000

بررسی سناریوهای بهره‌وری آب در کشت برنج با استفاده از مدل‌های رشد گیاهی در سطح مزرعه غالباً از دقت بالایی برخوردار هستند. اما به‌کارگیری این مدل‌ها در سطوح وسیع با توجه به عدم همگنی شرایط محیطی و مدیریتی مؤثر بر رشد گیاه، دقت شبیه‌سازی را کاهش خواهد داد. استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و سنجش از دور به عنوان راهی برای کاهش خطای این مدل‌ها در سطوح وسیع مطرح شده است. این پژوهش با هدف بررسی نقش داده‌های ماهواره‌ای در افزایش دقت مدل‌های DSSAT و ORYZA2000 برای شبیه‌سازی عملکرد شلتوک در اراضی شالیزاری منطقه صومعه‌سرای استان گیلان انجام شد. برای واسنجی و اعتبارسنجی این مدل‌ها در سطح مزرعه از داده‌های مربوط به تحقیقات انجام شده در مؤسسه تحقیقات برنج کشور استفاده شد. سپس تعداد ۴۴ شالیزار در سطح شهرستان صومعه‌سرا انتخاب و مدل‌ها در دو حالت بدون/با به‌کارگیری داده‌های ماهواره‌ای اجرا و مقایسه شد. در نهایت با تعریف چهار سناریوی ارتفاع آبیاری شامل ۲۵۰، ۳۰۰، ۳۵۰ و ۴۰۰ میلی‌متر و اعمال آن در مدل، سعی شد بالاترین بهره‌وری آب در این منطقه یافت شود. نتایج اجرای مدل‌ها نشان داد که مقادیر NRMSE برای مدل‌های ORYZA2000 و DSSAT در شرایط واسنجی به ترتیب ۱۱ و ۹ درصد و در شرایط اعتبارسنجی به ترتیب ۹ و ۸ درصد است. بنابراین هر دو مدل در سطح مزرعه از دقت قابل قبول و نزدیک به هم برخوردار هستند. اما در سطح وسیع، مقادیر NRMSE برای مدل‌های ORYZA2000 و DSSAT به ترتیب به ۲۳/۲ و ۲۱ درصد رسید که نشان‌دهنده افزایش قابل توجه در خطای مدل‌ها است. بکارگیری داده‌های ماهواره‌ای میزان NRMSE را در مدل ORYZA2000 به ۱۰/۸ و در مدل DSSAT به ۱۲/۷ درصد کاهش داد که قابل توجه بود. نتایج بررسی سناریوهای مصرف آب در ۴۴ شالیزار منتخب با استفاده از مدل ORYZA2000 نشان داد که بالاترین بهره‌وری آب در منطقه با ارتفاع آبیاری ۳۰۰ میلی‌متر در طول فصل زراعی به دست می‌آید که ۱۷ درصد کاهش عملکرد نیز در پی دارد، اما حداقل آب موردنیاز برای رشد برنج بدون کاهش عملکرد حدود ۴۰۰ میلی‌متر در طول فصل زراعی است.

مقدمه

حساسیت بالای محصولات کشاورزی به تغییرات آب و هوایی و کاهش منابع آب (پیاثو و همکاران، ۲۰۱۰)، بر اهمیت استفاده از سیستم‌های آبیاری کارآمدتر، کشت محصولات متحمل به کم‌آبی، و اجرای شیوه‌های کشاورزی پایدار برای مقابله با این چالش‌ها و تضمین امنیت غذایی تأکید دارد (پنگ و همکاران، ۲۰۲۳). کشت برنج یکی از مهم‌ترین فعالیت‌ها در بخش کشاورزی در سطح جهان است که غذای اصلی اکثریت جمعیت در حال رشد جهان را تولید می‌کند (پراتومچای و همکاران، ۲۰۱۸) و بنا بر گزارش مرکز تحقیقات بین‌المللی برنج میزان تولید برنج تا سال ۲۰۳۵ باید حداقل ۲۶ درصد افزایش پیدا کند (ایری، ۲۰۰۸). با توجه به مصرف ۵۰ درصدی آب برای آبیاری برنج در سطح جهان و وقوع تنش‌های آبی، یافتن راه‌های افزایش بهره‌وری آب در کشت این محصول ضروری است (سوئی و همکاران، ۲۰۱۸؛ بومن و همکاران، ۲۰۰۷).

بهره‌وری آب شاخصی است که نشان‌دهنده مدیریت مؤثر آب در دستیابی به کشاورزی پایدار است (فتیما، ۲۰۱۸). این شاخص تحت تأثیر عوامل متعددی مانند نوع رقم، شرایط اقلیمی، رژیم‌ها و سامانه‌های آبیاری، مدیریت آب و فعالیت‌های زراعی (موجید و مینودین، ۲۰۲۱؛ سای و رزگرن، ۲۰۰۳) بوده و لذا ارزیابی سناریوهای مختلف مدیریتی و تعیین مدیریت بهینه زراعی مستلزم انجام تحقیقات گسترده است. در این راستا، محققین از روش‌های مختلفی برای ارزیابی سناریوهای مختلف عوامل یاد شده بر بهره‌وری آب در کشت برنج استفاده کرده‌اند (نیسار و آرورا، ۲۰۱۸؛ یداو و همکاران، ۲۰۱۲؛ ژو و همکاران، ۲۰۰۸؛ آرورا، ۲۰۰۵). روش مرسوم آبیاری در کشت برنج، غرقاب دائم است که به انتشار گازهای گلخانه‌ای، پایین آمدن راندمان مصرف مواد مغذی و بهره‌وری پایین آب منجر می‌شود (ریچاردز و ساندز، ۲۰۱۴). از این رو نیاز است تا روش‌هایی کم‌مصرف‌تر، اقتصادی و سازگار با محیط زیست در آبیاری برنج مورد بررسی و پژوهش قرار گیرد (ایشفق و همکاران، ۲۰۲۰).

آزمایش‌های مزرعه‌ای راهکارهای بسیار مؤثری برای بررسی گزینه‌های مدیریتی در بهبود عملکرد گیاه تحت شرایط محدودیت آبی بوده و قادرند درک خوبی از رابطه آب-خاک-گیاه-اتموسفیر و اثراتشان بر عملکرد دانه و سایر واکنش‌های مهم فنولوژیکی و فیزیولوژیکی گیاه ارائه دهند. اما با توجه به هزینه‌بر بودن و زمان‌بر بودن این آزمایش‌ها در مواردی نظیر تعیین مقدار

بهینه آب و کود، معمولاً برای چنین اهدافی از مدل‌های واسنجی شده استفاده می‌شود. این مدل‌ها را می‌توان برای ارزیابی مطالعات تجربی و تصمیم‌گیری در مدیریت سیستم به کار برد (سعادت و همکاران، ۲۰۱۱). داده‌ها و اطلاعات به دست آمده از آزمایش‌ها مزرعه‌ای را نیز می‌توان در توسعه، واسنجی، و اعتبارسنجی مدل‌ها به کار گرفت (سندهو و ایرماک، ۲۰۱۹).

در دهه‌های اخیر، مدل‌های رشد گیاهی^۱ به عنوان ابزار تحقیقاتی مهم در توسعه علوم کشاورزی، به شکل گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته‌اند (هوآی و همکاران، ۲۰۲۴). مدل ORYZA2000 اختصاصاً برای استفاده در تحقیقات برنج توسعه داده شده و به شکل گسترده‌ای در مناطق مختلفی از جهان (کواکیتا و همکاران، ۲۰۲۳؛ یو و سیو، ۲۰۲۲؛ یوان و همکاران، ۲۰۱۷؛ لی و همکاران، ۲۰۱۱) و ایران (اعلایی بازکیایی و همکاران، ۱۳۹۹؛ امیری و همکاران، ۱۳۹۰) برای شبیه‌سازی رشد و عملکرد برنج مورد استفاده قرار گرفته است. مدل DSSAT نیز یکی از معروف‌ترین و پراستفاده‌ترین مدل‌ها است که برای بیش از ۲۰ گیاه زراعی مختلف به همراه برنامه‌های رایانه‌ای در یک بسته نرم‌افزاری جمع شده‌اند (سلطانی و هوگنبوم، ۲۰۰۷). توانایی و دقت این مدل و نرم‌افزار CERES-Rice که بخش شبیه‌ساز رشد گیاه برنج است برای برآورد عملکرد آن به اثبات رسیده است (امیری و همکاران، ۲۰۱۳؛ دننه و همکاران، ۲۰۰۸).

نتایج تحقیقات نشان داده است که مدل‌های رشد گیاهی در سطح نقطه‌ای و مزرعه‌ای از دقت قابل‌قبولی برخوردار هستند (ویکارمپارهارن و کوزیتساکولچای، ۲۰۱۰)، ولی دقتشان در سطوح وسیع به دلیل عدم همگنی شرایط محیطی و مدیریتی کاهش می‌یابد (دواتگر، ۱۳۸۹). برای حل این مشکل می‌توان از داده‌های سنجش از دور و استخراج شاخص‌های گیاهی^۲ متناسب با منطقه و پوشش زمین کمک گرفت (رضایی و همکاران، ۲۰۱۶؛ بادسار و همکاران، ۱۳۹۶). شاخص‌های گیاهی به دست آمده از تصاویر سنجش از دور را می‌توان در تخمین شاخص سطح برگ^۳ و مدل کردن عملکرد محصول استفاده کرد (علی و ابولگار، ۲۰۱۹؛ وانگ و همکاران، ۲۰۱۴؛ ژائو و همکاران، ۲۰۱۳).

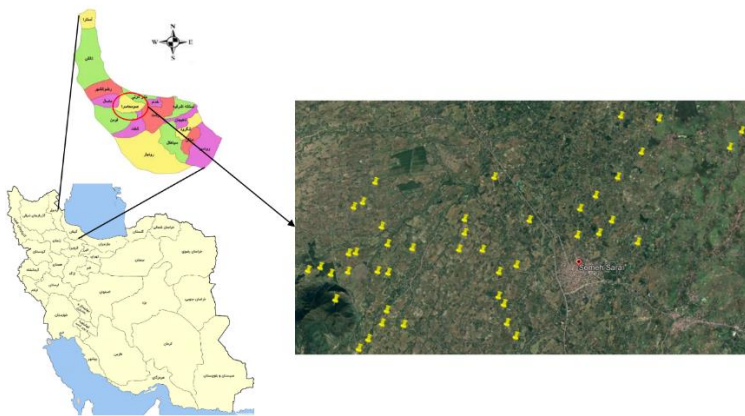
از آنجا که بیشتر تحقیقات انجام شده در زمینه مدل‌سازی عملکرد شلتوک به صورت نقطه‌ای و در مقیاس کوچک و شرایط کاملاً همگن صورت گرفته، تعمیم این نتایج به سطوح وسیع‌تر به دلیل از بین رفتن همگنی در شرایط مدیریت کشاورزی و آبیاری، نوع خاک و سایر عوامل مؤثر، نیازمند استفاده از روش‌های نوین

³ Leaf Area Index

¹ Crop Growth Models

² Vegetation indices

اطلاعات مربوط به آب، خاک، هوا و گیاه و نیز تاریخ و روش عملیات زراعی بود که از داده‌های ۴ سال اول برای واسنجی و از داده‌های دو سال آخر برای اعتبارسنجی مدل‌ها استفاده شد. ارتفاع محل نمونه‌برداری از سطح دریا ۲۴ متر و در عرض ۳۷ درجه و ۲۰ دقیقه شمالی و طول ۴۹ درجه و ۶۴ دقیقه شرقی قرار دارد. نمونه آب و خاک محل اجرای پروژه برای تجزیه به آزمایشگاه ارسال شد (جداول ۱ و ۲). تمام عملیات زراعی طبق عرف منطقه اجرا و یادداشت‌برداری‌ها نیز طبق استانداردهای زراعی انجام گرفت. داده‌های هواشناسی شامل داده‌های روزانه حداقل و حداکثر دما، مقدار بارندگی، ساعات آفتابی و رطوبت نسبی از ایستگاه هواشناسی کشاورزی رشت با مختصات طول جغرافیایی ۴۹/۳۹ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۷/۱۲ درجه شمالی و ارتفاع ۲۴/۹ متر اخذ شد.



شکل ۱- موقعیت استان گیلان، شهرستان صومعه‌سرا و مزارع برداشت‌شده.

پارامترهای اعمال شده در مدل‌ها

تمامی اجزای مدل ORYZA2000 در ساختار مدل ارائه شده وجود دارد؛ از این رو کاربر می‌تواند در هر یک از این مؤلفه‌ها تغییری ایجاد کند. باین‌حال حدود ۱۰ درصد از پارامترهای گیاهی برای هر رقم، ویژه است و سایر پارامترها برای تمامی ارقام برنج مشابه است. پارامترهایی که نیاز به واسنجی دارند عبارتند از سطح ویژه برگ، ضرایب توزیع ماده خشک، سرعت رشد نسبی سطح برگ، سرعت مرگ برگ، سرعت توسعه فنولوژیکی و کسر ذخیره ساقه. تعدادی از این پارامترها در جدول ۳ ارائه شده است.

ضرایب ژنتیکی استفاده شده در مدل DSSAT نیز در جدول ۴ ارائه شده است. پارامترهای این جدول به شرح ذیل است: G_1 تعداد خوشه‌چه (سنبلک) در شرایط بدون محدودیت نور، آب و مواد مغذی و نبود آفات و بیماری‌ها، G_2 وزن تک دانه در شرایط رشد بدون محدودیت نور، آب و مواد مغذی و نبود آفات و

در تعیین عملکرد است. هدف پژوهش حاضر افزایش دقت مدل‌های ORYZA2000 و DSSAT در شبیه‌سازی عملکرد شلتوک و بهره‌وری آب در سطح وسیع با استفاده از داده‌های سنجش از دور و تعیین بهینه‌ترین مقدار مصرف آب آبیاری در منطقه مورد مطالعه است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه شامل ۴۴ مزرعه منتخب در سطح شهرستان صومعه‌سرای استان گیلان واقع در $49^{\circ} 15'$ تا $49^{\circ} 33'$ شرقی و عرض جغرافیایی $37^{\circ} 15'$ تا $37^{\circ} 25'$ شمالی بودند (شکل ۱). در این شهرستان حدود ۲۶ هزار هکتار اراضی شالیزاری وجود دارد که عموماً برنج رقم محلی هاشمی در آن‌ها کشت می‌شود. مختصات هر مزرعه با دستگاه موقعیت‌یاب برداشت شد. اطلاعات خاکشناسی هر مزرعه با برداشت نمونه خاک از هر مزرعه و تجزیه فیزیکی و شیمیایی آن‌ها به دست آمد. ناحیه مورد مطالعه از نظر اقلیمی مشابه محل مؤسسه تحقیقات برنج کشور واقع در رشت است. لذا برای اجرای مدل‌ها از اطلاعات هواشناسی نزدیک‌ترین ایستگاه هواشناسی (ایستگاه هواشناسی کشاورزی رشت) استفاده شد. اطلاعات مدیریت زراعی شامل روز خزان‌گیری، تعداد روز در خزان، تعداد نشاء در کپه، تعداد کپه در مترمربع، تاریخ‌های کاشت، نشاکاری، ۵۰ درصد گلدهی و رسیدگی، و میزان مصرف کود، از طریق بازدید میدانی و پرسشنامه از کشاورزان طی سال ۱۳۸۶ تهیه شد. در نهایت عملکرد شلتوک، در این مزارع نمونه‌برداری و اندازه‌گیری شد. اطلاعات مصرف آب از شرکت آب منطقه‌ای استان گیلان اخذ و به عنوان پارامتر در مدل‌ها وارد شد. طبق این اطلاعات، میزان کمینه، بیشینه و میانگین آب مصرفی در مزارع نمونه‌برداری شده به ترتیب معادل ۲۴۰، ۷۴۲ و ۴۶۵ میلیمتر در طول فصل زراعی بود. مدل‌ها در هر یک از این مزارع اجرا و خروجی مدل شامل میزان عملکرد شلتوک با مقدار اندازه‌گیری شده آن مقایسه گردید.

واسنجی و اعتبارسنجی مدل‌ها

اطلاعات موردنیاز برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل‌های ORYZA2000 و DSSAT از تحقیقات قبلی انجام شده در اراضی مؤسسه تحقیقات برنج ایران واقع در رشت طی سال‌های ۱۳۸۱ تا ۱۳۸۶ اخذ شد. جزییات انجام این تحقیقات در گزارش‌های نهایی طرح‌های پژوهشی آورده شده است (رضایی، ۱۳۸۷؛ رضایی و نوری، ۱۳۸۱). این داده‌ها شامل میزان نهاده‌های کشاورزی،

بیماری‌ها، G₃ ضریب پنجه‌زنی، G₄ ضریب مقاومت دما، P₂R درجه-روز تاخیر در تشکیل خوشه به ازای هر ساعت افزایش طول روز بیشتر از P₁، P₂O درجه-روز در دوره رشد پایه از ابتدای درجه-روز تا انتهای دوره رشد رویشی، P₅ درجه-روز از شروع پرشدن دانه تا رسیدگی فیزیولوژیکی و P₂O طول روز بحرانی که حداکثر رشد در آن رخ می‌دهد.

جدول ۱- نتایج تجزیه خاک مزرعه تحقیقاتی تا عمق زراعی.

درصد اشباع	EC (dS.m ⁻¹)	واکنش آب	درصد نیتروژن کل	فسفر قابل جذب (میلی گرم بر کیلوگرم خاک)	پتاسیم قابل جذب (میلی گرم بر کیلوگرم خاک)	بافت خاک
۷۵	۱/۱۲	۷/۴	۰/۱۸۹	۱۷/۸	۲۸۰	رس سیلتی

جدول ۲- نتایج تجزیه آب آبیاری در مزرعه تحقیقاتی.

EC (dS.m ⁻¹)	TDS (ppm)	pH	کربنات (meq.l ⁻¹)	بی کربنات (meq.l ⁻¹)	کلر (meq.l ⁻¹)	سولفات (meq.l ⁻¹)	کلسیم (meq.l ⁻¹)	منیزیم (meq.l ⁻¹)	سدیم (meq.l ⁻¹)	SAR	کلاس آب
۱	۵۹۸	۷/۳	۱/۲	۴/۶	۴/۴	۰/۴۲	۴/۲	۱/۸	۵/۴	۳/۱	C3S1

جدول ۳- اطلاعات گیاهی: ضرایب تخصیص گیاه، سطح ویژه و سرعت مرگ برگ در مدل ORYZA2000.

مرحله رشدی گیاه (DVS)	سرعت مرگ برگ (DRLVT)	عامل تفکیک اندام هوایی به برگ (FLVTB)	عامل تفکیک اندام هوایی به ساقه (FSTTB)	عامل تفکیک اندام هوایی به سنبله (FSOTB)	سطح ویژه برگ در طول دوره رویش (SLATB)
۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۳۶۸	۰/۶۳۲	۰/۰۰	۰/۰۰۳۲
۰/۴۳	۰/۰۰	۰/۳۶۸	۰/۶۳۲	۰/۰۰	۰/۰۰۳۲
۰/۵	۰/۰۳۵	۰/۵۹۵	۰/۴۰۵	۰/۰۰	۰/۰۰۲۹
۰/۶	۰/۰۶۷	۰/۴۱۳	۰/۵۸۷	۰/۰۰	۰/۰۰۲۶
۰/۷	۰/۰۷۹	۰/۰۰	۰/۶۵	۰/۳۵	۰/۰۰۲۳
۱/۵	۰/۰۷۹	۰/۰۰	۰/۰۰	۱/۰۰	۰/۰۰۱۲

در مراحل رشد DVS=۰ مرحله جوانه‌زنی و DVS=۱/۵ برابر رسیدگی فیزیولوژی است.

جدول ۴- ضرایب ژنتیکی مشاهده شده در برنج رقم هاشمی.

P ₁	P ₅	P ₂ R	P ₂ O	G ₁	G ₂	G ₃	G ₄
(GDD)	(GDD)	(GDD)	(h)		(g)		
۳۵۰	۳۵۰	۲۰	۱۳/۵	۵۴	۰/۰۲۵	۱	۱

شد. از این رو سناریوهای تغییر ارتفاع آب آبیاری (بدون در نظر گرفتن آب مورد نیاز برای آماده‌سازی زمین) شامل ۲۵۰، ۳۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ میلیمتر در نظر گرفته شد و برنامه آبیاری در تمامی مزارع انتخاب شده شهرستان صومعه‌سرا بر اساس این سناریوها وارد مدل‌ها شد تا میزان عملکرد شلتوک و بهره‌وری آب در این مزارع بر اساس آن‌ها برآورد شود.

شاخص‌های آماری

برای ارزیابی توانایی مدل‌ها در شبیه‌سازی عملکرد شلتوک برنج، از شاخص‌های آماری جذر مجموع مربعات خطا (RMSE) و جذر مجموع مربعات خطا نرمال شده (NRMSE) و نیز ضریب رگرسیونی خطی (R^2) مقادیر اندازه‌گیری شده در برابر مقادیر شبیه‌سازی شده استفاده شد. این شاخص‌ها با استفاده از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$RMSE = \sum_{i=1}^n \left(\frac{(P_i - O_i)^2}{n} \right)^{0.5} \quad (4)$$

$$NRMSE = 100 \left(\sum_{i=1}^n \left(\frac{(P_i - O_i)^2}{n} \right)^{0.5} \right) / \bar{O} \quad (5)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (6)$$

که در این روابط: P_i مقدار شبیه‌سازی شده مدل، O_i مقدار اندازه‌گیری شده واقعی، n تعداد اندازه‌گیری واقعی، $\bar{O}$ میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده است.

دامنه مقادیر حاصل از RMSE از صفر تا مثبت بی‌نهایت متغیر است و همچنین واحد اندازه‌گیری یکسانی با متغیر وابسته یا هدف دارد. پایین بودن مقدار RMSE نشان‌دهنده این است که مدل به‌خوبی بر داده‌ها برازش شده و پیش‌بینی‌ها دارای دقت بالایی است. چنانچه NRMSE کمتر از ۱۰ باشد نشان‌دهنده حالت عالی شبیه‌سازی و بین ۲۰-۱۰ حالت خوب، بین ۳۰-۲۰ حالت متوسط و بالای ۳۰ حالت ضعیف شبیه‌سازی است. بازه تغییرات R^2 نیز بین ۰ تا ۱ است. اگر

داده‌های سنجش از دور

داده‌های سنجش از دور از طریق تصاویر مربوط به سنجنده TM از ماهواره Landsat 5 و سنجنده ETM+ از ماهواره Landsat 7 در تاریخ‌های منطبق با مراحل زراعی برنج شامل مراحل گلدهی و رسیدگی تهیه گردید و شاخص LAI با استفاده از روابط ۱، ۲ و ۳ استخراج گردید و در اختیار مدل‌ها قرار گرفت تا دقت شبیه‌سازی آن‌ها افزایش یابد. شاخص LAI به صورت مساحت کل سطح یک طرف برگ گیاه در واحد سطح زمین تعریف می‌شود. برای تعیین شاخص LAI از روابط زیر استفاده می‌شود (رائو و همکاران، ۲۰۰۶):

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

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

$$LAI = -\ln \left(\frac{c_1 - SAVI}{c_2} \right) \times \frac{1}{c_3} \quad (3)$$

که در این روابط، ρ_{nir} ، ρ_{red} به ترتیب انعکاس در باند قرمز و مادون قرمز و ضرایب L ، $C1$ ، $C2$ ، $C3$ به ترتیب برابر ۰/۱، ۰/۹۱، ۰/۵۹ و ۰/۹۱ هستند. شاخص LAI شاخص سطح برگ، NDVI شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی و بیانگر نسبت بازتابش دو باند قرمز و مادون قرمز نزدیک است و از آنجایی که بیشترین میزان جذب کلروفیل در این دو باند اتفاق می‌افتد، ارتباط این نمایه با رشد گیاهان، پوشش گیاهی و زیست‌توده قابل توجیه است. همچنین شاخص SAVI پوشش گیاهی با انعکاس خاک است که تلاش می‌کند اثر بازتابش خاک بر بازتابش پوشش گیاهی در محاسبه NDVI را کاهش داده و یا در صورت امکان حذف نماید.

سناریوهای آبیاری

پس از تصحیح مدل‌ها با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، لازم است از آن‌ها در مدیریت آبیاری منطقه نیز استفاده شود. به همین منظور واکنش عملکرد شلتوک و بهره‌وری آب در منطقه ناشی از تغییر میزان آب با استفاده از مدل‌ها بررسی

ORYZA2000 از مقادیر ثابت به عنوان شاخص برداشت برنج استفاده می‌کند.

نتایج به دست آمده از برآورد عملکرد شلتوک در سطح ۴۴ مزرعه شهرستان صومعه‌سرا توسط مدل‌های ORYZA2000 و DSSAT و مقایسه آن با داده‌های مشاهده شده در جدول ۶ نشان داده شده است. بر اساس این جدول میانگین عملکرد شلتوک مشاهده شده در این مزارع معادل 3379 kg.ha^{-1} است. میزان کمینه و بیشینه عملکرد شلتوک منطقه نیز 2150 kg.ha^{-1} و 5259 kg.ha^{-1} است که بیانگر تنوع در نوع اراضی منطقه است. نحوی خزانه‌گیری و مدیریت در این دوره، تاریخ کاشت، مقدار کود، نحوی وجین، مبارزه با آفات و بیماری‌ها مقدار آب آبیاری، زمان اعمال تنش آبی، کیفیت آب و حتی اعمال یا عدم اعمال زهکشی میان فصلی اراضی شالیزاری بر مقدار عملکرد تأثیر مستقیم و غیرمستقیم دارند. عملکرد شبیه‌سازی شده توسط مدل‌ها بدون بکارگیری تصاویر ماهواره‌ای نشان می‌دهد بیشینه و کمینه عملکرد شلتوک برآورد شده به ترتیب معادل 2807 kg.ha^{-1} و 4099 kg.ha^{-1} برای ORYZA2000 و 2482 kg.ha^{-1} و 4150 kg.ha^{-1} برای DSSAT بوده است. مقدار بیشینه عملکرد نسبت به کمینه آن در هر دو مدل، بسیار کمتر از حد واقعی برآورد شده است. میانگین عملکرد شبیه‌سازی شده توسط مدل‌های ORYZA2000 و DSSAT نیز به ترتیب برابر 3351 kg.ha^{-1} و 3351 kg.ha^{-1} است که به میانگین عملکرد مشاهده شده در منطقه نزدیک است.

بر اساس جدول ۶ تصحیح ضرایب مدل‌ها از طریق ترکیب داده‌های LAI به دست آمده از تصاویر ماهواره‌ای با مدل‌ها، به نحو قابل‌ملاحظه‌ای باعث بهبود برآورد عملکرد شده است. به نحوی که اختلاف کمینه و بیشینه شبیه‌سازی شده با مقدار اندازه‌گیری شده به ترتیب برابر 50 kg.ha^{-1} و 654 kg.ha^{-1} در مدل ORYZA2000 و 63 kg.ha^{-1} و 379 kg.ha^{-1} در مدل DSSAT شد. همچنین مقدار شاخص‌های آماری RMSE و NRMSE به ترتیب از 783 kg.ha^{-1} و $23/2$ درصد به 366 kg.ha^{-1} و $10/8$ درصد در مدل ORYZA2000 و از 740 kg.ha^{-1} و 21 درصد به 451 kg.ha^{-1} و $12/7$ درصد در مدل DSSAT رسید. با

مقدار R^2 به یک نزدیک باشد، مدل داده‌ها را خوب برازش کرده است، در حالی که اگر همبستگی پایین (نزدیک به صفر) باشد، مدل برازش خوبی از داده‌ها ارائه نداده است.

نتایج و بحث

نتایج شاخص‌های آماری مربوط به مدل‌های ORYZA2000 و DSSAT در شرایط واسنجی و اعتبارسنجی در سطح مزرعه (مؤسسه تحقیقات برنج کشور) طبق جدول ۵ است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقادیر NRMSE برای مدل ORYZA2000 و DSSAT در شرایط واسنجی به ترتیب ۱۱ و ۹ درصد و در شرایط اعتبارسنجی به ترتیب ۹ و ۸ درصد به دست آمد که نشان می‌دهد دقت مدل DSSAT در شبیه‌سازی عملکرد شلتوک در شرایط مزرعه‌ای اندکی بالاتر است. مطالعات متعدد در سطوح کوچک نشان داد مدل DSSAT از توان بالایی در شبیه‌سازی شرایط محیطی که گیاه در آن رشد می‌کند و پاسخ عملکردی گیاهانی مانند گندم و جو (نائین و کرسبام، ۲۰۰۷) و ذرت (لیو و همکاران، ۲۰۱۱)، برنج (امیری و همکاران، ۲۰۱۳؛ احمد و همکاران، ۲۰۱۲؛ اگاروال و مل، ۲۰۰۲؛ چینگلینند و همکاران، ۲۰۰۱) برخوردار است. برتری نسبی دقت شبیه‌سازی این مدل در مقادیر مختلف آب آبیاری در مقایسه با مدل ORYZA2000 در پژوهش امیری و همکاران (۲۰۱۴) نیز مشاهده شد. به نظر می‌رسد فرآیند واسنجی مدل DSSAT به ویژه تعیین ضریب ژنتیکی رقم مورد مطالعه ممکن است دلیل اصلی برآورد دقیق‌تر عملکرد دانه در این پژوهش باشد (تیمسینا و هومفریز، ۲۰۰۶). DSSAT عملکرد دانه را با استفاده از مؤلفه‌های پویای عملکرد مانند ضریب تعداد سنبله‌ها بالقوه و وزن تک دانه برای هر رقم برنج شبیه‌سازی می‌کند. اما مدل ORYZA2000 بر اساس پنج مرحله فنولوژیکی شامل فاز اولیه، فاز حساس به دوره نوری، فاز نمو خوشه و فاز تولیدمثلی پایه گذاری شده و از نرخ رشد ثابت برای هر فاز استفاده می‌شود (آرورا، ۲۰۰۶). در این مدل محاسبه برخی از ثابت‌های سرعت رشد و ضرایب تقسیم‌بندی مانند سرعت فاز رشد خوشه یا سرعت رشد در فاز تولیدمثلی کاملاً دقیق نیست، زیرا تعیین زمان دقیق شروع و پایان هر مرحله بسیار دشوار است. همچنین مدل

با توجه به دقت بالاتر مدل ORYZA2000 پس از اعمال داده‌های ماهواره‌ای در سطح وسیع، از این مدل برای بررسی سناریوهای مدیریت آب آبیاری در منطقه استفاده شد. شکل ۲ عملکرد و بهره‌وری آب در مقابل تغییرات آب مصرفی در طی فصل رشد را برای مزارع نمونه‌برداری شده نشان می‌دهد. بر اساس این نمودار حداکثر بهره‌وری آب در مقدار آب مصرفی ۳۰۰ میلی‌متر به دست می‌آید، ولی این به معنی حدود ۱۷ درصد کاهش عملکرد است. همچنین مصرف آب به میزان ۳۵۰ میلی‌متر، ۱۰ درصد کاهش عملکرد را در پی دارد؛ اما از آنجایی که مصرف آب ۴۰۰ میلی‌متر در طول رویش هیچ‌گونه کاهش عملکردی را نشان نداد و مصرف بیشتر آب نیز باعث افزایش عملکرد نشده است، به همین دلیل توصیه کاربرد ۴۰۰ میلی‌متر مصرف آب در طول فصل رشد (بدون در نظر گرفتن آب مورد نیاز برای آماده‌سازی زمین) قابل قبول‌تر به نظر می‌رسد. مطالعات پیشین نیز نشان داد که دوره‌های آبیاری ۵ روزه (اعلایی بازکیایی و همکاران، ۱۳۹۸) و ۸ روزه (امیری و همکاران، ۱۳۹۰) با توجه به شرایط مختلف مدیریت زراعی نظیر تاریخ کاشت و میزان کود نیتروژن استفاده شده، قادرند ضمن داشتن عملکرد بالا، بهره‌وری آب را نیز افزایش دهند.

توجه به نتایج، هر چند عملکرد مدل DSSAT بدون استفاده از تصاویر ماهواره‌ای در سطح وسیع نسبت به مدل ORYZA2000 بهتر بود، اما کاهش خطای مدل ORYZA2000 پس از استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، قابل توجه‌تر است. استفاده از داده‌های سنجنش از دور برای تصحیح و افزایش صحت داده‌های شبیه‌سازی شده توسط مدل‌های رشد گیاهی در گزارشات متعدد مورد توجه قرار گرفته است. لزوم استفاده از ترکیب و بهینه‌سازی ضرایب مدل برای افزایش دقت شبیه‌سازی مدل‌ها باعث ایجاد روش‌ها و دستورالعمل‌های مختلفی در این زمینه شده است. در اکثر این مطالعات نتایج تأییدکننده اثر مناسب و مثبت ترکیب داده‌ها است (بای و همکاران، ۲۰۱۹؛ جین و همکاران، ۲۰۲۲). ژو و همکاران (۲۰۲۲) با استفاده از شاخص سطح برگ استخراج شده از تصاویر MODIS در مدل WOFOST، پیش‌بینی عملکرد گندم در سطح وسیع را به میزان قابل توجهی بهبود دادند. عبدی و همکاران (۱۴۰۰) توانستند با ترکیب داده‌های شاخص سطح برگ و تبخیر و تعرق با مدل SWAP، دقت مدل را در شبیه‌سازی عملکرد دانه افزایش دهند.

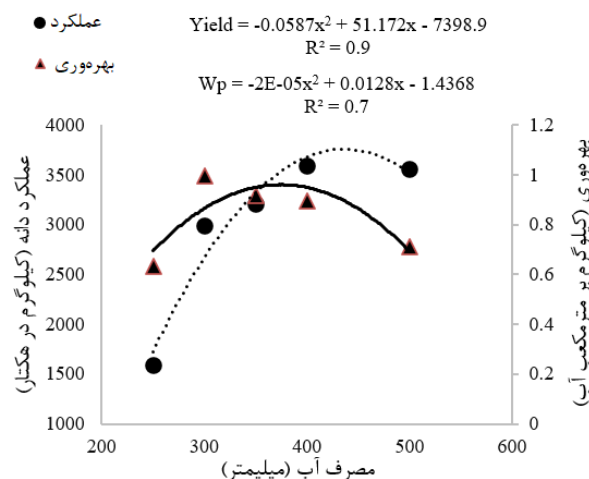
جدول ۵- شاخص‌های آماری در واسنجی و اعتبارسنجی مدل‌های ORYZA2000 و DSSAT.

مدل	تعداد نمونه	R ²	RMSE (kg.ha ⁻¹)	NRMSE (%)
واسنجی	۱۰	۰/۶۷	۴۶۴	۱۱
		۰/۷۵	۲۹۳	۹
اعتبارسنجی	۱۰	۰/۷۰	۴۰۹	۹
		۰/۸۲	۲۶۵	۸

جدول ۶- مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده عملکرد شلتوک (kg.ha⁻¹) در منطقه.

مقادیر مشاهداتی	حداقل	میانگین	حداکثر	RMSE (kg.ha ⁻¹)	NRMSE (%)	R ²
بدون استفاده از تصاویر ماهواره‌ای	۲۱۵۰	۳۳۷۹	۵۲۵۹	۷۸۳	۲۳/۲	۰/۳۲
	۲۸۰۷	۳۳۵۱	۴۰۹۹			
بدون استفاده از تصاویر ماهواره‌ای	۲۴۸۲	۳۲۸۷	۴۱۵۰	۷۴۰	۲۱	۰/۵۶
	۲۱۰۰	۳۲۴۷	۴۶۰۵			
ORYZA2000	۲۱۰۰	۳۲۴۷	۴۶۰۵	۳۶۶	۱۰/۸	۰/۸۲

۰/۷۲	۱۲/۷	۴۵۱	۴۸۸۰	۳۵۸۰	۲۰۸۷	DSSAT	با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای
------	------	-----	------	------	------	-------	---------------------------------



شکل ۲- عملکرد و بهره‌وری آب در مقابل تغییرات آب مصرفی در طی فصل رشد.

منابع مورد استفاده

Aalae Bazkiaee, P., Kamkar, B., Amiri, E., Kazemi, H. & Rezaei, M. (2021). Effect of irrigation management and planting date on yield and productivity of rice (*Oryza sativa* L.). *Journal of Crop Production*, 12(4), 157-170. [In Persian]. doi:10.22069/ejcp.2020.16513.2231

Aalae Bazkiaei, P., Kamkar, B., Amiri, E., Kazemi, H., & Rezaei, M. (2020). Evaluation of ORYZA2000 model in yield simulation and production productivity of rice under crop managements. *Journal of Water and Soil Conservation*, 27(1), 49-69. [In Persian]. doi: 10.22069/jwsc.2020.16036.3126

Abdi, A., Asadi Kapourchal, S., Vazifiedoust, M., Rezaei, M. and Egdernezhad, A. (2021). Investigation capability of updated SWAP model with satellite images and AquaCrop model in simulating the Hashemi rice yield in Guilan province. *Water Management in Agriculture*, 8(1), 89-102. [In Persian]. DOR: 20.1001.1.24764531.2021.8.1.8.6

Aggarwal, P.K., and Mall, R.K. (2002). Climate change and rice yields in diverse agro-environments of India. II. Effect of uncertainties in scenarios and crop models on impact assessment. *Climatic Change*, 52(3), 331-343. doi: 10.1023/A:1013714506779

نتیجه‌گیری کلی

استفاده از مدل‌های رشد گیاهی سبب شده تا بسیاری از محدودیت‌های موجود در آزمایش‌های مزرعه‌ای به میزان زیادی کاهش یابد و از سوی دیگر در وقت و هزینه نیز صرفه‌جویی گردد. اما با افزایش سطح اندازه‌گیری و تغییر در پارامترهایی نظیر شرایط خاک و مدیریت زراعی، دقت مدل نیز کاهش می‌یابد. نتایج مطالعه حاضر نشان داد که پس از واسنجی و اعتبارسنجی مدل‌های ORYZA2000 و DSSAT در سطح مزرعه، تعمیم آن به سطح وسیع‌تر با استفاده از داده‌های سنجنش از دور از طریق شاخص سطح برگ، نتایج شبیه‌سازی مدل‌ها را به شرایط واقعی نزدیک می‌سازد که نشان‌دهنده توانایی بالای تصاویر ماهواره‌ای در تصحیح دقت شبیه‌سازی مدل‌ها است. همچنین نتایج بررسی سناریوهای مصرف آب در مزارع منتخب شهرستان صومعه‌سرا با استفاده از مدل ORYZA2000 نشان داد در صورت استفاده از ۴۰۰ میلی‌متر آب در طول فصل رشد برنج، هیچ‌گونه کاهش عملکردی رخ نمی‌دهد که این میزان ۶۵ میلی‌متر کمتر از میانگین مصرف آب در کشت برنج در این منطقه است.

- Badsar, M., Kamkar, B., Soltani, A. & Abdi, O. (2017). Yield gap estimation in wheat-grown fields using GIS and RS approach and SSM model (A case study: Qaresso basin, Gorgan, Iran). *Cereal Research*, 7(2), 195-215. [In Persian]. doi: 10.22124/c.2017.2547
- Bai, L., Long, D., & Yan, L. (2019). Estimation of surface soil moisture with downscaled land surface temperatures using a data fusion approach for heterogeneous agricultural land. *Water Resources Research*, 55(2), 1105-1128. doi: 10.1029/2018WR024162
- Bouman, B.A., Humphreys, E., Tuong, T.P., & Barker, R. (2007). Rice and water. *Advances in agronomy*, 92, 187-237. doi: 10.1016/S0065-2113(04)92004-4
- Cai, X. & Rosegrant, M.W. (2003). World water productivity: Current situation and future options. In *Water Productivity in Agriculture: Limits and Opportunities for Improvement*; Kijne, J.W., Barker, R., Molden, D., Eds.; CABI: Wallingford, UK; International Water Management Institute (IWMI): Colombo, Sri Lanka, pp. 163-178.
- Cheyglinted, S., Ranamukhaarachchi, S. L., & Singh, G. (2001). Assessment of the CERES-Rice model for rice production in the Central Plain of Thailand. *The Journal of Agricultural Science*, 137(3), 289-298. doi: 10.1017/S0021859601001319
- Cui, Z., Zhang, H., Chen, X., Zhang, C., Ma, W., Huang, C., & Dou, Z. (2018). Pursuing sustainable productivity with millions of smallholder farmers. *Nature*, 555(7696), 363-366. doi: 10.1038/nature25785
- Davatgar, N. (2010). Predicting rice plant performance under water limitation conditions using plant growth and development simulation models at a regional scale. PhD thesis in soil science, Faculty of Agriculture, University of Tabriz. 250 pages. [In Persian].
- Dente, L., Satalino, G., Mattia, F., & Rinaldi, M. (2008). Assimilation of leaf area index derived from ASAR and MERIS data into CERES-Wheat model to map wheat yield. *Remote sensing of Environment*, 112(4), 1395-1407. doi: 10.1016/j.rse.2007.05.023
- Ahmad, S., Ahmad, A., Soler, C.M.T., Ali, H., Zia-Ul-Haq, M., Anothai, J., ... and Hasanuzzaman, M. (2012). Application of the CSM-CERES-Rice model for evaluation of plant density and nitrogen management of fine transplanted rice for an irrigated semiarid environment. *Precision Agriculture*, 13, 200-218. doi: 10.1007/s11119-011-9238-1
- Ali, A. M., & Aboelghar, M. (2019). Comparative analysis of different methods of leaf area index estimation of Strawberry under Egyptian condition. *International Journal of Advanced Remote Sensing and GIS*, 8(1), 2963-2970. doi: https://doi.org/10.23953/cloud.ijarsg.405
- Amiri, E. & Rezaei, M. (2013). Evaluation of Water Balance Components and Water Productivity of Rice under Interval Irrigation and Nitrogen Fertilizer Conditions. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*. 4 (6): 306-315. [In Persian].
- Amiri, E., Rezaei, M. & Bannayan Awal, M. (2011). Evaluation of the Rice Growth Model ORYZA2000 under Nitrogen and Water Limited Conditions (Calibration and Validation). *Water and Soil*, 25(4), 757-769. [In Persian]. doi: 10.22067/jsw.v0i0.10206
- Amiri, E., Rezaei, M., Bannayan, M. & Soufizadeh, S. (2013). Calibration and Evaluation of CERES Rice Model under Different Nitrogen and Water Management Options in Semi-Mediterranean Climate Condition. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 44:1814-1830.
- Amiri, E., Rezaei, M., Rezaei, E. E., & 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. doi: 10.1080/01904167.2014.888750
- Arora, V.K. (2006). Application of a rice growth and water balance model in an irrigated semi-arid subtropical environment. *Agricultural Water Management*, 83: 51-57. doi: 10.1016/j.agwat.2005.09.004.

production. Nutrient cycling in agroecosystems, 89, 313-328. doi: 10.1007/s10705-010-9396-y

Mojid, M. A., & Mainuddin, M. (2021). Water-saving agricultural technologies: Regional hydrology outcomes and knowledge gaps in the eastern Gangetic Plains-A review. *Water*, 13(5), 636. doi: 10.3390/w13050636

Nain, A. S., & Kersebaum, K. C. (2007). Calibration and validation of CERES model for simulating water and nutrients in Germany Ajeet Singh Nain¹ and Kurt Christian Kersebaum. In *Modelling water and nutrient dynamics in soil-crop systems: Applications of different models to common data sets-Proceedings of a workshop held 2004 in Müncheberg, Germany* (p. 161). Springer Science & Business Media.

Nisar, S., & 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, 424-431. doi: 10.1007/s40003-018-0331-9

Peng, J., Liu, T., Chen, J., Li, Z., Ling, Y., De Wulf, A., & De Maeyer, P. (2023). The conflicts of agricultural water supply and demand under climate change in a typical arid land watershed of Central Asia. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 47, 101384. doi: 10.1016/j.ejrh.2023.101384

Piao, C., Peng, L., Zhou, L., Ma, D., Friedlingstein, L., Tan, Y., & Zhang, F. (2010). The impact of climate change on water resources and agriculture in China. *Nature*, 467(7311), 43-51. doi: 10.1038/nature09364

Prathumchai, K., Nagai, M., Tripathi, N. K., & Sasaki, N. (2018). Forecasting transplanted rice yield at the farm scale using moderate-resolution satellite imagery and the AquaCrop model: a case study of a rice seed production community in Thailand. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7(2), 73. doi: 10.3390/ijgi7020073

Rao, N.R., Garg, P.K., & Ghosh, S.K. (2006). Estimation and comparison of leaf area index of agricultural crops using IRS LISS-III and EO-1 Hyperion images. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 34(1): 69-78.

Fatimah, K. (2018). Evaluation of Agricultural Subsidies and the Welfare of Farmers; Malaysia Agricultural Subsidies Report 2018; IDEAS Policy Research Berhad: Kuala Lumpur, Malaysia: pp. 1-64.

Huai, H., Zhang, Q., Li, Z., Liang, L., & Tang, X., (2024). Analysis of Crop Irrigation Water Requirements and Water Scarcity Footprint in the Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on the GeoSim-AquaCrop Model. *Agronomy*, 14 (192): 1-12. doi: 10.3390/agronomy14010192

IRRI. (2008). Background Paper: The Rice Crisis: What Needs to Be Done? IRRI, Los Baños, Philippines, www.irri.org/12pp

Ishfaq, M., Farooq, M., Zulfikar, U., Hussain, S., Akbar, N., Nawaz, A., & Anjum, S. A. (2020). Alternate wetting and drying: A water-saving and ecofriendly rice production system. *Agricultural Water Management*, 241, 106363. doi: 10.1016/j.agwat.2020.106363

Jin, N., Tao, B., Ren, W., He, L., Zhang, D., Wang, D., & Yu, Q. (2022). Assimilating remote sensing data into a crop model improves winter wheat yield estimation based on regional irrigation data. *Agricultural water management*, 266, 107583.

Kawakita, S., Yamasaki, M., Teratani, R., Yabe, S., Kajiya-Kanegae, H., Yoshida, H., Fushimi, E. & Nakagawa, H. (2023). Dual ensemble approach to predict rice heading date by integrating multiple rice phenology models and machine learning-based genetic parameter regression models. *Agricultural and Forest Meteorology*. 334, 109821. doi: 10.1016/j.agrformet.2023.109821

Li, T., Humphreys, E., Gill, G., & Kukal, S. S. (2011). Evaluation and application of ORYZA2000 for irrigation scheduling of puddled transplanted rice in north west India. *Field Crops Research*, 122(2), 104-117. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.03.004

Liu, H. L., Yang, J. Y., Drury, C. A., Reynolds, W. D., Tan, C. S., Bai, Y. L., & Hooenboom, G. (2011). Using the DSSAT-CERES-Maize model to simulate crop yield and nitrogen cycling in fields under long-term continuous maize

- Grow model based on particle swarm optimization algorithm for rice grain yield assessment. *Journal of Applied Remote Sensing*, 8(1), 083674-083674. doi: 10.1117/1.JRS.8.083674
- Wikarmpapraharn, C. & Kositsakulchai E. (2010). Evaluation of ORYZA2000 and CERES-Rice Models under Potential Growth Condition in the Central Plain of Thailand. *Thai Journal of Agricultural Science*. 43: 17-29
- Xue, C., Yang, X., Bouman, B.A.M., Deng, W., Zhang, Q., Yan, W., Zhang, T., Rouzi, A. & Wang, H. (2008). Optimizing yield, water requirements, and water productivity of aerobic rice for the North China Plain. *Irrigation Science*, 26, 459–474. doi: 10.1007/s00271-008-0107-2
- Yadav, S., Li, T., Humphreys, E., Li, T., Gill, G. and Kukal S.S. (2012). Evaluation of tradeoffs in land and water productivity of dry seeded rice as affected by irrigation schedule. *Field Crops Research*. 128, 180-190. doi: 10.1016/j.fcr.2012.01.005
- Yu, Q., & Cui, Y. (2022). Improvement and testing of ORYZA model water balance modules for alternate wetting and drying irrigation. *Agricultural Water Management*, 271, 107802. doi: 10.1016/j.agwat.2022.107802
- Yuan, S., Peng, S., & Li, T. (2017). Evaluation and application of the ORYZA rice model under different crop managements with high-yielding rice cultivars in central China. *Field Crops Research*, 212, 115-125. doi: 10.1016/j.fcr.2017.07.010
- Zhao, Y., Chen, S. & Shen, S. (2013). Assimilating remote sensing information with crop model using Ensemble Kalman Filter for improving LAI monitoring and yield estimation. *Ecological modelling*. 270, 30–42.
- Zhuo, W., Fang, S., Gao, X., Wang, L., Wu, D., Fu, S., ... & Huang, J. (2022). Crop yield prediction using MODIS LAI, TIGGE weather forecasts and WOFOST model: A case study for winter wheat in Hebei, China during 2009–2013. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 106, 102668.
- Rezaei, M. (2008). The final report of the research project on the effect of intermittent irrigation and different amounts of nitrogen fertilizer on the yield of Hashemi local variety rice. Publications of Rice Research Institute of Iran. [In Persian].
- Rezaei, M. & Noori, M. (2002). Effect of irrigation interval on water use and rice yield in Guilan. 11th Seminar of Iranian National Committee on Irrigation and Drainage. Iran, Tehran. [In Persian].
- Rezaei, M., Shahnazari, A., Raeini Sarjaz, M., & Vazifiedoust, M. (2016). Improving agricultural management in a large-scale paddy field by using remotely sensing data in the CERES-Rice model. *Irrigation and drainage*, 65(2): 224-228. doi: 10.1002/ird.1961
- Richards, M. & Sander, B. (2014). Alternate wetting and drying in irrigated rice. IIRI CCAFS and Info Notes. http://www.agritech.tnau.ac.in/agriculture/pdf/cs_a_pdf/Alternate_wetting_and_drying_in_irrigate_d_rice_InfoNote.pdf
- Saadati, Z., Pirmoradian, N. & Rezaei, M. (2011). Calibration and validation of AquaCrop model in rice growth simulation under different irrigation managements. ICID 21st International Congress on Irrigation and Drainage, Tehran, Iran.
- Sandhu, R., & Irmak, S. (2019). Performance of AquaCrop model in simulating maize growth, yield, and evapotranspiration under rainfed, limited and full irrigation. *Agricultural Water Management*. 97 (11), 1838–1846. doi: 10.1016/j.agwat.2019.105687
- Soltani, A., & Hoogenboom, G. (2007). Assessing crop management options with crop simulation models based on generated weather data. *Field Crops Research*, 103(3), 198-207. doi: 10.1016/j.fcr.2007.06.003
- Timsina, J., & Humphreys. E. (2006). Performance of CERES-Rice and CERES-Wheat models in rice–wheat systems: A review. *Agricultural Systems*, 90: 5–31. doi: 10.1016/j.agsy.2005.11.007
- Wang, H., Zhu, Y., Li, W., Cao, W., & Tian, Y. (2014). Integrating remotely sensed leaf area index and leaf nitrogen accumulation with Rice