نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۴، جلد ۱۹، مهر - آبان ۱۴۰۴، ص. ۶۰۷-۵۹۵

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 4, Vol. 19, Oct.-Nov. 2025, p. 595-607

مقاله علمی-پژوهشی

شبیه‌سازی عملکرد دانه و بهره‌وری آب برنج تحت مدیریت‌های مختلف آبیاری با استفاده از مدل ORYZA2000

الهام یوسفی[1*]، محمدحسن بیگلوئی[2]، محمدرضا خالدیان[3]، ابراهیم امیری[4]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۱۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۱۰

چکیده

هدف از مطالعه حاضر شبیه‌سازی عملکرد دانه و بهره‌وری آب در برنج رقم طارم روشن تحت روش و مدیریت‌های مختلف آبیاری و کود نیتروژن با استفاده از مدل ORYZA2000 و تعیین بهترین ترکیب تیماری روش تلفیقی آبیاری با کود نیتروژن در شرایط اراضی پست بود. برای دستیابی به این هدف از داده‌های تحقیقات پیشین انجام شده در مزرعه پژوهشی دانشکده علوم کشاورزی دانشگاه گیلان طی دو سال ۱۳۹۷ و ۱۳۹۸ استفاده شد. این پژوهش در قالب کرت‌های خردشده به‌صورت طرح بلوک‌های پایه کامل تصادفی با تیمار اصلی مدیریت آبیاری در ۵ سطح شامل؛ غرقاب دائم در طول دوره رشد گیاه (شاهد I1)، آبیاری قطره‌ای نواری پس از مرحله پنجه‌زنی (I2)، پس از مرحله خوشه‌دهی (I3)، پس از مرحله گلدهی (I4) و پس از مرحله خمیری (I5) با ۵۰ درصد مقدار آب آبیاری غرقاب دائم و تیمار فرعی دو سطح کود نیتروژن شامل ۹۰ (N1) $kg.ha^{-1}$ و ۱۸۰ (N2) $kg.ha^{-1}$ از منبع اوره در سه تکرار اجرا شده بود. برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل به ترتیب از داده‌های مزرعه‌ای سال‌های ۱۳۹۷ و ۱۳۹۸ استفاده شد. شاخص‌های آماری RMSE و NRMSE برای سال ۱۳۹۷ به ترتیب ۳۹۹/۰۷ $kg.ha^{-1}$ و ۵/۶۰ درصد و برای سال ۱۳۹۸ به ترتیب ۵۷۹/۹۴ $kg.ha^{-1}$ و ۹/۵۵ درصد به دست آمد که نشان‌دهنده دقت عالی مدل است. بیشترین مقدار بهره‌وری آب شبیه‌سازی شده در سال‌های ۱۳۹۷ و ۱۳۹۸ به ترتیب با ۰/۷۸ و ۰/۹۰ کیلوگرم بر مترمکعب در تیمار I2N2 و کمترین آن در سال‌های ۱۳۹۷ و ۱۳۹۸ به ترتیب با ۰/۵۳ و ۰/۵۷ کیلوگرم بر مترمکعب در تیمار I5N1 به دست آمد. تیمار I2N2 دارای صرفه‌جویی مصرف آب ۱۶/۲۵ درصد در سال ۱۳۹۷ و ۲۵/۵۳ درصد در سال ۱۳۹۸ نسبت به تیمار شاهد (غرقاب) بود، در حالی که از نظر عملکرد دانه اختلاف معنی‌داری با تیمار شاهد نداشت.

واژه‌های کلیدی: طارم روشن، غرقاب دائم، قطره‌ای نواری، واسنجی، اعتبارسنجی

مقدمه

حساسیت بالای محصولات کشاورزی نسبت به تغییرات آب و هوایی و کاهش منابع آب (Piao et al., 2010) و نیز اثرات فاجعه‌آمیز مدیریت نادرست منابع آب بر آینده کشاورزی (Hashemi et al., 2019)، لزوم استفاده از سامانه‌های آبیاری کارآمدتر، کشت محصولات مقاوم به شرایط کم‌آبی و اجرای شیوه‌های کشاورزی پایدار را برای مقابله با این چالش‌ها و تضمین امنیت غذایی ضروری می‌سازد (Peng et al., 2023). 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 (Prathumchai et al., 2018) و بنا بر گزارش مرکز تحقیقات بین‌المللی برنج میزان تولید برنج تا سال ۲۰۳۵ باید حداقل ۲۶ درصد افزایش پیدا کند که نیازمند استفاده مناسب از منابع موجود است (IRRI, 2008).

بهره‌وری آب شاخصی است که نشان‌دهنده مدیریت مؤثر آب برای دستیابی به کشاورزی پایدار است (Fatimah, 2018). این شاخص تحت تأثیر عوامل متعددی مانند نوع رقم، شرایط اقلیمی، مدیریت نیاز آبی، نوع سامانه‌های آبیاری و فعالیت‌های زراعی قرار دارد (Mojid and Mainuddin, 2021; Najafi et al., 2021; Cai and Rosegrant, 2003). روش مرسوم آبیاری در کشت برنج،

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران
۲- دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران
۳- دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران
۴- استاد، گروه مهندسی آب، واحد لاهیجان، دانشگاه آزاد اسلامی، لاهیجان، ایران
(*-نویسنده مسئول: Email: yousefi13843@gmail.com)

غرقاب دائم است که به انتشار گازهای گلخانه‌ای، پایین آمدن راندمان مصرف مواد مغذی و بهره‌وری پایین آب منجر می‌شود (Richards and Sander, 2014). از این رو یافتن روش‌های اقتصادی و سازگار با محیط‌زیست نظیر آبیاری تناوبی در کشت برنج با هدف افزایش بهره‌وری آب ضروری است (Ishfaq et al., 2020; Richards and Sander, 2014; Shadpour-Rashti et al., 2017). امروزه استفاده از روش آبیاری قطره‌ای به عنوان یکی از روش‌های جدید آبیاری در کشت برنج با هدف کاهش مصرف آب و افزایش بهره‌وری مورد توجه قرار گرفته است (Nabipour et al., 2024).

آزمایش‌های مزرعه‌ای راهکارهای بسیار مهم و مؤثری برای بررسی گزینه‌های مدیریتی در بهبود عملکرد تحت شرایط محدودیت آبی هستند و می‌توانند درک خوبی از رابطه آب- خاک- گیاه- اتمسفر و اثراتشان بر عملکرد دانه و سایر واکنش‌های مهم فنولوژیکی و فیزلوژیکی گیاه ارائه دهند. اما با توجه به دشواری، هزینه‌بر بودن و زمانبر بودن این آزمایش‌ها خصوصاً در مواردی نظیر تعیین مقدار بهینه آب و کود (Dai et al., 2021)، استفاده از مدل‌های رشد گیاهی توصیه می‌شود (Nisar and Arora, 2018; Yadav et al, 2012; Xue et al., 2008; Arora, 2006). این مدل‌ها را می‌توان برای ارزیابی مطالعات تجربی و تصمیم‌گیری در مدیریت مزرعه به کار برد (Saadati et al., 2011). داده‌ها و اطلاعات به دست آمده از آزمایش‌های مزرعه‌ای را نیز می‌توان در توسعه، واسنجی و اعتبارسنجی مدل‌های گیاهی به کار گرفت. کاربرد صحیح این مدل‌ها، بررسی طیف وسیعی از استراتژی‌های مدیریتی را ممکن می‌سازند که ضمن کاهش حجم کارها و هزینه‌ها، اطلاعات و داده‌های باارزشی را برای سناریوهایی که با آزمایش‌های میدانی امکان‌پذیر نیست، ارائه می‌دهند (Sandhu and Irmak, 2019).

در دهه‌های اخیر، مدل‌های رشد گیاهی به عنوان ابزار تحقیقاتی مهم در توسعه علوم کشاورزی، به شکل گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Huai et al., 2024). این مدل‌ها با پیچیدگی‌های مختلف و حفظ تعادل بین دقت و پایداری (Zhou et al., 2024). توسعه یافته‌اند تا ابزار مفیدی برای تخمین رشد، توسعه و عملکرد محصول، بهبود برنامه‌ریزی آبیاری و کوددهی گیاه (Jin et al., 2023) و تصمیم‌گیری در خصوص مدیریت موثر مزرعه تحت شرایط محدودیت آب (Prathumchai et al., 2018) باشند. انتخاب مناسب‌ترین مدل به نوع گیاه، شرایط زیست‌محیطی و هدف مطالعه بستگی دارد (Dehghan Moroozeh et al., 2023). مدل ORYZA2000 به طور تخصصی برای استفاده در تحقیقات برنج توسعه داده شده و به شکل گسترده‌ای در مناطق مختلفی از جهان (Li et al., 2011; Yuana et al., 2017; Yu and Ciu, 2022; Kawakita et al., 2023) و ایران (مدیری و همکاران، ۱۴۰۳؛ شبان و همکاران، ۱۴۰۲؛ اعلایی و همکاران، ۱۳۹۹؛ امیری لاریجانی و همکاران، ۱۳۹۲؛ امیری و همکاران، ۱۳۹۰) برای شبیه‌سازی مراحل رشد، عملکرد دانه و زیست‌توده برنج مورد استفاده قرار گرفته است. مؤمن‌زاده و همکاران (۱۴۰۱) به‌منظور ارزیابی مدل ORYZA2000 تحت تنش‌های آبی مختلف آزمایشی را در دو سال زراعی ۹۱-۱۳۹۰ و ۹۲-۱۳۹۱ برای ۸ برنج محلی و اصلاح شده شامل هاشمی، علی کاظمی، سنگ جو، سپیدرود، گوهر، درفک، بینام و خزر انجام دادند. نتایج تحقیق نشان داد که مدل در پیش‌بینی عملکرد دانه و زیست‌توده در شرایط آبیاری غرقاب (بدون تنش آبی) دارای دقت بیشتری نسبت به سایر مدیریت‌های آبیاری (با تنش آبی) است. در تحقیقی برای شبیه‌سازی عملکرد برنج با مدل ORYZA2000 در دو تیمار آبیاری (شامل نسبت عمق آب آبیاری به تبخیر از تشت معادل ۱/۲ و ۲/۴) و تاریخ کاشت، مقدار NRMSE بین مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری‌شده ۱۶ درصد گزارش شد (Nisar and Arora, 2018). لی و همکاران مدل ORYZA2000 را در سه کشور هند، چین و فیلیپین تحت مدیریت‌های مختلف آبیاری (شامل آبیاری غرقاب و آبیاری تناوبی با آستانه‌های مختلف) و کود نیتروژن به کار بردند و نتایج نشان داد که مدل زیست‌توده کل را با ضریب تبیین ۰/۹۷ و NRMSE ۲۲ درصد پیش‌بینی می‌کند (Li et al., 2017). این نتایج نشان می‌دهد که دقت مدل ORYZA2000 در شبیه‌سازی عملکرد و زیست‌توده به نوع تیمارهای آبی و کودی درنظر گرفته شده و نیز واسنجی مدل بستگی دارد. در مورد استفاده از آبیاری قطره‌ای در کشت برنج نیز تحقیقاتی در سرتاسر جهان انجام شده است. سومان و همکاران به ارزیابی عملکرد برنج تحت سه روش مختلف آبیاری شامل آبیاری غرقاب، قطره‌ای و بارانی پرداختند. نتایج نشان داد که استفاده از آبیاری قطره‌ای به عملکرد بالاتر و صرفه‌جویی آب بیشتر نسبت به دو روش دیگر منجر شد (Soman et al., 2018). رائو و همکاران به بررسی اثرات پنج تیمار مختلف آبیاری غرقاب، آبیاری تناوبی، آبیاری قطره‌ای با فاصله قطره‌چکان‌های ۲۰، ۳۰ و ۴۰ سانتی‌متر از هم بر بهره‌وری آب در کشت برنج در هند پرداختند. نتایج نشان داد که بالاترین بهره‌وری آب در تیمار آبیاری قطره‌ای با فاصله قطره‌چکان‌های ۲۰ سانتی‌متر از هم به دست آمد (Rao et al., 2017).

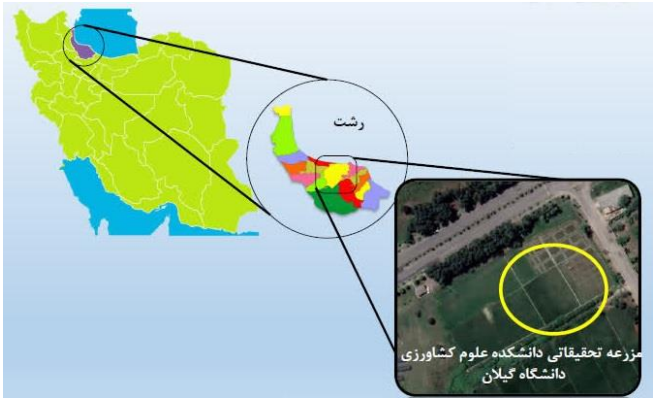
با بررسی مطالعات پیشین، پژوهشی یافت نشد که در آن به شبیه‌سازی عملکرد دانه و بهره‌وری آب تحت سناریوهای ترکیبی آبیاری غرقاب دائم و قطره‌ای در کشت برنج با استفاده از مدل‌های رشد گیاهی پرداخته شود. با توجه به ضرورت بالا بردن بهره‌وری آب در کنار حفظ سطح قابل‌قبولی از عملکرد برنج و ارزیابی دقت مدل‌ها در شبیه‌سازی عملکرد تحت روش‌های آبیاری کارآمدتر، هدف پژوهش حاضر شبیه‌سازی عملکرد دانه و بهره‌وری آب در تولید برنج رقم طارم روشن تحت تلفیق روش‌های آبیاری غرقابی و قطره‌ای در سطوح مختلف کود نیتروژن با استفاده از مدل ORYZA2000 و

تعیین بهترین ترکیب تیمار تلفیق روش‌های آبیاری غرقابی و قطره‌ای در سطوح مختلف کود نیتروژن در شرایط اراضی پست بود.

مواد و روش‌ها

محدوده مورد مطالعه

به‌منظور شبیه‌سازی عملکرد برنج و بهره‌وری آب با استفاده از مدل ORYZA2000، از داده‌های تحقیقاتی انجام شده در سال‌های زراعی ۱۳۹۶-۹۷ و ۹۸-۱۳۹۷ در مزرعه پژوهشی دانشکده علوم کشاورزی دانشگاه گیلان واقع در شش کیلومتری شهر رشت (شکل ۱) استفاده شد (سید جلیلی، ۱۴۰۰؛ شعاعی پرچین و همکاران، ۱۴۰۱). این داده‌ها شامل میزان نهاده‌های کشاورزی، اطلاعات مربوط به آب، خاک، هوا و گیاه، تاریخ کاشت و عملیات زراعی بود که از داده‌های سال زراعی ۹۷-۱۳۹۶ برای واسنجی و از داده‌های سال زراعی ۹۸-۱۳۹۷ برای اعتبارسنجی مدل استفاده شد. ارتفاع محل نمونه‌برداری از سطح دریا ۲۶ متر و در عرض ۳۷ درجه و ۱۲ دقیقه شمالی و طول ۴۹ درجه و ۳۹ دقیقه شرقی قرار دارد. نمونه آب و خاک محل اجرای پروژه برای تجزیه به آزمایشگاه ارسال شد (جدول‌های ۱ و ۲). 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، سرعت باد، ساعات آفتابی و رطوبت نسبی از ایستگاه تحقیقات هواشناسی کشاورزی رشت با مختصات طول جغرافیایی ۴۹/۳۹ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۷/۱۲ درجه شمالی و ارتفاع ۲۴/۹ متر (جنب دانشگاه گیلان) اخذ شد.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی محل برداشت داده‌های مورد نیاز پژوهش

جدول ۱- نتایج تجزیه آب آبیاری

کلاس آب	SAR	Na	Mg	Ca	SO_4	Cl	HCO_3	CO_3	PH	TDS	EC
C3S1	۳/۱	۵/۴	۱/۸	۴/۲	۰/۴۲	۴/۴	۴/۶	۱/۲	۷/۳	۵۹۸	۱

پارامترهای Na، Mg، Ca، So_4، Cl، HCO_3 و CO_3 بر حسب $meq.L^{-1}$، پارامتر EC بر حسب $dS.m^{-1}$ و پارامتر TDS بر حسب $mg.Lit^{-1}$ هستند.

جدول ۲- نتایج تجزیه خاک محل نمونه‌برداری تا عمق زراعی

بافت خاک	K	P	Na	Ca	Mg	N	SAR	EC	pH
Clay Loam	۱۵/۸۶	۴۵/۳	۵/۴۳	۷/۳۵	۳/۵۴	۰/۲۱	۰/۹۴	۰/۴۳۹	۶/۳۸

پارامترهای K، P، Ca، Na، Ca و Mg بر حسب $meq.L^{-1}$، پارامتر EC بر حسب $dS.m^{-1}$ و پارامتر N بر حسب درصد هستند.

این پژوهش در قالب کرت‌های خردشده به‌صورت طرح بلوک‌های پایه کامل تصادفی در سه تکرار (۳۰ کرت به ابعاد ۴×۲ متر) اجرا شد. فاصله بین کرت‌ها ۱ متر، بین تکرارها ۱/۵ متر و بین بوته‌ها در همه کرت‌ها ۲۰ سانتی‌متر بود (شکل ۲). همه کرت‌ها تا انتهای مرحله پنجه‌زنی به‌طور یکسان به‌صورت غرقاب دائم آبیاری شده و سپس تیمارها اعمال شدند. سطوح تیماری آبیاری به شرح زیر تعریف شدند.

۱- روش آبیاری غرقاب دائم در طول دوره رشد (شاهد، I1)

۲- روش SRI که شامل آبیاری غرقاب دائم تا انتهای مرحله پنجه‌زنی و سپس آبیاری قطره‌ای نواری با ۵۰ درصد مقدار آب آبیاری

غرقاب دائم تا انتهای دوره رشد (I2)

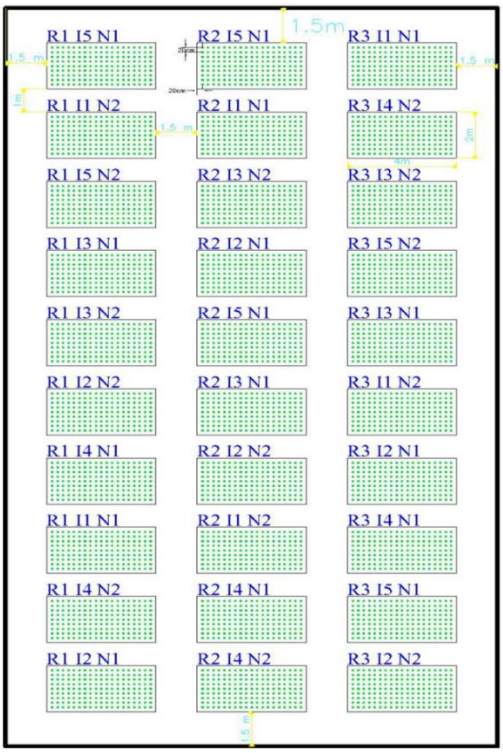
۳- روش SRI که شامل آبیاری غرقاب دائم تا انتهای مرحله خوشه‌دهی و سپس آبیاری قطره‌ای نواری با ۵۰ درصد مقدار آب آبیاری غرقاب دائم تا انتهای دوره رشد (I3)

۴- روش SRI که شامل آبیاری غرقاب دائم تا انتهای مرحله گلدهی و سپس آبیاری قطره‌ای نواری با ۵۰ درصد مقدار آب آبیاری غرقاب دائم تا انتهای دوره رشد (I4)

۵- روش SRI که شامل آبیاری غرقاب دائم تا انتهای مرحله خمیری سپس آبیاری با روش قطره‌ای نواری با ۵۰ درصد مقدار آب آبیاری غرقاب دائم تا انتهای دوره رشد (I5)

سطوح تیمار کودی نیز شامل نیتروژن از منبع کود اوره به میزان ۹۰ کیلوگرم در هکتار (N1) و ۱۸۰ کیلوگرم در هکتار (N2) بود. نحوه بلوک‌بندی و چینش تیمارها در زمین اجرای طرح در شکل ۳ نمایش داده‌شده است. که در این شکل حروف I، N و R به ترتیب نشان‌دهنده تیمارهای آبیاری، کودی و تکرارها هستند. عمق آب در سطح خاک در هر کرت در فاصله بین دو آبیاری تا انتهای مرحله پنجه‌زنی حداقل ۲ و حداکثر ۳ سانتی‌متر و پس‌ازاین مرحله ۱/۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. سامانه آبیاری قطره‌ای نواری در همه سطوح پس از محو شدن همه آب در سطح کرت در انتهای مرحله موردنظر با به‌کارگیری لترال‌هایی با روزنه‌های به فاصله ۲۰ سانتی‌متر در هر ردیف کشت اجرا شده بود.

شکل ۲- کرت‌بندی مزرعه آزمایشی برای تیمارهای مختلف آبیاری و کوددهی (شعاعی پرچین و همکاران، ۱۴۰۱)



شکل ۳- نقشه طرح آزمایشی اجرا شده (شعاعی پرچین و همکاران، ۱۴۰۱)

برای تعیین عملکرد و زیست‌توده برنج، از هر کرت ۲۵ بوته (یک مترمربع) با در نظر گرفتن حاشیه‌ها انتخاب و کف بر و میزان عملکرد تعیین شده بود.

مدل ORYZA2000

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. بااین‌حال حدود ۱۰ درصد از پارامترهای گیاهی برای هر رقم، ویژه است و سایر پارامترها برای تمامی ارقام برنج مشابه است (Bouman et al., 2001). پارامترهایی نظیر سطح ویژه برگ، ضرایب توزیع ماده خشک، سرعت رشد نسبی سطح برگ، سرعت مرگ برگ، سرعت توسعه فنولوژیکی و کسر ذخیره ساقه نیاز به واسنجی دارند. پارامتر سرعت توسعه فنولوژیکی براساس افزایش روزانه در واحدهای حرارتی برای مراحل مختلف فنولوژیکی گیاه شامل مرحله رشد رویشی پایه، مرحله حساس به طول روز، مرحله رشد خوشه اولیه (تشکیل پانیکول) و مرحله پرشدن دانه محاسبه شده است. ماده خشک تولید شده به‌وسیله گیاه زراعی بین اندام‌های هوایی و ریشه‌ها بر پایه ضرایب تسهیم تعریف‌شده تقسیم می‌شوند که تابعی از مرحله نمو فنولوژیک است. مواد فتوسنتزی موجود در اندام‌های هوایی بین بخش‌های مختلف گیاهی از جمله برگ‌ها، ساقه‌ها و اندام‌های ذخیره‌ای (خوشه و دانه) تقسیم می‌شود. سطح ویژه برگ از نسبت سطح برگ‌ها در واحد وزن، سرعت رشد نسبی برگ از افزایش روزانه کل سطح برگ در واحد سطح زمین (شاخص سطح برگ) و سرعت مرگ و میر برگ از کاهش ماده خشک برگ در اثر پیری تعریف می‌شود. کسر ذخایر ساقه، عبارتست از مقدار مواد فتوسنتزی (نشاسته و قند) که در ساقه (ساقه و غلاف برگ) تجمع می‌یابد و در طول مدت رسیدگی و پر شدن دانه به اندام‌های ذخیره‌ای (دانه‌ها) انتقال یا انتقال مجدد می‌یابد. این پارامترهای گیاهی از داده‌های آزمایشی تحت شرایط تولید پتانسیل در مزرعه به دست آمدند.

در مدل ORYZA2000 واسنجی از طریق دو برنامه PARAM و DRATES اجرا می‌شود (Bouman et al., 2001). از برنامه DRATES برای تعیین مؤلفه سرعت توسعه فنولوژیکی و از برنامه PARAM برای تعیین وزن برگ مرده، وزن خوشه و ساقه، وزن برگ سبز، زیست‌توده بالای سطح خاک، میزان نیتروژن برگ و شاخص سطح برگ استفاده شد. داده‌های هواشناسی موردنیاز برای اجرای مدل تهیه و وارد مدل شد. ویژگی‌های هیدرولیکی و فیزیکی خاک تحت شرایط مدیریت آبیاری دربردارنده پارامترهای هیدرولیکی حجمی در رابطه وانگنوختن (پارامترهای α، n و λ) تعیین شد. رطوبت نیز در نقاط اشباع (θ_{SAT})، ظرفیت مزرعه‌ای (θ_{FC})، نقطه پژمردگی دائم (θ_{PWP})، هدایت هیدرولیکی اشباع (K_{SAT}) و نیز میزان نفوذ عمقی و نشت محاسبه شد. همچنین تاریخ خزانه‌گیری، تعداد روز در خزانه، تعداد نشا در کپه، تعداد کپه در مترمربع، روز ظهور خوشه، مقدار و زمان آب آبیاری و در مورد گیاه برنج، عملکرد دانه و عملکرد زیستی گیاه به‌عنوان پارامترهای مدیریتی برای اجرای مدل در نظر گرفته شدند.

شاخص بهره‌وری آب

برای تعیین بهره‌وری آب بر پایه عملکرد دانه از رابطه ۱ استفاده شد که حاصل تقسیم عملکرد دانه بر مقدار آب مصرفی است (توکلی و موسوی، ۱۳۸۵):

$$CWU_{bg} = \frac{Y_g}{CW} \quad (۱)$$

در این روابط CWU_{bg} بهره‌وری آب بر پایه عملکرد دانه (kg/m^3)، Yg عملکرد دانه (kg/ha)، و CW مقدار آب مصرفی (m^3/ha) است.

شاخص‌های آماری

برای ارزیابی توانایی مدل در شبیه‌سازی عملکرد برنج، از شاخص‌های آماری جذر مجموع مربعات خطا (RMSE)، جذر مجموع مربعات خطا نرمال شده (NRMSE)، ضریب تبیین (R) و ضریب رگرسیونی خطی (R^2) مقادیر اندازه‌گیری شده در برابر مقادیر شبیه‌سازی شده استفاده شد. برای تعیین بیش‌برآوردها و کم‌برآوردها نیز از معیار خطای نسبی (R_r) استفاده شد. این شاخص‌ها با استفاده از روابط ۲ تا ۵ محاسبه می‌شوند:

$$RMSE = \sum_{I=1}^{n}(P_i - O_i)^2/n)^{0.5} \quad (۲)$$

$$\mathrm{NRMSE} = 100(\sum_{I=1}^{n}(P_i - O_i)^2/n)^{0.5}/\bar{O}) \quad (۳)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \bar{O})^2} \quad (۴)$$

$$R_r = \frac{P_i - O_i}{O_i} \times 100 \quad (۵)$$

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

مقادیر RMSE و NRMSE در حالت مطلوب (مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده مساوی باشند) برابر با صفر هستند. به عبارت دیگر هرچه مقدار این دو مؤلفه به صفر نزدیک‌تر باشد مدل دقیق‌تر

است. چنانچه NRMSE کمتر از ۱۰ درصد باشد نشان‌دهنده حالت عالی شبیه‌سازی و بین ۲۰-۱۰ درصد حالت خوب، بین ۳۰-۲۰ درصد حالت متوسط و بالای ۳۰ درصد حالت ضعیف شبیه‌سازی است (Rinaldi et al, 2003). بازه تغییرات R^2 نیز بین ۰ تا ۱ است. اگر 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

واسنجی مؤلفه‌های گیاهی مدل ORYZA2000

برای واسنجی مدل روش Li et al. (2017) و Bouman and Van Laar (2006) بکار گرفته شد. واسنجی مدل ORYZA2000 با استفاده از داده‌های هواشناسی، داده‌های آزمایشی و داده‌های گیاهی در سال ۱۳۹۷ انجام شد. ابتدا برنامه DRATES[1] اجرا شد که نتیجه آن محاسبه مقادیر سرعت فنولوژیکی در چهار فاز رویشی پایه (DVRJ[2]=۰/۰۰۱۵۵۵)، حساسیت به نور (DVRI[3]=۰/۰۰۰۷۵۸)، شکل‌گیری سنبلچه (DVRP[4]=۰/۰۰۰۷۹۵) و مرحله پر شدن دانه (DVRR[5]=۰/۰۰۱۹۹۴) بر اساس (درجه سلسیوس-روز) است. سپس برنامه PARAM با هدف محاسبه سرعت رشد نسبی برگ (RGRLMX[6]=۰/۰۰۹۵) و کسر ذخیره ساقه (FSTR[7]=۰/۰۶۸) به‌منظور واسنجی پارامترهای گیاهی اجرا شد.

ارزیابی مدل برای مقادیر عملکرد دانه

نتایج واسنجی و اعتبارسنجی مدل با استفاده از داده‌های عملکرد سال ۱۳۹۷ و ۱۳۹۸ در جدول ۳ و شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است. مطابق جدول ۳ و شکل ۴، RMSE معادل ۳۹۹/۰۷ $kg.ha^{-1}$ و NRMSE معادل ۵/۶۰ درصد نشان می‌دهد که بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی عملکرد محصول، انطباق مناسبی در شرایط واسنجی وجود دارد. همچنین طبق جدول ۳ و شکل ۵، مقادیر RMSE=۵۷۹/۹۴ $kg.ha^{-1}$ و NRMSE=۹/۵۵٪ در مرحله اعتبارسنجی نشان‌دهنده دقت بالای مدل در پیش‌بینی عملکرد محصول و کیفیت بالای شبیه‌سازی است. مدیری و همکاران (۱۴۰۳) مقادیر NRMSE مربوط به عملکرد برنج را برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل ORYZA2000 به ترتیب ۴ و ۵ درصد و مقادیر R^2 را به ترتیب ۰/۷۹ و ۰/۸۱ محاسبه کردند. فنگ و همکاران مقدار NRMSE را برای واسنجی و اعتبارسنجی عملکرد دانه برنج توسط مدل ORYZA2000 به ترتیب ۱۱ و ۱۹ درصد بیان کردند (Feng et al., 2007). امیری و همکاران (۱۳۹۰) ضریب تبیین عملکرد برنج در مدل ORYZA2000 را در شرایط واسنجی و اعتبارسنجی به ترتیب ۰/۷۱ و ۰/۶۳ بیان کردند. لی و همکاران دقت بسیار بالایی در شبیه‌سازی عملکرد دانه توسط مدل ORYZA2000 گزارش کردند که نشان از توانمندی بالای مدل در شبیه‌سازی عملکرد در محیط‌های مختلف رشد بود (Li et al., 2013). همچنین مقادیر مربوط به شاخص‌های آماری در این پژوهش همسو با نتایج در پژوهش‌های مشابه نظیر Sailaja et al. (2013) و Pang et al. (2014) است. بنابراین مدل از دقت عالی در شبیه‌سازی عملکرد برخوردار است.

جدول ۴ نشان‌دهنده مقادیر میانگین عملکرد دانه اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده و نیز خطای نسبی عملکرد مدل در اثر متقابل تیمارهای آبی و کودی هستند. با توجه به جدول ۴ بالاترین و پایین‌ترین عملکرد دانه شبیه‌سازی شده در سال ۱۳۹۷ به ترتیب مربوط به تیمارهای I2N2 (۷۶۱۵ kg/ha) و I5N1 (۶۱۰۹ kg/ha) و در سال ۱۳۹۸ به ترتیب مربوط به تیمارهای I1N2 (۷۲۱۳ kg/ha) و I5N1 (۵۸۳۵ kg/ha) است. همچنین بالاترین خطای عملکرد در سال ۱۳۹۷ مربوط به تیمار I5N1 (۱۲ درصد) و در سال ۱۳۹۸ مربوط به تیمار I3N1 (۱۷- درصد) بود. امیری و همکاران (۱۳۹۰) بیان کردند که در شرایط واقعی مقدار کود پایین منجر به کاهش سطح ویژه برگ و کاهش سطح برگ می‌شود، در حالی که مدل توانایی ایجاد این کاهش را ندارد. اما در مقادیر کودی بالاتر، تغییر سطح ویژه برگ به‌خوبی توسط مدل انجام می‌شود و منجر به شبیه‌سازی مناسب شاخص سطح برگ و در نهایت عملکرد می‌شود. سایلاجا و همکاران نیز بیان کردند که در مقادیر مصرف پایین نیتروژن مدل ORYZA2000 شاخص سطح برگ را به خوبی عملکرد، شبیه‌سازی نکرد و مقادیر شبیه‌سازی شده در سطح احتمال ۹۵ درصد اختلاف معنی‌داری با مقدار اندازه‌گیری شده داشت (Sailaja et al., 2013). آذرپور و همکاران و سوندهاراجان و سودهیر به ضعف مدل ORYZA2000 در شبیه‌سازی شاخص سطح برگ اشاره کردند (Azarpour et al., 2014; Soundharajan and Sudheer, 2013).

۱- برنامه های طراحی شده برای کمک به پارامترسازی مدل

2- Development rate during juvenile phase

3- Development rate during photoperiod-sensitive phase

4- Development rate during panicle development phase

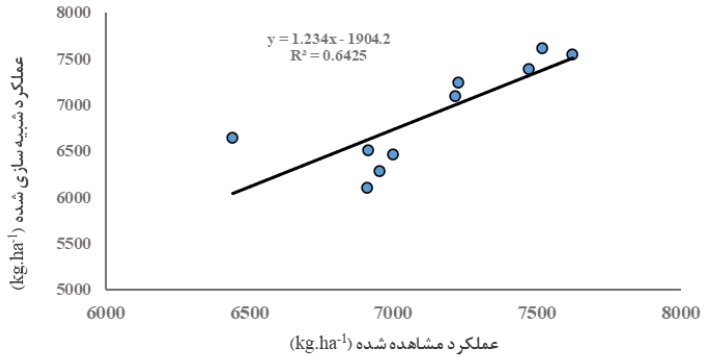
5- Development rate in reproductive phase (post anthesis)

6- Minimum value of relative growth rate of leaf area

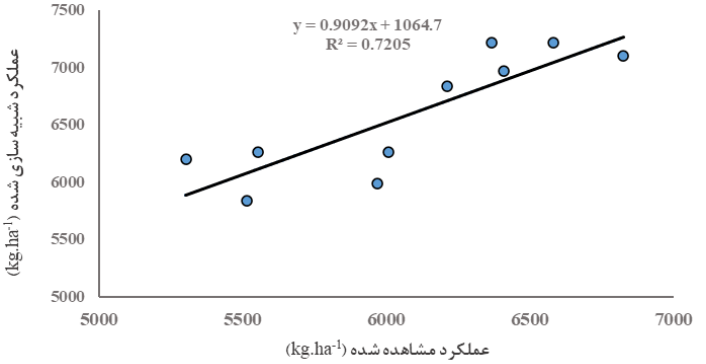
7- Fraction of carbohydrates allocated to stems, stored as reserves

جدول ۳- نتایج واسنجی و اعتبارسنجی عملکرد دانه توسط مدل ORYZA2000 در سال‌های ۱۳۹۷ و ۱۳۹۸

	سال	تعداد نمونه	RMSE (kg.ha^{-1})	NRMSE (%)	R^2
واسنجی	۱۳۹۷	۱۰	۳۹۹/۰۷	۵/۶۰	۰/۶۴
اعتبارسنجی	۱۳۹۸	۱۰	۵۷۹/۹۴	۹/۵۵	۰/۷۲



شکل ٤- مقادیر مشاهده‌شده و شبیه‌سازی عملکرد دانه طی واسنجی مدل (سال ۱۳۹۷)



شکل ٥- مقادیر مشاهده‌شده و شبیه‌سازی عملکرد دانه طی اعتبارسنجی مدل (سال ۱۳۹۸)

همچنین در این پژوهش تأثیر میزان کوددهی پایین‌تر بر دقت مدل در دوره واسنجی مشهود بود. مؤمن‌زاده و همکاران (۱۴۰۱) دلایل مختلفی نظیر عدم ساختار مناسب مدل‌های ریاضی مورد استفاده در مدل و خطا در اندازه‌گیری پارامترها و نیز واکنش برنج به تنش وارده را از جمله کاهش دقت مدل بین تیمارهای مختلف بیان کردند. مدیری و همکاران (۱۴۰۳) بیان کردند که بالا بودن خطای مدل در برخی از تیمارهای با مصرف مقادیر پایین نیتروژن نشان‌دهنده عدم تعیین دقیق پارامترهای مدل در ارتباط بین خاک و شرایط محیطی در این مقادیر مصرفی است. به گونه‌ای که پارامترهای مدل برای صحت نتایج شبیه‌سازی در مقادیر بالاتر مصرف نیتروژن به طرز دقیق‌تری برآورد را صورت داده و اندازه‌گیری‌های مرتبط به ورودی داده‌ها با دقت و صحت بالا انجام شد.

بهره‌وری آب در تیمارهای مختلف آبی و کودی

حجم کل آب داده شده در هر تیمار آبیاری در طول دوره رشد گیاه در دو سال ۱۳۹۷ و ۱۳۹۸ در جدول ۵ ارائه شده است. مقایسه این مقادیر نشان می‌دهد اعمال روش آبیاری قطره‌ای (نواری) در مزارع شالیزاری می‌تواند در مصرف آب باعث صرفه‌جویی شود. لازم به ذکر است که مقادیر جدول ۵ شامل آب مورد نیاز برای آماده‌سازی زمین (مرحله گِل خرابی) نیز می‌شود.

مقادیر بهره‌وری آب بر اساس نتایج حاصل از خروجی مدل ORYZA2000 و مقادیر مشاهده‌شده طی دو سال ۱۳۹۷ و ۱۳۹۸ در جدول ۶ نشان داده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده از داده‌های خروجی مدل، بیشترین بهره‌وری عملکرد دانه در هر دو سال ۱۳۹۷ و ۱۳۹۸ مربوط به تیمار I2N2 بود که با داده‌های مشاهده‌ای تطابق داشت.

جدول ٤- مقدار میانگین عملکرد دانه اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده ($kg.ha^{-1}$) در تیمارهای مختلف در سال‌های ۱۳۹۷ و ۱۳۹۸

تیمار	۱۳۹۷			۱۳۹۸		
	اندازه‌گیری شده	شبیه‌سازی شده	خطای نسبی	اندازه‌گیری شده	شبیه‌سازی شده	خطای نسبی
I1N1	۶۹۱۲	۶۵۱۵	۶	۵۵۵۴	۶۲۵۸	−۱۳
I1N2	۷۶۲۴	۷۵۴۴	۱	۶۳۶۵	۷۲۱۳	−۱۲
I2N1	۶۴۴۲	۶۶۴۰	−۳	۶۰۰۶	۶۲۵۹	−۴
I2N2	۷۵۲۰	۷۶۱۵	−۱	۶۵۸۲	۷۲۱۱	−۱۰
I3N1	۷۰۰۰	۶۴۶۹	−۸	۵۳۰۳	۶۱۹۸	−۱۷
I3N2	۷۴۷۲	۷۳۹۱	−۱	۶۸۲۴	۷۱۰۲	−۴
I4N1	۶۹۵۲	۶۲۸۹	۱۰	۵۹۶۹	۵۸۹۴	۰
I4N2	۷۲۲۷	۷۲۴۰	۰	۶۴۰۹	۶۹۷۲	−۹
I5N1	۶۹۰۹	۶۱۰۹	۱۲	۵۵۱۶	۵۸۳۵	−۶
I5N2	۷۲۱۴	۷۰۹۵	۲	۶۲۱۳	۶۸۳۸	−۱۰

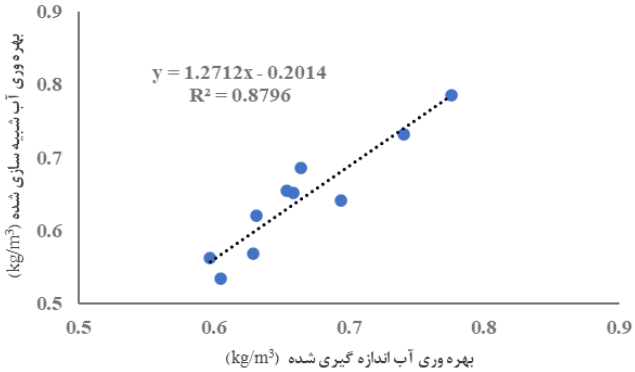
به نظر می‌رسد کاربرد این تیمار در آبیاری برنج ضمن صرفه‌جویی در میزان مصرف آب به دلیل عملکرد بالای محصول می‌تواند از نظر اقتصادی نیز برای کشاورز مناسب باشد. همچنین بر اساس جدول ۶، استفاده از سطح کود $kg.ha^{-1}$ ۱۸۰ به جای سطح کود $kg.ha^{-1}$ ۹۰ سبب افزایش بهره‌وری شده است. تقی‌زاده و همکاران (۱۳۸۷) نشان دادند با افزایش مقدار کود نیتروژن، وزن هزار دانه، عملکرد دانه، زیست‌توده، تعداد کل پنجه‌ها، درصد باروری پنجه‌ها، تعداد خوشه در واحد سطح و تعداد دانه پر در برنج افزایش معنی‌داری می‌یابد. همچنین با توجه به شکل‌های ۶ و ۷ مدل در سال ۱۳۹۸ (سال اعتبارسنجی، R^2=۰/۹۲) نسبت به سال ۱۳۹۷ (سال واسنجی، R^2=۰/۸۸) از دقت بالاتری در تعیین مقدار بهره‌وری آب برخوردار بوده است.

جدول ۵- مقدار کل آب داده شده ($m^3.ha^{-1}$) به هر تیمار در طول دوره رشد برنج در سال‌های ۱۳۹۷ و ۱۳۹۸

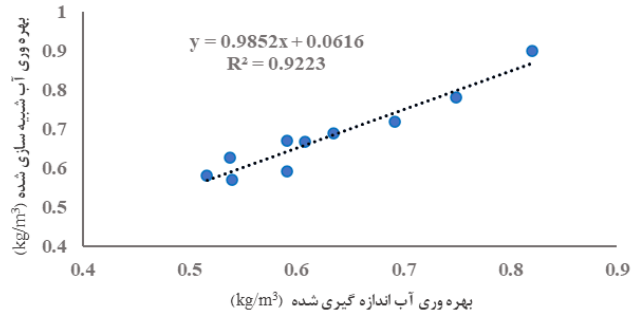
تیمار	1397	1398
I1	۱۱۵۷۱	۱۰۷۷۰
I2	۹۶۹۱	۸۰۲۰
I3	۱۰۰۸۸	۹۸۷۰
I4	۱۱۰۴۹	۱۰۱۰۰
I5	۱۱۴۲۴	۱۰۲۲۰

جدول ٦- مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده بهره‌وری آب بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب آب در دو سال ۱۳۹۷ و ۱۳۹۸

تیمار	1397		1398	
	اندازه‌گیری شده	شبیه‌سازی شده	اندازه‌گیری شده	شبیه‌سازی شده
I1N1	۰/۵۹	۰/۵۶	۰/۵۱	۰/۵۸
I1N2	۰/۶۵	۰/۶۵	۰/۵۹	۰/۶۷
I2N1	۰/۶۶	۰/۶۸	۰/۷۵	۰/۷۸
I2N2	۰/۷۸	۰/۷۸	۰/۸۲	۰/۹۰
I3N1	۰/۶۹	۰/۶۴	۰/۵۴	۰/۶۳
I3N2	۰/۷۴	۰/۷۳	۰/۶۹	۰/۷۲
I4N1	۰/۶۳	۰/۵۷	۰/۵۹	۰/۵۹
I4N2	۰/۶۵	۰/۶۵	۰/۶۳	۰/۶۹
I5N1	/۶۰	۰/۵۳	۰/۵۴	۰/۵۷
I5N2	۰/۶۳	۰/۶۲	۰/۶۱	۰/۶۷



شکل ٦- مقادیر بهره‌وری آب اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در سال ۱۳۹۷



شکل ۷- مقادیر بهره‌وری آب اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در سال ۱۳۹۸

نتیجه‌گیری

شبیه‌سازی عملکرد دانه و بهره‌وری آب با استفاده از مدل ORYZA2000 تحت شرایط مختلف مدیریت آبیاری به‌صورت تلفیقی از روش آبیاری غرقاب و قطره‌ای در مراحل مختلف رشد برنج و نیز اعمال مقادیر مختلف کود نیتروژن در پژوهش حاضر مورد بررسی قرار گرفت تا دقت مدل ارزیابی شود. مقادیر NRMSE عملکرد دانه برای سال واسنجی ۵/۶۰ درصد و برای سال اعتبارسنجی ۹/۵۵ درصد به دست آمد که نشان‌دهنده دقت مناسب و قابل‌قبول مدل است. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که بیشترین بهره‌وری آب در هر دو سال ۱۳۹۷ و ۱۳۹۸ در تیمار I2N2 به ترتیب با ۰/۷۸ و ۰/۹۰ کیلوگرم بر مترمکعب و کمترین بهره‌وری آب در هر دو سال ۱۳۹۷ و ۱۳۹۸ در تیمار I5N1 به ترتیب با ۰/۵۳ و ۰/۵۷ کیلوگرم بر مترمکعب به دست آمد. تیمار I2N2 موجب صرفه‌جویی آب ۱۶/۲۵ درصد در سال ۱۳۹۷ و ۲۵/۵۳ درصد در سال ۱۳۹۸ نسبت به تیمار شاهد (غرقاب) بود، در حالی که از نظر عملکرد دانه اختلاف چندانی با تیمار شاهد نداشت (۱/۳۶ درصد عملکرد کمتر در سال ۱۳۹۷ و ۳/۴۱ درصد عملکرد بالاتر در سال ۱۳۹۸). با توجه به اهمیت مرحله پنجه‌زنی در گیاه برنج و نقش عمده آن در تعیین عملکرد، در شرایط عدم محدودیت آب، تیمار I2N2 برای عملکرد دانه بیشتر و بهره‌وری آب بالاتر می‌تواند گزینه مناسبی باشد ولی در شرایط محدودیت آب، تیمار آبیاری غرقاب دائم تا انتهای مرحله خوشه‌دهی و سپس آبیاری قطره‌ای نواری با ۵۰ درصد مقدار آب آبیاری غرقاب دائم تا انتهای مرحله رشد (I3) گزینه مناسبی در منطقه مورد مطالعه محسوب می‌شود. بنابراین با توجه به نتایج این تحقیق می‌توان گفت که مدل ORYZA2000 علیرغم ایجاد خطای بالاتر در شرایط سطوح پایین کود نیتروژن، دارای توانایی خوبی در شبیه‌سازی عملکرد برنج و بهره‌وری آب تحت مدیریت‌های مختلف آبیاری تلفیقی غرقاب و قطره‌ای است. همچنین پیشنهاد می‌شود توانایی مدل برای بررسی سناریوهای دیگر در خصوص تلفیق روش‌های آبیاری مختلف در کشت برنج با توجه به محدودیت منابع آب و حساسیت مراحل رشد برنج، مورد بررسی قرار گرفته تا بتوان به درجه اطمینان بالاتری نسبت به کارآیی مدل خصوصاً در شرایط تنش آبی دست یافت.

منابع

اعلایی بازکیایی، پ.، کامکار، ب.، امیری، ا.، کاظمی، ح. و رضایی، م. ۱۳۹۹. ارزیابی مدل ORYZA2000 در شبیه سازی عملکرد و بهره‌وری تولید برنج تحت مدیریت‌های زراعی. پژوهش‌های حفاظت آب و خاک (علوم کشاورزی و منابع طبیعی). ۲۷ (۱): ۶۹-۴۹.

امیری، ا.، رضایی، م. و بنایان اول، م. ۱۳۹۰. ارزیابی مدل رشد گیاهی برنج ORYZA2000 در شرایط محدودیت آبیاری و کود نیتروژن (واسنجی و اعتباریابی). آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). ۲۵ (۴): ۷۵۷-۷۶۹.

امیری لاریجانی، ب.، طهماسبی سروستانی، ز. و نعمت‌زاده، ق. ۱۳۹۲. شبیه‌سازی شاخص سطح برگ, زیست‌توده و عملکرد دانه ارقام برنج در سنین مختلف گیاهچه‌ای با استفاده از مدل ORYZA2000. مجله به زراعی نهال و بذر (نهال و بذر). ۲۹-۲(۳): ۳۰۲-۲۸۳.

تقی‌زاده، م.، اصفهانی، م.، دواتگر، ن. و مدنی، ح. ۱۳۸۷. تأثیر دور آبیاری و مقادیر مختلف نیتروژن بر عملکرد و اجزای عملکرد برنج رقم طارم هاشمی در رشت. یافته‌های نوین کشاورزی. ۲(۴): ۳۵۳-۳۶۴.

توکلی، ع. و موسوی، ف. ۱۳۸۵، اصول کاربردی کم‌آبیاری، انتشارات کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران، ۲۹۴ صفحه.

سید جلیلی، س. ۱۴۰۰. بررسی تلفیق روش‌های آبیاری کرتی و قطره‌ای در دو سطح کود نیتروژن بر بهره‌وری آب، عملکرد و اجزای عملکرد برنج رقم هاشمی در منطقه رشت. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم کشاورزی دانشگاه گیلان.

شبان، م.، هزارجریبی، ا.، اسدی، م.ا. و قربانی، خ. ۱۴۰۲. ارزیابی مدل‌های ORYZA2000 و VSM در شبیه‌سازی عملکرد برنج تحت مدیریت‌های آبیاری. پژوهش آب ایران. ۱۷(۱): ۲۳-۱۱.

شعاعی پرچین، ن.، بیگلوئی، م.، محسن‌آبادی، غ. و فرهنگی، م.ب. ۱۴۰۱. تأثیر تلفیق روش‌های آبیاری غرقابی و قطره‌ای در سطوح مختلف کود نیتروژن و تعداد نشا بر عملکرد و بهره‌وری آب برنج. مدیریت آب در کشاورزی. ۹(۱): ۱۳۵-۱۴۸.

مدیری، ا.، براری تاری، د.، امیری، ا.، نیک نژاد، ی. و فلاح آملی، ه. ۱۴۰۳. شبیه‌سازی سطح برگ، عملکرد و مقدار نیتروژن برنج در مدیریت مختلف مصرف نیتروژن با استفاده از مدل ORYZA2000، به‌زراعی کشاورزی. ۲۶ (۲): ۲۵۲-۲۳۵.

مؤمن‌زاده، س.ف، قلی‌پوری، ع.، آل‌ابراهیم، م. و امیری، ا. ۱۴۰۱. ارزیابی مدل ORYZA2000 برای پیش‌بینی تولید ارقام برنج تحت مدیریت آبیاری غرقاب و تنش خشکی. مجله آبیاری و زهکشی ایران. ۱۶(۱): ۲۱۷-۲۲۹.

Arora, V.K. 2006. Application of a rice growth and water balance model in an irrigated semi-arid subtropical environment, Agricultural Water Management. 83(1–2): 51-57.

Azarpour, E., Moraditochaee, M. and Bozorgi, H. R. 2014. Calibration and evaluation of the rice growth ORYZA 2000 model under nitrogen fertilizer Management in paddy fields of Iran. Bulletin of Environment, Pharmacology and Life Sciences. 3: 184-193.

Bouman, B.A.M. and Kropff, M.J. 2001 Tuong, T.P., Wopereis, M.C.S., ten Berge, H.F.M. and van Laar, H.H., 2001. ORYZA2000: Modeling Lowland Rice. Los Banos, Philippines.

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.

Cai, X. and 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. 163–178.

Dai, J., Li, R., Li, C., Lu, Y. and Zou, C. 2021. Simulation of Effects of Different Water and Fertilizer Treatments on Maize Growth with AquaCrop in Hetao Irrigated Area. Journal of Soil and Water Conservation. 35(3): 312-319.

Dehghan Moroozeh, A., Bansouleh, B.F., Ghobadi, M. and Ahmadpour, A. 2023. Assessment of DSSAT and AquaCrop models to simulate soybean and maize yield under water stress conditions. Spanish Journal of Agricultural Research, 21(3): e1201.

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

Feng, L., Bouman, B.A.M., Tuong, T.P., Cabangon, R. J., Li, Y., Lu, G. and Feng, Y. 2007. Exploring options to grow rice using less water in northern China using a modelling approach: I. Field experiments and model evaluation. Agricultural Water Management. 88(1-3): 1-13.

Hashemi, M., Zadeh, H. M., Arasteh, P. D. and Zarghami, M. 2019. Economic and environmental impacts of cropping pattern elements using systems dynamics. Civil Engineering Journal. 5(5): 1020-1032. doi:10.28991/CEJ-2019-03091308

Huai, H., Zhang, Q., Li, Z., Liang, L. and 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.

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

Ishfaq, M., Farooq, M., Zulfiqar, U., Hussain, S., Akbar, N., Nawaz, A., and Anjum, S. A. 2020. Alternate wetting and drying: A water-saving and ecofriendly rice production system. Agricultural Water Management, 241: 106363.

Jin, L., Wei, D., and Yin, D. 2023. Research progress on

467(7311): 43-51.
Prathumchai, K., Nagai, M., Tripathi, N. K. and 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.
Rao, K. V. R., Gangwar, S., Keshri, R., Chourasia, L., Bajpai, A. and Soni, K. 2017. Effects of drip irrigation system for enhancing rice (Oryza sativa L.) yield under system of rice intensification management. Applied Ecology & Environmental Research. 15(4): 487-495.
Richards, M. and Sander, B. 2014. Alternate wetting and drying in irrigated rice. IRRI CCAFS and Info Notes. http://www.agritech.tnau.ac.in/agriculture/pdf/csa_pdf/Alternate_wetting_and_drying_in_irrigated_rice_InfoNote.pdf
Rinaldi, M., Losavio, N. and Flagella, Z. 2003. Evaluation and application of the OILCROP–SUN model for sunflower in southern Italy. Agricultural Systems. 78(1): 17-30.
Saadati, Z., Pirmoradian, N. and 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 .
Sailaja, B., Voleti, S. R., Subrahmanyam, D., Nathawat, M. S. and Rao, N. H. 2013. Validation of Oryza2000 model under combined nitrogen and water limited situations. Indian Journal of Plant Physiology. 18: 31-40.
Sandhu, R. and Irmak, S. 2019. Performance of AquaCrop model in simulating maize growth, yield, and evapotranspiration under rainfed, limited and full irrigation. Agricultural Water Management. 223: 105687.
Shadpour-Rashti, M., Khaledian, M., Biglouei, M. and Rezaei, M. 2017. Using the PILOTE Model to Improve Water Productivity for Rice in Rasht, North of Iran. International Journal of Agricultural Management and Development (IJAMAD). 7(4): 477-487.
Soman, P., Singh, S., Bhardwaj, A. K., Pandiaraj, T. and Bhardwaj, R. K. 2018. On-farm drip irrigation in rice for higher productivity and profitability in Haryana, India. International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences. 7(02): 506-512.
Soundharajan, B. and Sudheer, K. P. 2013. Sensitivity analysis and auto-calibration of ORYZA2000 using simulation-optimization framework. Paddy and Water Environment. 11: 59-71.
Xue, C., Yang, X., Bouman, B. A., Deng, W., Zhang, Q., Yan, W. and Wang, H. 2008. Optimizing yield, water requirements, and water productivity of aerobic rice for the North China Plain. Irrigation Science. 26: 459-474.
Yadav, S., Li, T., Humphreys, E., Li, T., Gill, G. and greenhouse microclimate simulation and greenhouse crop growth modeling. J.Shanxi Agric. Univ. (Nat. Sci. Ed.). 43: 55–64.
Kawakita, S., Yamasaki, M., Teratani, R., Yabe, S., Kajiya-Kanegae, H., Yoshida, H., Fushimi, E. and 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.
Li, T., Angeles, O., Marcaida III, M., Manalo, E., Manalili, M. P., Radanielson, A. and Mohanty, S. 2017. From ORYZA2000 to ORYZA (v3): An improved simulation model for rice in drought and nitrogen-deficient environments. Agricultural and forest meteorology. 237: 246-256.
Li, T., Humphreys, E., Gill, G. and 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.
Li, T., Raman, A.K., Marcaida III, M., Kumar, A., Angeles, O. and Radanielson, A. M. 2013. Simulation of genotype performances across a larger number of environments for rice breeding using ORYZA2000. Field Crops Research. 149: 312-321.
Mojid, M.A. and Mainuddin, M. 2021. Water-saving agricultural technologies: Regional hydrology outcomes and knowledge gaps in the eastern gangetic plains-a review. Water, 13(5): 636. 10.3390/w13050636
Nabipour, R., Yazdani, M.R., Mirzaei, F., Ebrahimian, H., and Mobaraki, F.A. 2024. Water productivity and yield characteristics of transplanted rice in puddled soil under drip tape irrigation. Agricultural Water Management. 295: 108753.
Najafi, S., Khaledian, M. and Rezaei, M. 2021. Evaluation of water productivity with three rice genotypes under different irrigation regimes and nitrogen fertilizer treatments in Rasht, northern Iran. Irrigation and Drainage. 70(4): 679-689.
Nisar, S. and Arora, V.K. 2018. Analyzing Dry-Seeded Rice Responses to Planting Time and Irrigation Regimes in a Subtropical Environment Using ORYZA2000 Model. Agricultural Research. 7(4): 424–431.
Pang, G. B., Li, Y., Xu, Z. H. and Gao, H. Z. 2014. Calibration and Evaluation of ORYZA2000 under Water and Nitrogen managements. Applied Mechanics and Materials. 641: 246-250.
Peng, J., Liu, T., Chen, J., Li, Z., Ling, Y., De Wulf, A. and 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.
Piao, S., Ciais, P., Huang, Y., Shen, Z., Peng, S., Li, J. and Fang, J. 2010. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China. Nature.

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.

Yu, Q. and Cui, Y. 2022. Improvement and testing of ORYZA model water balance modules for alternate wetting and drying irrigation. Agricultural Water Management. 271: 107802

Yuana. S., Penga. S. and Lib. 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(1): 115-125.

Zhou, D., Wang, H., Wang, X., Wang, F., Zhang, J. and Ma, D. 2024. Evaluation of AquaCrop's ability to simulate water stress based on 2-year case study of maize crop. Agronomy. 14(2): 354.

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 4, Vol. 19, Oct.-Nov. 2025, p. 595-607

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۴، جلد ۱۹، مهر - آبان ۱۴۰۴، ص. ۶۰۷-۵۹۵

Simulation of Rice Grain Yield and Water Productivity under Different Irrigation Managements Using the ORYZA2000 Model

E. Yousefi[1]*, M.H. Biglouie[2], M.R. Khaledian[3], E. Amiri[4]
Recived: Apr.04, 2025 Accepted: May.31, 2025

Abstract

The aim of the current research is to simulate grain yield and water productivity in the production of Tarom Roshan rice cultivar under different irrigation and nitrogen fertilizer management methods and using the ORYZA2000 model, and to determine the best treatment combination of combined irrigation and nitrogen fertilizer in lowland conditions. To achieve this goal, data from previous research conducted at the research farm of the Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan during 2018 and 2019 were used. This research was conducted in split plots in a randomized complete block design with the main treatment of irrigation management at 5 levels including; permanent flooding during the plant growth period (control I1), tape drip irrigation after tillering stage (I2), after clustering stage (I3), after flowering stage (I4) and after pulping stage (I5) with 50% of permanent flooding irrigation water and sub-treatment of two levels of nitrogen fertilizer including 90 kg.ha-1 (N1) and 180 kg.ha-1 (N2) from urea source were implemented in three replications. Data from 2018 and 2019 were used for model calibration and validation, respectively. The RMSE and NRMSE statistical indices were 399.07 kg.ha^{-1} and 5.60% for 2018 and 579.94 kg.ha^{-1} and 9.55% for 2019, respectively, indicating excellent accuracy of the model. The highest simulated water productivity was obtained in 2018 and 2019 with 0.78 and 0.90 kg/m^3 in the I2N2 treatment, respectively, and the lowest was obtained in 2018 and 2019 with 0.53 and 0.57 kg/m^3 in the I5N1 treatment, respectively. The I2N2 treatment had a water saving of 16.25% in 2018 and 25.53% in 2019 compared to the control treatment (permanent flooding), while there was no significant difference in grain yield with the control treatment.

Keywords: Calibration, Permanent flooding, Tarom-Roshan, Tape drop, Validation

1- Master's 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
3- Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran
4- Professor, Water Engineering Department, Lahijan Branch, Islamic Azad University, Lahijan, Iran
(*- Corresponding Author Email: yousefi13843@gmail.com)