



University of Guilan
Faculty of Agricultural Sciences

Cereal Research

Vol. 14, No. 4, Winter 2025 (329-345)

doi: 10.22124/CR.2025.27758.1825

pISSN: 2252-0163 eISSN: 2538-6115



RESEARCH PAPER

OPEN ACCESS

Simulation of rice irrigation water productivity under different irrigation and nitrogen fertilizer managements

Samaneh Najafi¹, Mohammadreza Khaledian^{2*} and Mojtaba Rezaei³

1. M.Sc. Student, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran

2. Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran; and Department of Water Engineering and Environment, Caspian Sea Basin Research Center, Rasht, Iran (* Corresponding author: khaledian@guilan.ac.ir)

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

Comprehensive abstract

Introduction

Increasing irrigation water productivity is one of the key topics in food production in different countries of the world, especially in water-scarce countries such as Iran. Plant growth models, in addition to predicting yield, are capable of evaluating diversity and risks of different management scenarios. Plants modeling can lead to a reduction in the use of production resources by finding optimal management scenarios. The objective of this study was to simulate the physical water productivity, leaf area index and evapotranspiration of three rice genotypes under different irrigation and nitrogen fertilizer managements using the CERES-Rice model.

Materials and methods

This experiment was conducted with 36 treatments in a split-plot design based on randomized complete block design with three replications in the Rice Research Institute of Iran, Rasht, Guilan province, Iran, during two cropping years, 2017 and 2018. Irrigation management at four levels including permanent flood irrigation and intermittent irrigation with irrigation intervals of 7, 14, and 21 days was considered as the main factor, rice genotypes at three levels including the certified local variety Hashemi, line M5 and M12 line as the sub-factor, and nitrogen fertilizer at three levels including 60, 80 and, 100 kg/ha net nitrogen fertilizer as the sub-sub-factor. After harvest, grain yield was measured in kg/ha and then irrigation water productivity was calculated from the ratio of grain yield to water volume used. In this study, the plant growth model of CERES-Rice version 4.7.5 was used for modeling, and data from 2017 and 2018 were used to validate and calibrate the model, respectively. Graphical comparative methods and statistical indicators including root mean square error (RMSE), normalized root mean square error (NRMSE) and model efficiency (EF) were also used to evaluate the model performance.

Research findings

The results of this study showed that the predicted yields of the CERES-Rice model had a similar trend to the actual yields and the response to irrigation treatments was the same as the measured yields. The results of the simulation of water productivity under different irrigation and nitrogen fertilizer managements for data from 2005 to 2016 with the aim of evaluating water productivity in a long-term meteorological period revealed that the irrigation intervals of seven days at 100 kg/ha nitrogen fertilizer level was the best irrigation management for the studied years. The irrigation



intervals of 14 and 21 days at the level of 100 kg/ha nitrogen fertilizer also had more appropriate physical water productivity.

Conclusion

The results of water productivity modeling showed that a seven days irrigation interval at 100 kg/ha nitrogen fertilizer was the best irrigation interval. Therefore, the development of seven days intermittent irrigation and education and promotion of proper utilization by farmers are recommended to increase water productivity. Therefore, in order to increase water productivity, it is recommended to develop seven days intermittent irrigation and educate and promote proper utilization by farmers.

Keywords: Intermittent irrigation, Irrigation management, Plant models, Water shortage

Received: June 21, 2024

Accepted: January 29, 2025

Cite this article:

Najafi, S., Khaledian, M. R., & Rezaei, M. (2025). Simulation of rice irrigation water productivity under different irrigation and nitrogen fertilizer managements. *Cereal Research*, 14(4), 329-345. doi: [10.22124/CR.2025.27758.1825](https://doi.org/10.22124/CR.2025.27758.1825).



شبیه‌سازی بهره‌وری آب آبیاری برنج تحت مدیریت‌های مختلف آبیاری و کود نیتروژن

سمانه نجفی^۱، محمدرضا خالدیان^{۲*} و مجتبی رضایی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

۲- دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان و گروه پژوهشی مهندسی آب و محیط زیست پژوهشکده حوزه

آبی دریای خزر، رشت، ایران (* نویسنده مسئول: khaledian@guilan.ac.ir)

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

چکیده جامع

مقدمه: افزایش بهره‌وری آب آبیاری از جمله مسائل اساسی در تولید مواد غذایی در کشورهای مختلف جهان به‌ویژه در کشورهای کم‌آب نظیر ایران است. مدل‌های رشد گیاهی، علاوه بر پیش‌بینی عملکرد، توانایی ارزیابی تنوع و خطرات ناشی از سناریوهای مختلف مدیریتی را نیز دارا هستند. مدل‌سازی گیاهان می‌تواند منجر به کاهش استفاده از منابع تولید از طریق یافتن سناریوهای مدیریتی بهینه شود. هدف از اجرای این تحقیق، شبیه‌سازی بهره‌وری فیزیکی آب، شاخص سطح برگ و تبخیر و تعرق سه ژنوتیپ برنج تحت مدیریت‌های مختلف آبیاری و کود نیتروژن با استفاده از مدل CERES-Rice بود.

مواد و روش‌ها: این آزمایش با ۳۶ تیمار در قالب طرح کرت‌های دو بار خرد شده بر اساس طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در مؤسسه تحقیقات برنج کشور (رشت، استان گیلان) طی دو سال زراعی ۱۳۹۶ و ۱۳۹۷ انجام شد. مدیریت آبیاری در چهار سطح شامل آبیاری غرقاب دائم و آبیاری متناوب با دوره‌های آبیاری هفت، ۱۴ و ۲۱ روز به‌عنوان عامل اصلی آزمایش، ژنوتیپ برنج در سه سطح شامل رقم گواهی شده محلی هاشمی، لاین M5 و لاین M12 به‌عنوان عامل فرعی آزمایش و کود نیتروژن در سه سطح شامل ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ کیلوگرم نیتروژن خالص در هکتار به‌عنوان عامل فرعی آزمایش در نظر گرفته شد. پس از برداشت محصول، عملکرد دانه بر حسب کیلوگرم در هکتار اندازه‌گیری و سپس از نسبت عملکرد دانه به حجم آب مصرف شده، بهره‌وری آب آبیاری محاسبه شد. در این پژوهش از مدل رشد گیاهی CERES-Rice ویرایش 4.7.5 برای مدل‌سازی استفاده شد. همچنین، داده‌های سال ۱۳۹۶ برای اعتبارسنجی مدل و داده‌های سال ۱۳۹۷ برای واسنجی مدل مورد استفاده قرار گرفت. برای ارزیابی عملکرد مدل نیز از روش‌های مقایسه‌ای گرافیکی و شاخص‌های آماری شامل مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE)، مجذور میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) و کارایی مدل (EF) استفاده شد.

یافته‌های تحقیق: نتایج به‌دست آمده از این مطالعه نشان داد که عملکردهای پیش‌بینی شده مدل CERES-Rice روند مشابهی با عملکردهای واقعی داشتند و واکنش به تیمارهای آبیاری همانند مقادیر اندازه‌گیری شده عملکرد بود. نتایج حاصل از شبیه‌سازی بهره‌وری آب تحت مدیریت‌های مختلف آبیاری و کود نیتروژن برای داده‌های مربوط به سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۶ با هدف ارزیابی بهره‌وری آب در یک دوره آماری بلندمدت هواشناسی نشان داد که مدل دور آبیاری هفت روزه در سطح ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار کود نیتروژن، بهترین دور آبیاری برای سال‌های مورد مطالعه بود. دوره‌های آبیاری ۱۴ و ۲۱ روزه در سطح ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار کود نیتروژن نیز دارای بهره‌وری فیزیکی آب مناسب‌تری بودند.

نتیجه‌گیری: نتایج حاصل از مدل‌سازی بهره‌وری آب با استفاده از مدل CERES-Rice نشان داد که در سطح ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار کود نیتروژن، دور آبیاری هفت روزه بهترین دور آبیاری بود. بنابراین، توسعه آبیاری تناوبی هفت روزه و آموزش و ترویج بهره‌برداری صحیح توسط کشاورزان به‌منظور افزایش بهره‌وری آب توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: آبیاری تناوبی، کمبود آب، مدل‌های رشد گیاهی، مدیریت آبیاری

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۱۰

نحوه استناد به این مقاله:

نجفی، سمانه، خالدیان، محمدرضا، و رضایی، مجتبی. (۱۴۰۳). شبیه‌سازی بهره‌وری آب آبیاری برنج تحت مدیریت‌های مختلف آبیاری و کود نیتروژن. *تحقیقات غلات*، ۴ (۴)، ۳۲۹-۳۴۵. doi: [10.22124/CR.2025.27758.1825](https://doi.org/10.22124/CR.2025.27758.1825)

مقدمه

کمبود آب به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، همواره زمینه‌ای برای به‌وجود آمدن بحران‌های زیست-محیطی و اجتماعی است که بر همه جنبه‌های زندگی بشر تأثیر مستقیم دارد (Toset *et al.*, 2000). ارزیابی سامانه‌های منابع آب و اجرای راه‌بردهای مدیریتی مناسب نیازمند اطلاعات دقیق و کاملاً طبقه‌بندی شده‌ای است که میزان عرضه، تقاضا و مصرف را توصیف می‌کند. نیاز روزافزون به فراورده‌های کشاورزی، فشار بر زمین، آب و سایر نهاده‌های طبیعی باعث کاهش میزان بهره‌وری نهاده‌ها و منابع تولیدی شده است (Abrol & Sangar, 2006). آبیاری غرقاب داریم در شالیزار با راندمان آبیاری بسیار پایین باعث مصرف بیش از نیاز واقعی آب شده است. برای کاهش مصرف آب در آبیاری برنج، روش‌های آبیاری مختلفی به‌منظور کاهش آب ورودی به شالیزار وجود دارد که از آن جمله می‌توان به مدیریت‌های آبیاری غیرغرقاب در دوره رشد برنج اشاره کرد (Bouman & Tuong, 2001). نتیجه این مدیریت‌ها، بهبود بهره‌وری آب آبیاری و افزایش تولید محصول کشاورزی است. با کاهش مصرف آب در بخش کشاورزی می‌توان تخصیص آب بیشتری به سایر مصارف به‌ویژه به محیط زیست داد. ارائه راه کارهای مناسب به‌منظور مدیریت بهینه سیستم‌های کشاورزی، بدون انجام آزمایش‌های متعدد و هزینه‌بر، لازم و ضروری است (Godwin & Singh, 1998). می‌توان با استفاده از مدل‌های رشد گیاه بر اساس روابط ریاضی و در نظر گرفتن متغیرهای مؤثر بر عملکرد، روند تولید دانه را شبیه‌سازی کرد (Jones *et al.*, 2003). تا کنون تلاش‌های زیادی در خارج و داخل کشور با هدف شبیه‌سازی رشد گیاهان مختلف از جمله برنج طی فصل زراعی مختلف و برآورد عملکرد آن در شرایط تنش‌های آبی و کودی با استفاده از مدل‌های رشد گیاهی انجام شده است (Amiri *et al.*, 2014). مدل CERES-Rice یکی از معروف‌ترین و پر کاربردترین مدل‌ها برای شبیه‌سازی رشد گیاه برنج است (Jones *et al.*, 2003; Dente *et al.*, 2008). اطلاعات ورودی مورد نیاز، شامل موقعیت مکانی، اطلاعات هواشناسی، خاک‌شناسی، مدیریت زراعی، مصرف آب، کود و رقم گیاهی است که برای به‌کارگیری مدل در شرایط مختلف کاربرد دارند. نرم‌افزارهای کمکی موجود در مدل CERES-Rice (Singh *et al.*, 1990; Buresh *et al.*, 1991; Singh & Ritchie, 1993;

Ritchie *et al.*, 1987, 1998; Jones *et al.*, 2003) قادر هستند با استفاده از این اطلاعات رشد و نمو، توزیع و تجمع زیست‌توده، شاخص سطح برگ، رشد ریشه، ساقه، برگ و دانه را از زمان کاشت تا برداشت بر مبنای مراحل زمانی روزانه شبیه‌سازی و نتایج مدل را با مقادیر اندازه‌گیری شده مقایسه کنند (van Laar *et al.*, 1997; Hoang *et al.*, 2016).

با توجه به کمبود آب آبیاری در استان گیلان در فصل رشد برنج و نقش مهم کود نیتروژن در رشد گیاه و اثر مصرف آن بر آلودگی محیط زیست و همچنین معرفی ژنوتیپ‌های جدید برنج در کنار رقم‌های بومی، انجام یک مطالعه چند عاملی با در نظر گرفتن اثرات توأم عوامل مختلف نظیر مدیریت آبیاری، مدیریت مصرف کود نیتروژن و مقایسه ژنوتیپ‌های مختلف در مقیاس مزرعه و تکمیل آن با مدل‌های رشد گیاهی ضروری است. اگرچه مطالعات مختلفی در مورد اثر این عوامل بر بهره‌وری آب به‌صورت مستقل انجام شده است (Rezayati *et al.*, 2020; Rezaei *et al.*, 2022; Esmaelzadeh *et al.*, 2021). اما اثر توأمان آن‌ها کمتر مورد مطالعه قرار گرفته است. هدف مطالعه حاضر شبیه‌سازی اثرات هم‌زمان این عوامل بر عملکرد و بهره‌وری آب آبیاری برنج بود.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در اراضی تحقیقاتی موسسه تحقیقات برنج کشور واقع در کیلومتر چهار بزرگراه رشت-تهران با عرض جغرافیایی ۳۷ درجه و ۲۶ دقیقه و طول جغرافیایی ۴۹ درجه و ۵۵ دقیقه و با ارتفاع ۲۳ متر از سطح دریای آزاد انجام شد. این منطقه بر اساس تقسیم‌بندی اقلیمی آمبرژه و دومارتن دارای اقلیم بسیار مرطوب است (Fallah Ghalhari *et al.*, 2016). تمامی اطلاعات مورد نیاز برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل در قالب یک مطالعه مزرعه‌ای که طی سال‌های ۱۳۹۶ و ۱۳۹۷ در موسسه تحقیقات برنج کشور انجام شد، جمع‌آوری شدند. ابعاد مزرعه آزمایشی ۵۷ در ۳۳ متر (۱۸۸۰ متر مربع) و ابعاد کرت‌های آزمایشی سه در سه متر (نه متر مربع) بود و نشاهای برنج با فاصله ۲۰×۲۰ سانتی‌متر کاشته شدند. آزمایش به‌صورت کرت‌های دو بار خرد شده در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با ۳۶ تیمار و سه تکرار اجرا شد. مدیریت آبیاری در چهار سطح شامل آبیاری غرقاب دائم و آبیاری تناوبی با دوره‌های آبیاری هفت، ۱۴ و ۲۱

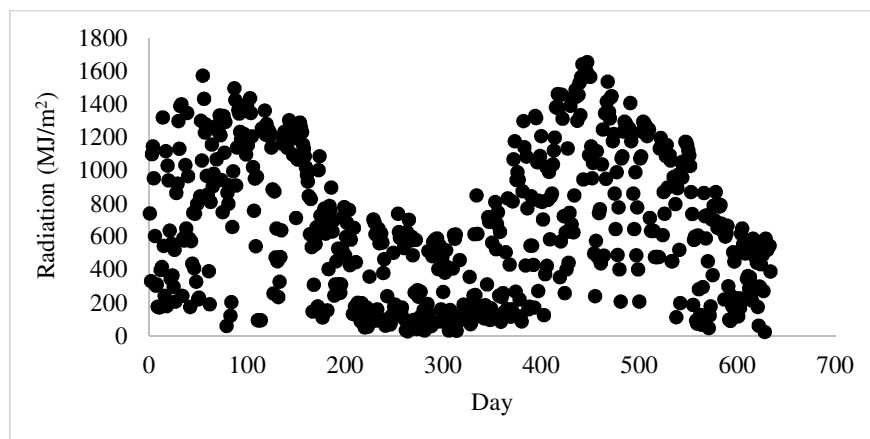
روزه در کرت‌های اصلی، رقم برنج در سه سطح شامل رقم بومی هاشمی و دو لاین اصلاح شده جدید M5 و M12 در کرت‌های فرعی و کود نیتروژن در سه سطح شامل ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار در کرت‌های فرعی قرار گرفتند.

برای مدل‌سازی از مدل رشد گیاهی CERES- Rice ویرایش 4.7.5 استفاده شد. برای این منظور، داده‌های سال ۱۳۹۶ برای اعتبارسنجی و از داده‌های سال ۱۳۹۷ برای واسنجی مدل مورد استفاده قرار گرفت. برای اطلاعات بیشتر در مورد آزمایش‌های مزرعه‌ای به نجفی و همکاران (Najafi et al., 2021) مراجعه شود. برای ورود اطلاعات هواشناسی از قبیل داده‌های روزانه مربوط به دمای بیشینه و کمینه، ساعات آفتابی و مقدار بارندگی، از داده‌های روزانه ایستگاه تحقیقات هواشناسی کشاورزی رشت که در مجاورت محل اجرای آزمایش قرار دارد، استفاده شد. مجموع بارندگی، متوسط ساعات آفتابی و بیشینه، کمینه و متوسط درجه حرارت منطقه طی دوره

رشد گیاه در سال‌های ۱۳۹۶ و ۱۳۹۷ در جدول ۱ و میزان تشعشع روزانه ورودی به مدل در شکل ۱ ارائه شده است. متوسط بیشینه و کمینه دمای مطلق سالانه در این منطقه به ترتیب ۲۹/۸ و ۶/۳ درجه سلسیوس است. برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک محل اجرای آزمایش که در آزمایشگاه موسسه تحقیقات برنج کشور تعیین شد نیز در جدول‌های ۲ و ۳ ارائه شده است. بافت خاک در لایه صفر تا ۲۰ سانتی‌متری، رسی و در عمق ۲۰ تا ۴۰ سانتی‌متری، رسی‌سیلت بود. به‌منظور واسنجی مدل، از نتایج پژوهش رضایی و همکاران (Rezaei et al., 2015) در مورد محاسبه ضرایب ژنتیکی رقم محلی هاشمی و همچنین داده‌های به‌دست آمده از آزمایش مزرعه‌ای سال ۱۳۹۷ در موسسه تحقیقات برنج کشور استفاده و به‌کمک بخش GENCAL مدل به‌روش سعی و خطا ضرایب ژنتیکی واسنجی‌شده رقم گواهی شده هاشمی و لاین‌های M5 و M12 محاسبه شد (جدول ۴).

جدول ۱- مجموع بارندگی ماهیانه، متوسط ساعت آفتابی و درجه حرارت طی دوره رشد گیاه در سال‌های ۱۳۹۶ و ۱۳۹۷
Table 1. Total monthly rainfall, average sunshine hours and temperature during the plant growth period in 2017 and 2018 years

		Maximum temperature (°C)	Minimum temperature (°C)	Average temperature (°C)	Rainfall (mm)	Sunshine (hour)
2017	May	26.25	16.56	21.4	13.61	6.38
	Jun	29.25	19.57	24.41	20.3	7.7
	July	31.94	21.42	26.68	2.4	8.30
	August	34.01	22.35	28.18	0.01	9.16
2018	May	26.8	16.14	21.47	34.4	6.29
	Jun	29.3	19.15	24.4	20.5	9.38
	July	33.38	24.12	28.75	32.62	7.86
	August	30.13	21.46	25.79	55	5.27



شکل ۱- میزان تشعشع خورشیدی روزانه اندازه‌گیری شده در ایستگاه تحقیقات هواشناسی کشاورزی رشت، ایران
Figure 1. Daily solar radiation measured at the Agricultural Meteorological Research Station, Rasht, Iran

جدول ۲- ویژگی‌های فیزیکی لایه‌های خاک مزرعه آزمایشی

Table 2. Physical characteristics of the soil layers of the experimental field

Depth (cm)	Clay (%)	Silt (%)	Sand (%)	Bulk density (gr/cm ³)	θ_{PWP} (cm ³ /cm ³)	θ_{FC} (cm ³ /cm ³)	K_{Sat} (cm/day)	θ_{Sat} (cm ³ /cm ³)
0-10	47	39	14	1.1	0.27	0.4	57.54	0.65
10-20	44	39	17	1.2	0.3	0.4	30.8	0.62
20-30	47	44	9	1.32	0.3	0.41	0.4	0.62
30-40	47	42	11	1.31	0.3	0.42	11.4	0.6

θ_{Sat} , moisture at saturation point; K_{Sat} , saturated hydraulic conductivity; θ_{FC} , moisture at field capacity; θ_{PWP} , moisture at permanent wilting point.

جدول ۳- ویژگی‌های شیمیایی خاک مورد مطالعه تا عمق ۱۵ سانتیمتری خاک

Table 3. Chemical characteristics of the studied soil up to 15 cm depth

pH	Organic carbon	Cation exchange capacity (meq/100g)	Total nitrogen (%)	Potassium (mg.kg ⁻¹)	Phosphorus (mg.kg ⁻¹)
7.34	1.36	35	0.137	311	10.6

جدول ۴- ضرایب ژنتیکی برای رقم گواهی شده هاشمی و لاین‌های M5 و M12 برنج[†]Table 4. Genetic coefficients for the certified Hashemi variety and M5 and M12 rice lines[†]

Rice cultivar	P1 (°C day)	P5 (°C day)	P2R (°C day)	P2O (hour)	G1	G2 (g)	G3	G4
Hashemi	350	355	34	13.5	65	0.026	1	1
M5	351	355	34	13.5	67	0.025	1	1
M12	349	355	34	13.5	70	0.024	1	1

[†] P1, GDD (growth degree day) at the vegetative stage; P5, GDD from the grain filling stage to physiological maturity; P2R, photoperiod sensitivity coefficient (response to day length); P2O, flowering period length; G1, number of grains per spike; G2, grain weight; G3, tillering coefficient; G4, heat tolerance coefficient.

بهره‌وری آب آبیاری شالیزار

برای بررسی بهره‌وری آب آبیاری از شاخص CPD استفاده شد. این شاخص در واقع نسبت مقدار محصول تولید شده (GY) به حجم آب آبیاری (IV) است (FAO, 2000). حجم آب آبیاری در جدول ۵ ارائه شده است.

$$CPD = \frac{GY}{IV} \quad (1)$$

ارزیابی مدل

عملکرد مدل CERES-Rice در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی در مقایسه با داده‌های مشاهده شده طی آزمایش مزرعه‌ای سال‌های ۱۳۹۶ و ۱۳۹۷ مورد ارزیابی قرار گرفت. عملکرد مدل بر اساس پیشنهاد بومن و فن‌لار (Bouman & van Laar, 2006) با استفاده از روش‌های مقایسه‌ای گرافیکی و شاخص‌های آماری انجام شد. ارزیابی قدرت مدل‌های مختلف در پیش‌بینی با استفاده از شاخص جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، شاخص جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) و شاخص کارایی مدل (EF) انجام شد. این آماره‌ها به ترتیب در روابط ۲، ۳ و ۴ ارائه شده‌اند:

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

$$NRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Pi - Oi)^2}{n}} \times \frac{100}{\bar{O}} \quad (3)$$

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^n (Oi - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^n (Pi - Oi)^2}{\sum_{i=1}^n (Oi - \bar{O})^2} \quad (4)$$

در این روابط، Pi مقدار شبیه‌سازی شده با مدل، Oi و $\bar{O}$ به ترتیب مقدار و میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده و n تعداد مشاهدات است.

نتایج و بحث

نتایج به‌دست آمده از ارزیابی مدل در شبیه‌سازی عملکرد رقم گواهی شده هاشمی طی مرحله واسنجی (سال ۱۳۹۷) نشان داد که مدل CERES-Rice قادر بود اثر دور آبیاری و کود نیتروژن را بر عملکرد دانه رقم هاشمی به‌خوبی شبیه‌سازی کند (جدول ۶ و شکل ۲). بر اساس نتایج مزرعه‌ای (Najafi et al., 2021)، در تیمار آبیاری غرقاب، با افزایش سطح کود نیتروژن از ۶۰ به ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار، عملکرد دانه در حدود ۲۷ درصد افزایش یافت. در شبیه‌سازی نیز نشان داده شد که عملکرد شبیه‌سازی شده و واکنش به تیمارهای کودی روندی نسبتاً مشابه با عملکرد واقعی داشت (شکل ۲).

جدول ۵- حجم آب آبیاری برحسب مترمکعب در هکتار در تیمارهای مختلف آبیاری در دو سال ۱۳۹۶ و ۱۳۹۷

Table 5. Irrigation water volume in cubic meters per hectare in different irrigation treatments in 2017 and 2018

Irrigation treatment	2017	2018
Permanent flood irrigation	6300	6700
Intermittent irrigation with 7 days intervals	4680	5350
Intermittent irrigation with 14 days intervals	3180	3850
Intermittent irrigation with 21 days intervals	2180	2850

با اعمال تناوب آبیاری هفت روزه در مشاهدات اندازه‌گیری شده، با افزایش مقدار کود نیتروژن، عملکرد دانه افزایش بیشتری نسبت به تیمار آبیاری غرقاب داشت که این افزایش در نتایج شبیه‌سازی نسبت به تیمار آبیاری غرقاب نیز مشاهده شد. ویلایونگ و همکاران (Vilayvong *et al.*, 2015) با هدف تعیین روش‌های مدیریت افزایش تولید برنج، مطالعه‌ای با استفاده از مدل CERES-Rice در لائوس انجام دادند. نتایج به‌دست آمده از ارزیابی مدل نشان داد که مقدار شاخص NRMSE بین داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهده شده عملکرد دانه در بازه یک تا ۱۶ درصد بود. نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل نیز نشان داد که در هر دو رقم مورد آزمایش با افزایش سطح کود از ۶۰ به ۱۲۰ کیلوگرم در هکتار، عملکرد دانه افزایش یافت. در پژوهش حاضر در دوره‌های آبیاری ۱۴ و ۲۱ روز، رقم گواهی شده هاشمی در مقادیر مشاهده‌ای عملکرد دانه نسبت به افزایش سطح کود نیتروژن از ۶۰ به ۸۰ کیلوگرم در هکتار افزایش و از ۸۰ به ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار کاهش یافت. این روند در نتایج شبیه‌سازی در سطوح کودی همواره به‌صورت افزایشی عمل کرده است، به عبارت دیگر با افزایش سطوح کودی، عملکرد دانه نیز افزایش یافته است، اما با افزایش دور آبیاری ۱۴ و ۲۱ روز از دقت مدل در شبیه‌سازی عملکرد دانه و کارایی مدل ($EF=0.77$) کاسته شد. مقایسه آماری نتایج واسنجی برای رقم هاشمی در جدول ۶ بیانگر عملکرد نسبتاً خوب مدل CERES-Rice برای شبیه‌سازی این رقم می‌باشد. در نتایج مشاهده‌ای رقم هاشمی در سال زراعی ۱۳۹۶ متاثر از تغییرات شرایط جوی، محیطی و مزرعه‌ای که باعث افزایش عملکرد دانه در سطوح آبیاری و کودی مشابه با سال زراعی ۱۳۹۷ به‌ویژه در تناوب آبیاری ۱۴ و ۲۱ روز شده است، این افزایش عملکرد دانه باعث کاهش کارایی مدل در نتایج اعتبارسنجی به مقدار ۰/۵۵ در سال ۱۳۹۶ شده است و دقت مدل در پیش‌بینی عملکرد دانه کاهش یافته است.

برای لاین M5 همان‌طور که در مقایسه نتایج آماری نشان داده شده است (جدول ۶)، مدل شبیه‌ساز برای این لاین نسبت به رقم هاشمی ضعیف‌تر عمل کرده است. نتایج مشاهدات برای شرایط آبیاری غرقاب در سطوح کودی مختلف نشان داد که با افزایش سطح کود از ۶۰ به ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن، عملکرد دانه افزایش یافت و مدل CERES-Rice تیمار آبیاری غرقاب در سطوح کودی ۶۰ تا ۱۰۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار را با دقت مناسب‌تری شبیه‌سازی کرده است. در شرایط تناوب آبیاری هفت روز نیز مانند رقم هاشمی با افزایش سطوح کودی روند افزایشی در عملکرد دانه مشاهده شد و نسبت به شرایط غرقاب عملکرد دانه افزایش یافت. در شبیه‌سازی این تیمار آبیاری نیز مدل همین روند را داشت. لاین M5 با توجه به ویژگی مقاومت به تنش خشکی، عملکرد دانه نسبتاً بالاتری نسبت به رقم هاشمی در سطوح آبیاری ۱۴ و ۲۱ روزه تولید کرد که البته این اختلاف از نظر آماری معنی‌دار نبود. دقت مدل در این تیمارها روند کاهشی داشت و مقادیر بالای RMSE و NRMSE و کاهش کارایی مدل ($EF=0.66$) بیانگر پایین‌تر بودن دقت مدل در شبیه‌سازی است. نتایج این مطالعه با نتایج مال و آگاروال (Mall & Aggarwal, 2002) که از مدل CERES-Rice برای پیش‌بینی عملکرد برنج در نقاط مختلف هند استفاده کردند، همخوانی داشت. آن‌ها نشان دادند که عملکرد پیش‌بینی شده ۱۵ درصد کم‌تر از مقدار واقعی بود. طبق تحقیقات انجام شده در کشور نیجریه (Akinbile, 2013) از مدل CERES-Rice برای شبیه‌سازی میزان رشد و عملکرد یک رقم جدید برنج به‌نام نریکا تحت تیمارهای مختلف آبیاری با توجه به میزان تبخیر و تعرق گیاه استفاده شد. نتایج آن‌ها نشان داد که تفاوت معنی‌داری بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده شده در تیمار آبیاری کامل (آبیاری به‌میزان ۱۰۰ درصد تبخیر و تعرق گیاه) وجود نداشت، اما در تیمارهای کم‌آبیاری با کاهش میزان آبیاری دقت شبیه‌سازی مدل کاهش پیدا کرد، به‌طوری که در تیمار آبیاری به‌میزان ۲۵

درصد تبخیر و تعرق گیاه، بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده شده اختلاف بسیار زیاد وجود داشت. همچنین، در پژوهش حاضر در مرحله اعتبارسنجی، با توجه به تغییرات جوی، محیطی و مزرعه‌ای در سال زراعی ۱۳۹۶، افزایش عملکرد دانه در سطوح آبیاری ۱۴ و ۲۱ روز موجب کاهش مقادیر RMSE و NRMSE و بنابراین افزایش دقت مدل در پیش‌بینی عملکرد شد (جدول ۶).

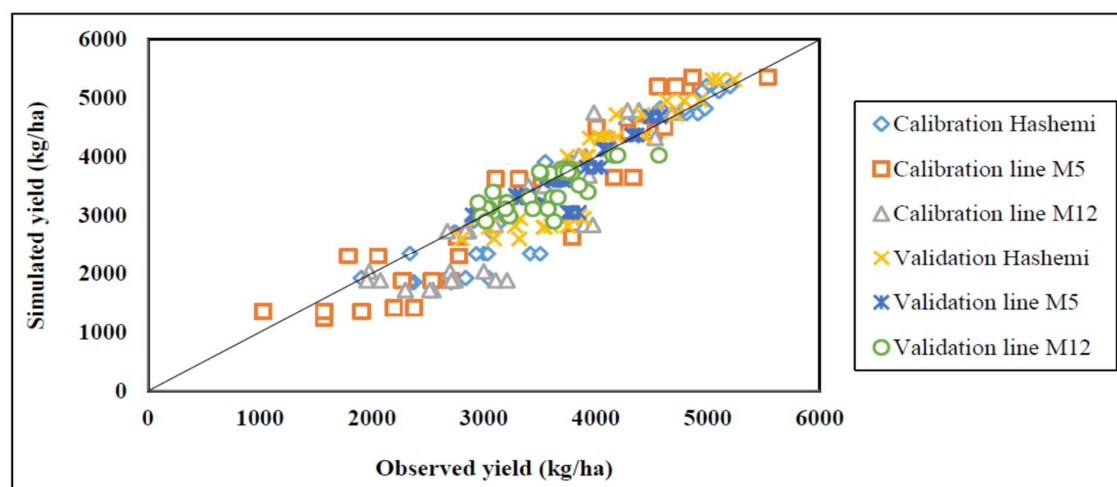
در مورد لاین M12 نیز نتایج نشان داد که دقت مدل CERES-Rice در شبیه‌سازی عملکرد دانه لاین M12 نسبت به رقم هاشمی کم‌تر و نسبت به لاین M5 بیش‌تر بود (جدول ۶). شبیه‌سازی این رقم در سطح آبیاری غرقاب در همه سطوح کود نیتروژن مورد مطالعه نزدیک به مقادیر اندازه‌گیری شده بود. این روند مشابه با روند رقم هاشمی و لاین M5 در شبیه‌سازی شرایط غرقاب در سطوح ۶۰ تا ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار کود نیتروژن بود. شبیه‌سازی در تناوب آبیاری هفت روزه نیز همانند عملکرد مشاهده شده بود، به این صورت که در عملکرد مشاهده

شده و شبیه‌سازی شده در تیمار آبیاری هفت روزه در دو سطح کودی ۸۰ و ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن، به‌جز سطح کود ۶۰ کیلوگرم در هکتار، بیش‌تر از تیمار آبیاری غرقاب بود. همچنین، عملکرد دانه مشاهده شده لاین M12 در دو تیمار آبیاری ۱۴ و ۲۱ روزه بیش‌تر از رقم هاشمی و لاین M5 بود. قابل ذکر است که اختلاف عملکرد بین رقم هاشمی و لاین‌های مورد مطالعه از نظر آماری معنی‌دار نبود. این نتایج در شبیه‌سازی مدل CERES-Rice سبب کاهش کارایی مدل ($EF=0/49$) شد. در مرحله اعتبارسنجی برای تیمار آبیاری غرقاب در همه سطوح کود نیتروژن مورد مطالعه، مدل با دقت خوبی عملکرد دانه را پیش‌بینی کرد. در تناوب آبیاری هفت روزه نیز مدل با اختلاف کمی نسبت به مقادیر مشاهده شده، عملکرد دانه را پیش‌بینی کرد، در تناوب آبیاری ۱۴ و ۲۱ روزه دقت پیش‌بینی مدل کم ($R^2=0/56$) و تفاوت بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده زیاد بود.

جدول ۶- مقایسه آماری نتایج واسنجی و اعتبارسنجی مدل CERES-Rice برای رقم هاشمی و لاین‌های مورد مطالعه

Table 6. Statistical comparison of the CERES-Rice model calibration and validation results for the Hashemi variety and the studied lines

Statistical indicator	Calibration 2018			Validation 2017			Average
	Hashemi	M5	M12	Hashemi	M5	M12	
RMSE (kg/ha)	473	717	572	466	254	276	489
NRMSE (%)	12.70	20.7	16.5	11.9	6.80	7.90	13.50
EF	0.77	0.66	0.49	0.55	0.67	0.57	0.64
R^2	0.90	0.80	0.81	0.82	0.78	0.56	0.83



شکل ۲- مقایسه عملکرد مشاهداتی و شبیه‌سازی شده ارقام برنج مورد مطالعه در دو مرحله واسنجی و اعتبارسنجی توسط مدل CERES-Rice

Figure 2. Comparison of the observed and simulated yield of the studied rice genotypes in the two stages of calibration and validation by the CERES-Rice model

وقت گیر بودن قرائت سطح برگ، سایر تیمارها مدنظر قرار نگرفتند. ضریب تبیین (R^2) رگرسیون خطی بین مقادیر شاخص سطح برگ اندازه گیری شده و شبیه سازی شده برای رقم هاشمی در حدود ۰/۸۱ و برای لاین M5 در حدود ۰/۸۰ به دست آمد که بیانگر مناسب بودن مدل در شبیه سازی شاخص سطح برگ در سطوح مختلف آبیاری بود (شکل های ۳ و ۴). در مطالعه ای که توسط کیم و همکاران (Kim et al., 2013) انجام شد، عملکرد مدل های CERES-Rice و Noah (MP) که به ترتیب یک مدل رشد گیاهی و یک مدل پوشش سطح زمین هستند، در شبیه سازی رشد و تبخیر و تعرق برنج از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۲ مقایسه شد. نتایج آن ها نشان داد که مدل Noah (MP) موفق به شبیه سازی الگوی تغییرات زمانی در شاخص سطح برگ نشد. دقت مدل Noah (MP) در شبیه سازی تبخیر و تعرق نیز به میزان ۲۱ درصد کمتر از مدل CERES-Rice و RMSE مدل Noah (MP) به میزان ۱/۸ برابر بزرگ تر از مدل CERES-Rice بود که نشان دهنده دقت قابل قبول مدل CERES-Rice در شبیه سازی بوده است. نتایج مشابهی توسط کیانی و همکاران (Kiani et al., 2016) در مورد توانایی مدل CERES-Rice در شبیه سازی ویژگی های مختلف برنج در سطوح مختلف کود گزارش شد. آن ها ضریب تبیین مدل شبیه سازی شاخص سطح برگ را ۰/۷۶ عنوان کردند که بیانگر دقت مناسب مدل در شبیه سازی بود.

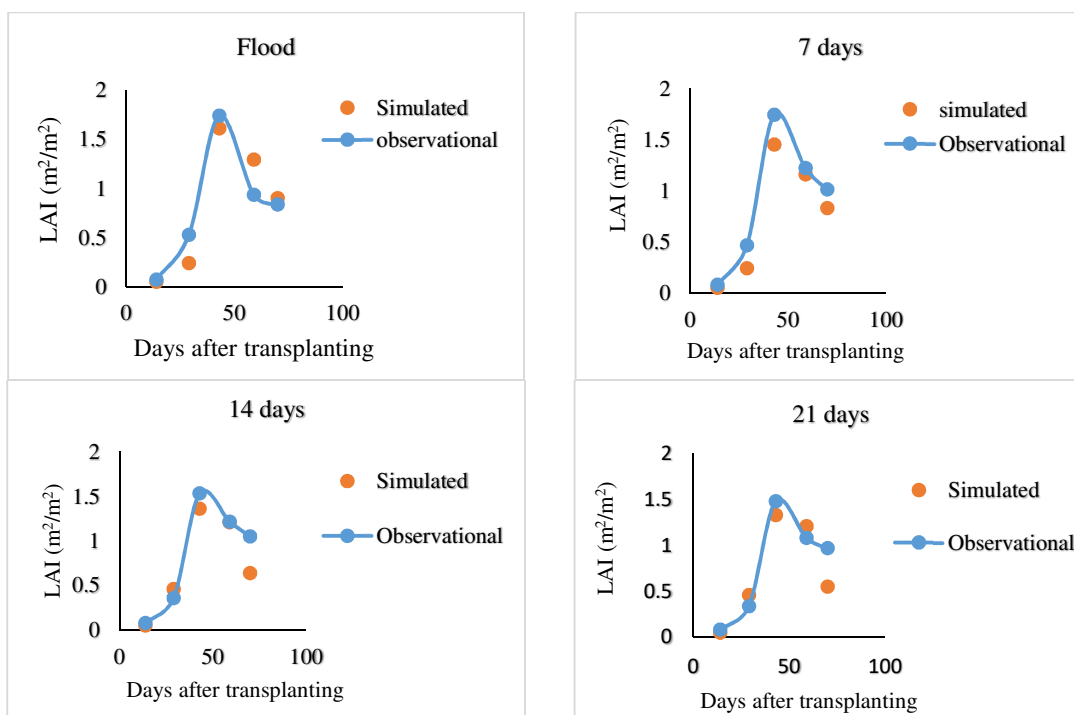
شبیه سازی بلندمدت رقم ها و تیمارهای مختلف آبیاری و کود نیتروژن مورد مطالعه

با توجه به نتایج قابل قبول به دست آمده از شبیه سازی مدل CERES-Rice در واسنجی داده ها در سال ۱۳۹۷ و اعتبارسنجی داده ها در سال ۱۳۹۶ برای ژنوتیپ های برنج مورد مطالعه در تیمارهای مختلف آب و کود، شبیه سازی بلندمدت داده های هواشناسی در دسترس از سال ۲۰۰۵ تا سال ۲۰۱۶ انجام شد. بر این اساس، پس از استخراج داده های هواشناسی مورد نیاز برای مدل CERES-Rice (شامل دمای کمینه و بیشینه، میزان بارش و تابش) از سال ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۶ به عنوان پارامترهای ورودی مدل، بهره وری فیزیکی آب و تبخیر و تعرق برنج (رقم هاشمی و لاین های M5 و M12) تحت مدیریت های مختلف آبیاری (غرقاب و تناوبی هفت، ۱۴ و ۲۱ روز) و کود نیتروژن (۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار) شبیه سازی شد.

به طور کلی نتایج به دست آمده از مقایسه مقادیر شبیه سازی شده و پیش بینی شده عملکرد دانه ارقام برنج در سطوح مختلف آبیاری در سال واسنجی نشان داد که مدل CERES-Rice به خوبی توانسته است اثر دور آبیاری بر روند کاهشی عملکرد دانه از تیمار غرقاب تا ۲۱ روز را در رقم هاشمی و لاین های مورد مطالعه شبیه سازی کند. مقایسه سطوح آبیاری نیز نشان داد که مدل توانست عملکرد دانه را در تیمار آبیاری غرقاب با بیشترین دقت شبیه سازی کند و کمترین میزان دقت مدل نیز در تیمار آبیاری با دور ۲۱ روز مشاهده شد. نتایج به دست آمده نشان داد که دقت مدل CERES-Rice در شبیه سازی عملکرد دانه در دوره های آبیاری بالا کاهش می یابد. ویکارم پاپهرا و کاسیت ساکولچایی (Wikarmpapraharan & Kositsakulchai, 2010) گزارش کردند که دقت مدل CERES-Rice در شبیه سازی مقدار تغییرات عملکرد دانه ارقام برنج پایین است، اما این مدل مقدار عملکرد نهایی دانه را با دقت بسیار بالایی شبیه سازی می کند، به طوری که مقدار R^2 محاسبه شده برای مقادیر واقعی و شبیه سازی شده در مطالعه آن ها ۰/۹۶ بود. در پژوهش حاضر نیز در مجموع نتایج به دست آمده بیانگر عملکرد خوب مدل CERES-Rice در شبیه سازی و پیش بینی عملکرد نسبت به مقادیر اندازه گیری شده بود، به طوری که مقدار R^2 مدل ۰/۸۳ به دست آمد که بیانگر تفاوت کم بین مقادیر اندازه گیری شده و شبیه سازی شده و پیش بینی مناسب می باشد (جدول ۶ و شکل ۲). مانیروزمان و همکاران (Maniruzzaman et al., 2017) نیز دقت مدل CERES-Rice را در شبیه سازی عملکرد دانه چند رقم برنج در بنگلادش در مرحله واسنجی مدل در حدود $0.99 > R^2 > 0.81$ و در مرحله اعتبارسنجی مدل در در حدود $0.95 > R^2 > 0.60$ بود.

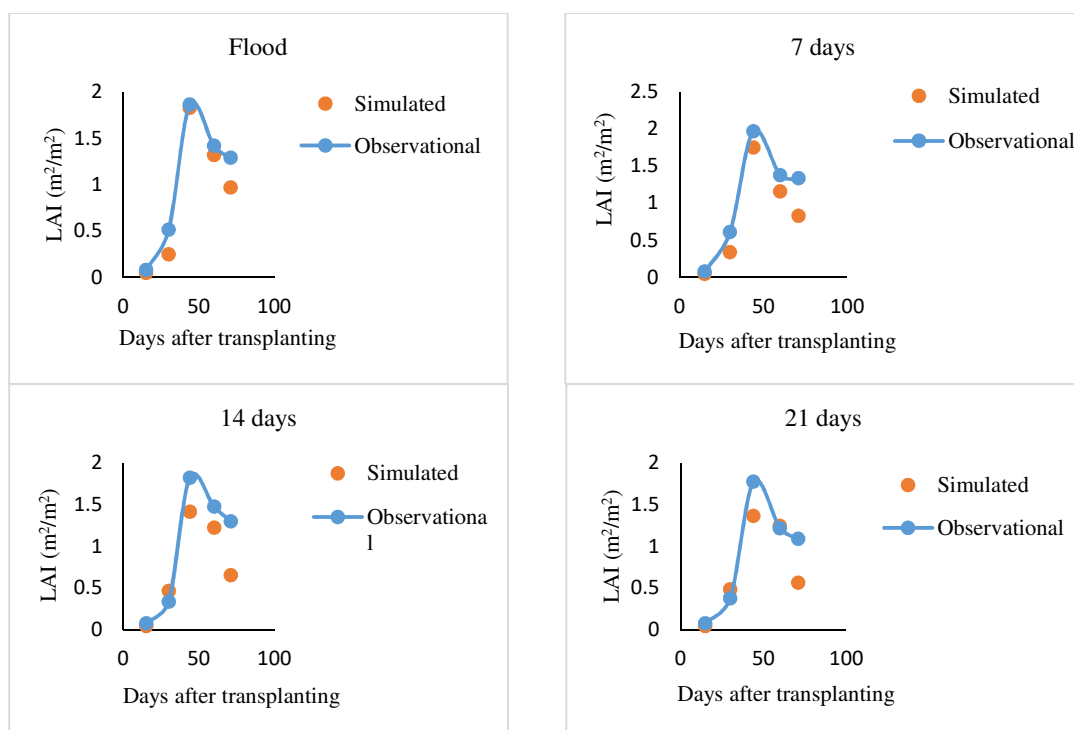
شبیه سازی شاخص سطح برگ رقم هاشمی و لاین M5 در سطح ۶۰ کیلوگرم در هکتار کود نیتروژن

یکی از مهم ترین شاخص های رشد که به عنوان معیار اندازه گیری سیستم فتوسنتزی استفاده می شود، شاخص سطح برگ است. شاخص سطح برگ اندازه گیری شده و شبیه سازی شده برنج در سال واسنجی در سطح کود ۶۰ کیلوگرم در هکتار برای همه تیمارهای آبیاری (غرقاب، هفت، ۱۴ و ۲۱ روز) برای دو ژنوتیپ هاشمی و M5 مقایسه شد. با توجه به تعداد زیاد کرت های آزمایشی و



شکل ۳- مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده شاخص سطح برگ رقم هاشمی در سطوح مختلف آبیاری، شامل آبیاری غرقاب و آبیاری تناوبی با دور آبیاری ۷، ۱۴ و ۲۱ روز

Figure 3. Measured and simulated values of leaf area index (LAI) of Hashemi variety in different irrigation regimes, including flooded irrigation and intermittent irrigation with intervals of 7, 14, and 21 days



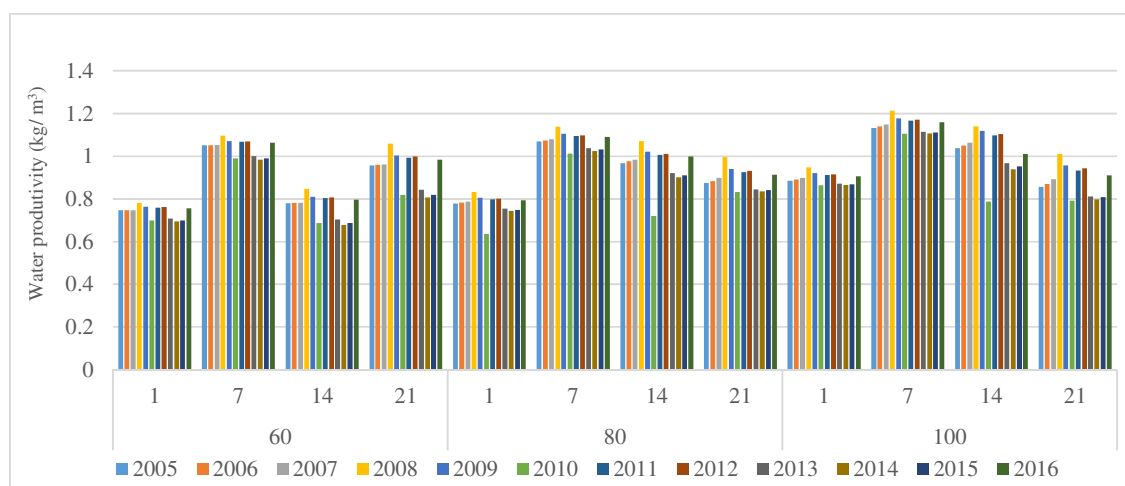
شکل ۴- مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده شاخص سطح برگ لاین M5 در سطوح مختلف آبیاری، شامل آبیاری غرقاب و آبیاری تناوبی با دور آبیاری ۷، ۱۴ و ۲۱ روز

Figure 4. Measured and simulated values of leaf area index (LAI) of M5 Line in different irrigation regimes, including flooded irrigation and intermittent irrigation with intervals of 7, 14, and 21 days

روند نزولی منطقی را طی کرده است. در تیمارهای آبیاری ۱۴ و ۲۱ روز نیز روند نزولی صورت گرفته است، اما این روند میزان آب مصرفی در نظر گرفته شده همراه با بارندگی در سال جاری را به تبخیر و تعرق اختصاص داده و در نتیجه باعث کاهش عملکرد محصول در شبیه‌سازی شده است.

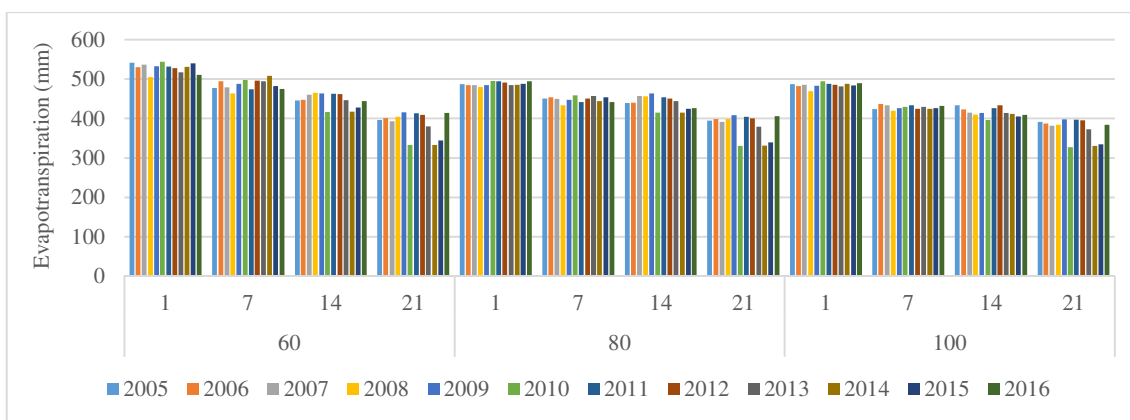
نتایج شبیه‌سازی بهره‌وری مصرف آب لاین M5 در شکل ۷ ارائه شده است. بهره‌وری مصرف آب در تیمارهای آبیاری غرقاب، ۱۴ و ۲۱ روز کم‌تر از تیمار آبیاری هفت روز بوده است و نشان دهنده انتخاب مدل به‌عنوان دور آبیاری مناسب در شبیه‌سازی این تیمارها می‌باشد. نتایج این شبیه‌سازی نشان داد که با افزایش سطح کود نیتروژن در تمامی تیمارهای آبیاری، بهره‌وری مصرف آب افزایش یافته است، به‌طوری که بیش‌ترین بهره‌وری آب در تیمار آبیاری هفت روز با سطح ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار کود نیتروژن به‌دست آمده است. علاوه بر این، کم‌ترین میزان تبخیر و تعرق لاین M5 در سطوح کودی مختلف در تیمار آبیاری هفت روز بوده است (شکل ۸). بیش‌ترین بهره‌وری فیزیکی آب در تمامی تیمارهای آبیاری و کود نیتروژن متعلق به سال پر بارش ۲۰۰۸ بوده است. این موضوع تاثیر بارندگی را بر بهره‌وری فیزیکی آب به‌ویژه در تیمارهای آبیاری ۱۴ و ۲۱ روز نشان می‌دهد. بیش‌ترین بهره‌وری مصرف آب در تمامی سطوح کود نیتروژن در شبیه‌سازی برای دور آبیاری هفت روز به‌دست آمد.

نتایج به‌دست آمده از بهره‌وری آب رقم هاشمی نشان داد که با افزایش سطح کود نیتروژن، تیمارهای آبیاری ۱۴ و ۲۱ روز نیز روند خوبی را نسبت به دو لاین M5 و M12 داشتند، به‌طوری که بیش‌ترین بهره‌وری مصرف آب در سطح ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار کود نیتروژن به‌دست آمد (شکل ۵). در بازه زمانی مورد مطالعه، سال‌های ۲۰۱۴ و ۲۰۰۸ به‌ترتیب با کم‌ترین (۳۳ میلی‌متر) و بیش‌ترین (۱۹۸ میلی‌متر) میزان بارندگی طی فصل زراعی به‌ترتیب به‌عنوان سال‌های کم‌بارش و پر بارش بودند. سال ۲۰۰۸ نیز دارای بیش‌ترین بهره‌وری مصرف آب بود که بیانگر تاثیر بارندگی بر افزایش بهره‌وری فیزیکی آب می‌باشد. اما کم‌ترین بهره‌وری مصرف آب مربوط به سال ۲۰۱۰ با میزان بارندگی ۶۳ میلی‌متر بوده است. یکی از دلایل کاهش بهره‌وری سال ۲۰۱۰ در شبیه‌سازی توسط مدل می‌تواند توزیع نامناسب بارش در فصل زراعی و بیش‌ترین میزان بارندگی در زمان برداشت محصول باشد. با توجه به این‌که بهره‌وری مصرف آب تحت اثر توأمان عملکرد محصول و مقدار تبخیر و تعرق است (Zare Abyaneh *et al.*, 2015)، در این بخش میزان تبخیر و تعرق هر رقم در تیمارهای آب و کود نیتروژن شبیه‌سازی مورد شد. نتایج شبیه‌سازی مدل بیانگر کاهش تبخیر و تعرق در تمامی تیمارهای آبیاری مورد مطالعه با افزایش سطح کود مصرفی بود (شکل ۶). مقدار تبخیر و تعرق در تیمار آبیاری هفت روز با اختلاف کمی نسبت به شرایط غرقاب،



شکل ۵- بهره‌وری آب شبیه‌سازی شده رقم هاشمی توسط مدل CERES-Rice تحت مدیریت‌های مختلف آبیاری (غرقاب و تناوبی با دور ۷، ۱۴ و ۲۱ روز) و کود نیتروژن (۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار) طی سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۶

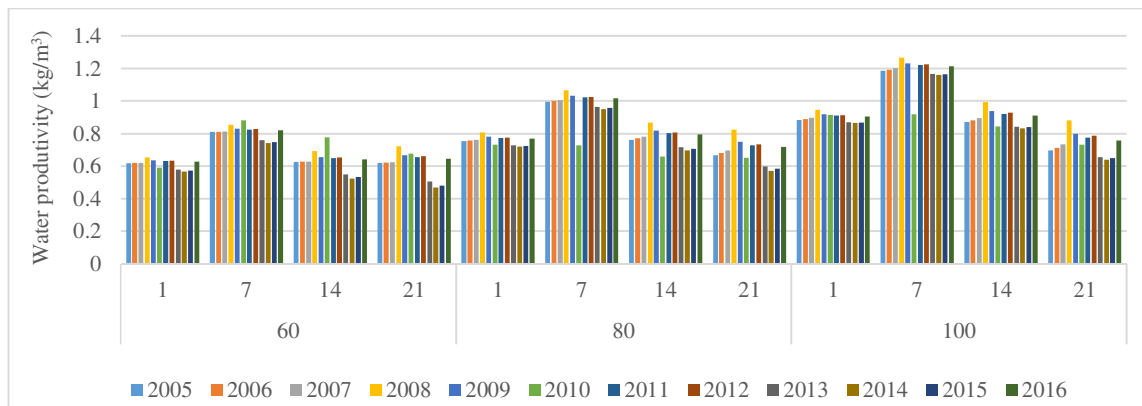
Figure 5. Simulated water productivity of Hashemi variety by the CERES-Rice model under different irrigation (flooding, and 7, 14 and 21 days) and nitrogen fertilizer (60, 80 and 100 kg/ha) managements for 2005 to 2016



شکل ۶- تبخیر و تعرق شبیه‌سازی شده رقم هاشمی توسط مدل CERES-Rice تحت مدیریت‌های مختلف آبیاری (غرقاب و تناوبی با

دور ۱۴،۷ و ۲۱ روز) و کود نیتروژن (۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار) طی سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۶

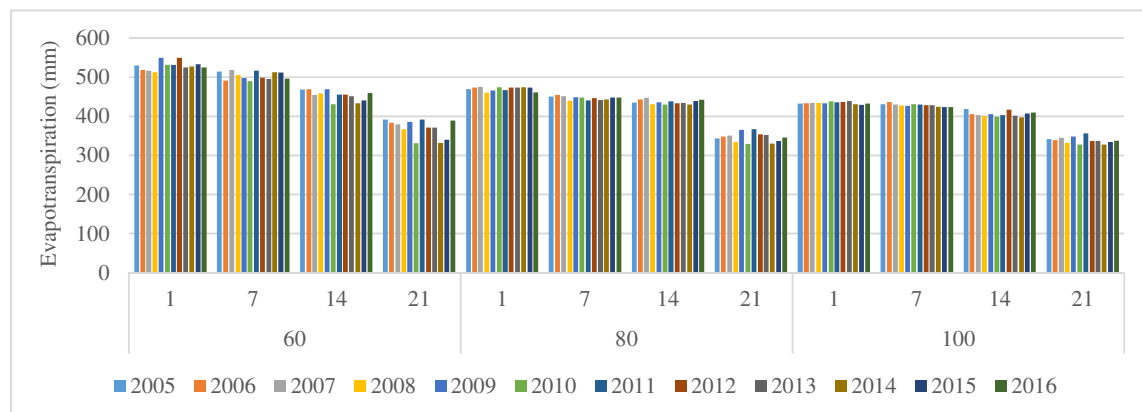
Figure 6. Simulated evapotranspiration of Hashemi variety by the CERES-Rice model under different irrigation (flooding, and 7, 14 and 21 days) and nitrogen fertilizer (60, 80 and 100 kg/ha) managements for 2005 to 2016



شکل ۷- بهره‌وری آب شبیه‌سازی شده لاین M5 توسط مدل CERES-Rice تحت مدیریت‌های مختلف آبیاری (غرقاب و تناوبی با دور

۱۴،۷ و ۲۱ روز) و کود نیتروژن (۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار) طی سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۶

Figure 7. Simulated water productivity of M5 Line by the CERES-Rice model under different irrigation (flooding, and 7, 14 and 21 days) and nitrogen fertilizer (60, 80 and 100 kg/ha) managements for 2005 to 2016



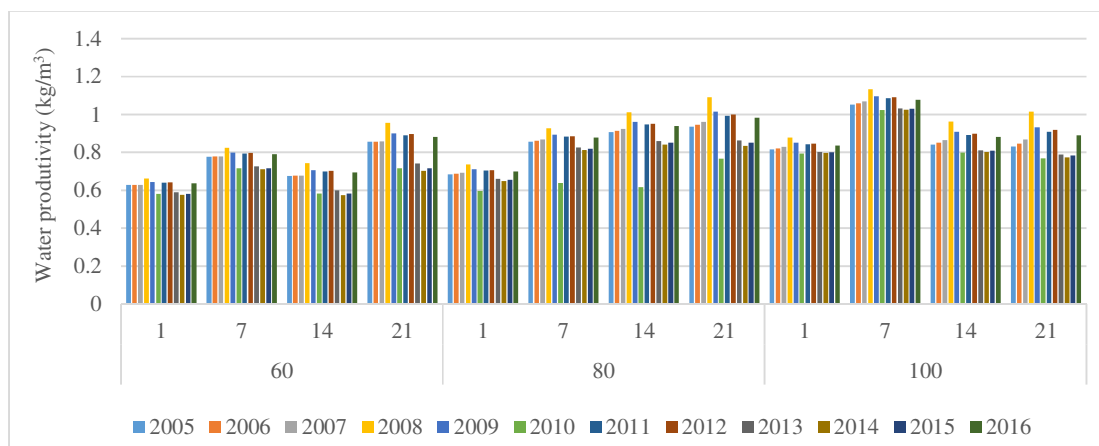
شکل ۸- تبخیر و تعرق شبیه‌سازی شده لاین M5 توسط مدل CERES-Rice تحت مدیریت‌های مختلف آبیاری (غرقاب و تناوبی با دور

۱۴،۷ و ۲۱ روز) و کود نیتروژن (۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار) طی سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۶

Figure 8. Simulated evapotranspiration of M5 Line by the CERES-Rice model under different irrigation (flooding, and 7, 14 and 21 days) and nitrogen fertilizer (60, 80 and 100 kg/ha) managements for 2005 to 2016

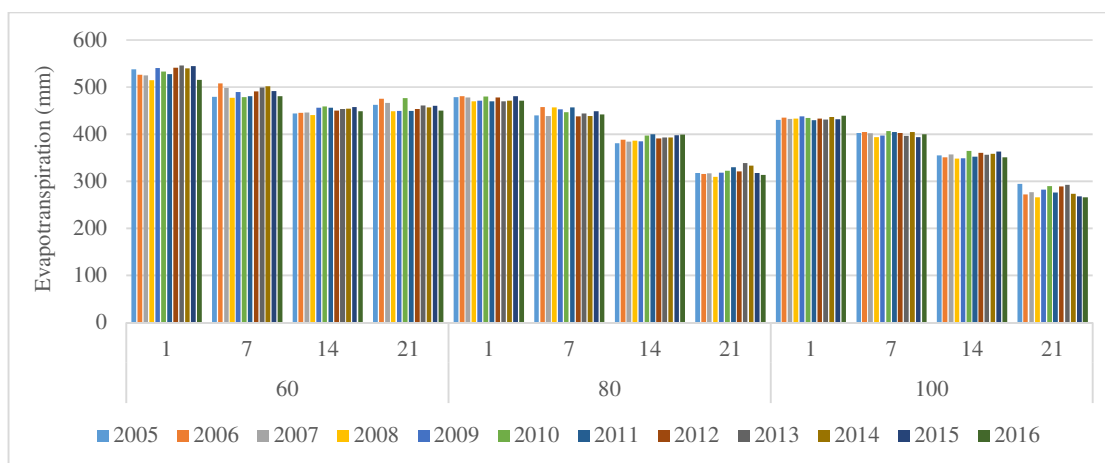
آبیاری و کم‌ترین تبخیر و تعرق مربوط به سطح ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار کود نیتروژن نسبت به تیمارهای ۸۰ و ۶۰ کیلوگرم در هکتار بوده است. همچنین، همانند نتایج شبیه‌سازی شده برای رقم هاشمی و لاین M5، دور آبیاری هفت روز بهترین دور آبیاری برای لاین M12 نیز بود. علاوه بر این، سال پر بارش ۲۰۰۸ دارای بیش‌ترین میزان بهره‌وری آب آبیاری و کم‌ترین میزان تبخیر و تعرق نسبت به سال‌های دیگر مورد مطالعه بوده است.

شبیه‌سازی بهره‌وری آب آبیاری و مقدار تبخیر و تعرق لاین M12 توسط مدل CERES-Rice در شکل‌های ۹ و ۱۰ ارائه شده است. نتایج به‌دست آمده برای لاین M12 نیز روند تقریباً مشابهی با لاین M5 و رقم هاشمی نشان داد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش سطح کود نیتروژن، بهره‌وری آب لاین M12 افزایش یافته است که در شبیه‌سازی نیز این روند کاملاً محسوس بوده است. طبق نتایج شبیه‌سازی مدل، بیش‌ترین بهره‌وری آب



شکل ۹- بهره‌وری آب شبیه‌سازی شده لاین M12 توسط مدل CERES-Rice تحت مدیریت‌های مختلف آبیاری (غرقاب و تناوبی با دور ۱۴،۷ و ۲۱ روز) و کود نیتروژن (۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار) طی سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۶

Figure 9. Simulated water productivity of M12 Line by the CERES-Rice model under different irrigation (flooding, and 7, 14 and 21 days interval) and nitrogen fertilizer (60, 80 and 100 kg/ha) managements during 2005 to 2016



شکل ۱۰- تبخیر و تعرق شبیه‌سازی شده لاین M12 توسط مدل CERES-Rice تحت مدیریت‌های مختلف آبیاری (غرقاب و تناوبی با دور ۱۴،۷ و ۲۱ روز) و کود نیتروژن (۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار) طی سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۶

Figure 10. Simulated evapotranspiration of M12 Line by the CERES-Rice model under different irrigation (flooding, and 7, 14 and 21 days interval) and nitrogen fertilizer (60, 80 and 100 kg/ha) managements during 2005 to 2016

نتیجه‌گیری کلی

نتایج این مطالعه نشان داد که مدل CERES-Rice در مرحله واسنجی، مقدار عملکرد دانه برنج رقم هاشمی را در تمامی سطوح آبیاری با دقت بالاتری نسبت به دو لاین M5 و M12 شبیه‌سازی کرد. مقادیر شبیه‌سازی شده نشان داد که عملکردهای پیش‌بینی شده روندی مشابه عملکردهای واقعی داشتند و واکنش به تیمارهای آبیاری همانند مقادیر اندازه‌گیری شده عملکرد بود. بیش‌ترین مقدار عملکرد شبیه‌سازی شده در تیمارهای آبیاری غرقاب و آبیاری تناوبی با دور آبیاری هفت روز و کم‌ترین مقدار آن در آبیاری تناوبی با دور آبیاری ۱۴ و ۲۱ روز مشاهده شد. همچنین، مدل CERES-Rice روند کاهش عملکرد دانه هر سه ژنوتیپ مورد مطالعه تحت تاثیر افزایش دور آبیاری را به‌صورت رضایت‌بخشی شبیه‌سازی کرد. علاوه بر این، شبیه‌سازی بهره‌وری آب برای یک دوره بلندمدت هواشناسی طی سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۶، نشان داد که مدل دور آبیاری هفت روز در سطح ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار کود نیتروژن بهترین مدیریت برای سال‌های مورد مطالعه بود. همچنین، در دوره‌های آبیاری ۱۴ و ۲۱ روز، با افزایش سطح کود نیتروژن، بهره‌وری فیزیکی آب افزایش

یافت، به‌طوری که در تیمار ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار کود نیتروژن، بهره‌وری فیزیکی آب به مقدار مناسبی رسید.

تضاد منافع

نویسندگان تایید می‌کنند که این تحقیق در غیاب هرگونه روابط تجاری یا مالی می‌تواند به عنوان تضاد منافع بالقوه تعبیر شود، انجام شده است.

رعایت اخلاق در نشر

نویسندگان اعلام می‌کنند که در نگارش این مقاله به‌طور کامل از اخلاق نشر از جمله سرقت ادبی، سوء رفتار، جعل داده‌ها و انتشار دوگانه، پیروی کرده‌اند. همچنین این مقاله حاصل یک کار تحقیقاتی اصیل بوده و تاکنون به‌طور کامل به هیچ زبانی و در هیچ نشریه یا همایشی چاپ و منتشر نشده است و هیچ اقدامی نیز برای انتشار آن در هیچ نشریه یا همایشی صورت نگرفته و نخواهد گرفت.

اجازه انتشار مقاله

نویسندگان با چاپ این مقاله به‌صورت دسترسی باز موافقت کرده و کلیه حقوق استفاده از محتوا، جدول‌ها، شکل‌ها، تصویرها و غیره را به ناشر واگذار می‌کنند.

References

- Abrol, I. P., & Sangar, S. (2006). Sustaining Indian agriculture—conservation agriculture the way forward. *Current Science*, 91(8), 1020-1025.
- Akinbile, C. O. (2013). Assessment of the CERES-Rice model for rice production in Ibadan, Nigeria. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 15(1), 19-26.
- 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](https://doi.org/10.1080/01904167.2014.888750).
- Bouman, B. A. M., & Tuong, T. P. (2001). Field water management to save water and increase its productivity in irrigated lowland rice. *Agricultural Water Management*, 49(1), 11-30. doi: [10.1016/S0378-3774\(00\)00128-1](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(00)00128-1).
- Bouman, B. A. M., & van Laar, H. H. (2006). Description and evaluation of the rice growth model ORYZA2000 under nitrogen-limited conditions. *Agricultural Systems*, 87(3), 249-273. doi: [10.1016/j.agsy.2004.09.011](https://doi.org/10.1016/j.agsy.2004.09.011).
- Buresh, R. J., Singh, U., Godwin, D. C., Ritchie, J. T., & De Datta, S. K. (1991). Simulating soil nitrogen transformations and crop response to nitrogen using the CERES-Rice model. IRRI research paper series. International Rice Research Institute, Manila, Philippines.
- 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](https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.05.023).
- Esmaelzadeh, M., Esfahani, M., Alami, A., Momeni, A. & Khaledian, M.R. (2021). Profiling the physiological response of upland and lowland rice (*Oryza sativa* L.) genotypes to water deficit. *Journal of Crop Science & Biotechnology*, 25, 289-300. doi: [10.1007/s12892-021-00131-3](https://doi.org/10.1007/s12892-021-00131-3).

- FAO. (2000). Crops and drops: Making the best use of water for agriculture. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Retrieved 20 April 2024, from <https://farm-d.org/document/crops-and-drops-making-the-best-use-of-water-in-agriculture/>.
- Godwin, D. C., & Singh, U. (1998). Nitrogen balance and crop response to nitrogen in upland and lowland cropping systems. In: Tsuji, G. Y., Hoogenboom, G., & Thornton, P. K. (Eds.). Understanding Options for Agricultural Production. Systems Approaches for Sustainable Agricultural Development. Vol. 7. Springer, Dordrecht, The Netherlands. pp. 41-54. doi: [10.1007/978-94-017-3624-4_4](https://doi.org/10.1007/978-94-017-3624-4_4).
- Hoang, L., Ngoc, T. A., & Maskey, S. (2016). A robust parameter approach for estimating CERES-Rice model parameters for the Vietnam Mekong Delta. *Field Crops Research*, 196, 98-111. doi: [10.1016/j.fcr.2016.06.012](https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.06.012).
- Jones, J. W., Hoogenboom, G., Porter, C. H., Boote, K. J., Batchelor, W. D., Hunt, L. A., Wilkens, P. W., Singh, U., Gijsman, A. J., & Ritchie, J. T. (2003). The DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy*, 18(3-4), 235-265. doi: [10.1016/S1161-0301\(02\)00107-7](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00107-7).
- Kiani, M., Ilkai M. N. & Aqayari, F. (2016). Validation of CERES-Rice model in simulating nitrogen fertilizer levels in rice. *Journal of Agriculture & Plant Breeding*, 12(2), 35-46. [In Persian].
- Kim, K., Jeong, H., & Kim, J. (2013). Comparison of crop growth and evapotranspiration simulations between Noah Multi Physics model and CERES-Rice model. *Korean Journal of Agricultural & Forest Meteorology*, 15(4), 282-290. doi: [10.5532/KJAFM.2013.15.4.282](https://doi.org/10.5532/KJAFM.2013.15.4.282)
- Fallah Ghalhari, G. A., Asadi, M., & Entezari, A. R. (2016). Climate mapping of Guilan province by using multivariable methods. *Journal of Geography & Planning*, 19(54), 235-251.
- Mall, R. K., & Aggarwal, P. K. (2002). Climate change and rice yields in diverse agro-environments of India. I. Evaluation of impact assessment models. *Climatic Change*, 52(3), 315-330. doi: [10.1023/A:1013702105870](https://doi.org/10.1023/A:1013702105870).
- Maniruzzaman, M., Biswas, J. C., Hossain, M. B., Haque, M. M., Naher, U. A., Biswas, A., Choudhury, A. K., Akhter, S., Ahmed, F., Rahman, M. M., & Kalra, N. (2017). Evaluating the CERES-Rice model under dry season irrigated rice in Bangladesh: Calibration and validation. *Journal of Agricultural & Crop Research*, 5(6), 96-107.
- Najafi, S., Khaledian, M. R., & Rezaei, M. (2021). Evaluation of water productivity with three rice genotypes under different irrigation regimes and nitrogen fertilizer treatments in Rasht, northern Iran. *Irrigation & Drainage*, 70(4), 679-689. doi: [10.1002/ird.2582](https://doi.org/10.1002/ird.2582).
- Rezaei, G., Khaledian, M. R., Kavoosi-Kalashami, M., & Rezaei, M. (2022). Prioritization of areas suitable for rice cultivation based on the economic value of irrigation water. *Irrigation & Drainage*, 71(3), 776-782. doi: [10.1002/ird.2685](https://doi.org/10.1002/ird.2685).
- Rezaei, M., Shahnazari, A., Raeini Sarjaz, M., & Vazifedoust, M. (2015). Large-scale simulation of rice yield and water productivity using CERES-Rice model. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 9(2), 283-291. [In Persian].
- Rezayati, S., Khaledian, M. R., Razavipour, T., & Rezaei, M. (2020). Water flow and nitrate transfer simulations in cultivation under different irrigation and nitrogen fertilizer application managements by HYDRUS-2D model. *Irrigation Science*, 38(4), 353-363. doi: [10.1007/s00271-020-00676-1](https://doi.org/10.1007/s00271-020-00676-1).
- Ritchie, J. T., Alocilja, E. C., Singh, U., & Uehara, G. (1987). IBSNAT and the CERES-Rice model. Proceedings of the International Workshop on the Impact of Weather Parameters on Growth and Yield of Rice. 7-10 April, 1986, Manilla, Philippines. pp. 271-281.
- Ritchie, J. T., Singh, U., Godwin, D. C., & Bowen, W. T. (1998). Cereal growth, development, and yield. In: Tsuji, G. Y., Hoogenboom, G., & Thornton, P. K. (Eds.). Understanding Options for Agricultural Production. Systems Approaches for Sustainable Agricultural Development. Vol. 7. Springer, Dordrecht, The Netherlands. pp. 79-98. doi: [10.1007/978-94-017-3624-4_5](https://doi.org/10.1007/978-94-017-3624-4_5).
- Singh, U., & Ritchie, J. T. (1993). Simulating the impact of climate change on crop growth and nutrient dynamics using the CERES-Rice model. *Journal of Agricultural Meteorology*, 48(5), 819-822. doi: [10.2480/agrmet.48.819](https://doi.org/10.2480/agrmet.48.819).
- Singh, U., Tsuji, G. Y., & Godwin, D. C. (1990). Planting new ideas in DSSAT: The CERES-Rice model. *Agrotechnology Transfer*, 10, 1-7. University of Hawaii, Honolulu, Hawaii, USA.
- Toset, H. P. W., Gleditsch, N. P., & Hegre, H. (2000). Shared rivers and interstate conflict. *Political Geography*, 19(8), 971-996. doi: [10.1016/S0962-6298\(00\)00038-X](https://doi.org/10.1016/S0962-6298(00)00038-X).

- van Laar, H. H., Goudriaan, J., & van Keulen, H. (1997). SUCROS97: Simulation of Crop Growth for Potential and Water-Limited Production Situations. As Applied to Spring Wheat. Quantitative Approaches in Systems Analysis, No. 14. AB-DLO, Wageningen, 52 p.
- Vilayvong, S., Banterng, P., Patanothai, A., & Pannangpetch, K. (2015). CSM-CERES-Rice model to determine management strategies for lowland rice production. *Scientia Agricola*, 72(3), 229-236. doi: [10.1590/0103-9016-2013-0380](https://doi.org/10.1590/0103-9016-2013-0380).
- Wikarpapraharan, 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(1), 17-29.
- Zare Abyaneh, H., Aram, M., & Akhavan, S. (2015). Assessment of virtual water trade volume of main crops in Hamedan province. *Iranian Water Research Journal*, 9(3), 151-161. [In Persian].