University of Guilan
Faculty of Agricultural Sciences

Cereal Research
Vol. 16, No. 1, 2026 (1-16)
Home page: https://cr.guilan.ac.ir/
pISSN: 2252-0163 eISSN: 2538-6115

Simulation of the effects of irrigation and nitrogen management on rice yield and green/blue water productivity using ORYZA2000

Parvin Zolfaghary[1], AbuTaleb HezarJeribi[2], Mojtaba Rezaei[3] and Ebrahim Amiri[4]✉

1. Ph.D. Graduate, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Water and Soil, Gorgan University of Agricultural Science and Natural Resources, Gorgan, Iran; 2. Associate Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Water and Soil, Gorgan University of Agricultural Science and Natural Resources, Gorgan, Iran; 3. Research Assistant Professor, Rice Research Institute of Iran, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Rasht, Iran; 4. Professor, Department of Water Engineering, La. C., Islamic Azad University, Lahijan, Iran.
✉ Corresponding author: eamiri57@iau.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received: 5 October 2025
Revised: 10 January 2026
Accepted: 11 February 2026
Available online: 24 February 2026

Keywords:
Crop modeling
Deficit irrigation
Farm water balance
Flood irrigation
Nitrogen uptake

Abstract

Introduction: Irrigated rice, as one of the most important cereals worldwide and a crop with high water requirements, is increasingly exposed to risks of water scarcity, low nitrogen use efficiency, and environmental impacts resulting from excessive fertilizer application. In this context, proper management of irrigation and fertilization, as well as the distinction between green water (soil moisture derived from rainfall) and blue water (withdrawn from surface and groundwater sources), combined with the application of process-based models such as ORYZA2000, can play a significant role in enhancing productivity and reducing pressure on natural resources. The aim of this study was to evaluate the effects of irrigation and nitrogen management on rice yield and green and blue water productivity indices using the ORYZA2000 model.

Materials and Methods: The experiment was conducted as split plots in a randomized complete block design with three replications and 16 treatments over two cropping years at the Rice Research Institute of Iran, Rasht, Iran. The main factor was four irrigation regimes (permanent flooding, irrigation 1, 3, and 5 days after surface water disappearance) and the subfactor was four nitrogen levels (0, 60, 90, and 120 $kg.ha^{-1}$). The hybrid rice 'Bahar' was used, due to its high yield potential and good adaptability to the climatic conditions of Guilan province, and grain yield, biomass, leaf area index, and nitrogen uptake were measured. The ORYZA2000 model was used for calibration and validation, and then, the results of water balance simulation were used to estimate blue and green water productivity indices as well as the components of the water balance.

Results and Discussion: The results indicated that the highest grain yield (7.2 $t.ha^{-1}$) was obtained with 120 $kg.ha^{-1}$ nitrogen and irrigation three days after surface water disappearance. The ORYZA2000 model successfully simulated grain yield, biomass, total nitrogen, grain nitrogen, and leaf area index with normalized root mean square error (NRMSE) of 7-12%, 6-12%, 8-15%, 9-10%, and 14-29%, respectively. The model efficiency for all indices, except leaf area index, was higher than 0.65. The coefficient of determination (R^2) for all indices was also higher than 0.70, indicating a good fit between the measured and simulated data. The highest two-year average values of simulated water productivity indices were obtained with the 120 $kg.ha^{-1}$ nitrogen + irrigation three days after surface water disappearance. Separating the productivity indices into green and blue components showed that this treatment was the maximum for most blue and green water productivity indices, but the highest green water productivity and green water transpiration productivity indices were obtained with the 120 $kg.ha^{-1}$ nitrogen + irrigation five days after surface water disappearance and 120 $kg.ha^{-1}$ nitrogen + permanent flooding, respectively.

Conclusion: Irrigation and nitrogen management plays a key role in improving rice yield and irrigation water productivity. The ORYZA2000 model demonstrated high accuracy in simulating management scenarios and analyzing water balance components, and thus can serve as a valuable decision-support tool in water and fertilizer resource policy-making for rice-growing regions.

Cite this article: Zolfaghary, P., Rezaei, M., HezarJeribi, A., & Amiri, E. (2026). Simulation of irrigation and nitrogen management effects on rice yield and green/blue water productivity using ORYZA2000. *Cereal Research*, *16*(1), 1-16. doi: 10.22124/CR.2026.31892.1882.

© The Author(s) retain the copyright.
DOI: https://doi.org/10.22124/CR.2026.31892.1882. **Punlisher:** University of Guilan

تحقیقات غلات
دوره شانزدهم، شماره اول، ۱۴۰۵ (۱۶-۱)
Home page: https://cr.guilan.ac.ir/
شاپا چاپی: ۰۱۶۳-۲۲۵۲ شاپا الکترونیکی: ۶۱۱۵-۲۵۳۸

شبیه‌سازی اثر مدیریت آبیاری و نیتروژن بر عملکرد برنج و بهره‌وری آب سبز و آبی با مدل ORYZA2000

پروین ذوالفقاری[۱]، ابوطالب هزارجریبی[۲]، مجتبی رضایی[۳] و ابراهیم امیری[۴]✉

۱- دانش‌آموخته دکتری، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران؛ ۲- دانشیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران؛ ۳- استادیار پژوهش، موسسه تحقیقات برنج کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، رشت، ایران؛ ۴- استاد، گروه مهندسی آب، واحد لاهیجان، دانشگاه آزاد اسلامی، لاهیجان، ایران.
✉ نویسنده مسئول: eamiri57@iau.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۱۳
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۰/۲۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۲۲
انتشار آنلاین: ۱۴۰۴/۱۲/۰۵

واژه‌های کلیدی:
آبیاری غرقابی
بیلان آبی مزرعه
جذب نیتروژن
کم‌آبیاری
مدل‌سازی گیاهی

چکیده

مقدمه: برنج آبی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین غلات جهان و محصولی با نیاز آبی زیاد، در معرض خطر کم‌آبی، بهره‌وری کم نیتروژن و اثرات زیست‌محیطی ناشی از مصرف بی‌رویه کود قرار دارد. در این میان، مدیریت صحیح آبیاری و کوددهی و همچنین تفکیک منابع آبی به آب سبز (رطوبت ناشی از بارندگی) و آب آبی (آب برداشت‌شده از منابع سطحی و زیرزمینی)، همراه با استفاده از مدل‌های فرآیندمحور مانند ORYZA2000، می‌تواند در ارتقای بهره‌وری و کاهش فشار بر منابع طبیعی نقش مؤثری ایفا کند. هدف از این پژوهش، ارزیابی اثرات توأم مدیریت آبیاری و نیتروژن بر عملکرد برنج و شاخص‌های بهره‌وری آب سبز و آبی با استفاده از مدل ORYZA2000 بود.

مواد و روش‌ها: آزمایش به‌صورت کرت‌های خردشده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار و ۱۶ تیمار طی دو سال زراعی در مؤسسه تحقیقات برنج کشور در رشت اجرا شد. عامل اصلی چهار سطح آبیاری (غرقاب دائم، آبیاری ۱، ۳ و ۵ روز پس از محو آب از سطح زمین) و عامل فرعی چهار سطح نیتروژن (صفر، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ کیلوگرم در هکتار) بودند. رقم مورد استفاده، برنج هیبرید «بهار» بود که به‌دلیل عملکرد بالا و سازگاری با شرایط اقلیمی گیلان انتخاب و صفات عملکرد دانه، زیست‌توده، شاخص سطح برگ و جذب نیتروژن اندازه‌گیری شد. برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل ORYZA2000 به‌کار گرفته شد و سپس نتایج مدل‌سازی بیلان آب برای شبیه‌سازی شاخص‌های بهره‌وری آب آبی و سبز و اجزای تعادل آبی مورد استفاده قرار گرفت.

نتایج و بحث: نتایج نشان داد که بیش‌ترین عملکرد دانه (۷/۲ تن در هکتار) با مصرف ۱۲۰ کیلوگرم نیتروژن و آبیاری سه روز بعد از محو آب از سطح زمین به‌دست آمد. مدل ORYZA2000 توانست عملکرد دانه، زیست‌توده، نیتروژن کل، نیتروژن دانه و شاخص سطح برگ (به‌ترتیب با ریشه مربعات خطای نرمال شده ۱۲-۷ درصد، ۱۲-۶ درصد، ۱۵-۸ درصد، ۱۰-۹ درصد و ۲۹-۱۴ درصد) را در سطح قابل قبولی شبیه‌سازی کند. عملکرد مدل در تمامی شاخص‌ها به‌جز شاخص سطح برگ از ۰/۶۵ بالاتر بود. مقدار ضریب تبیین (R^2) برای تمامی شاخص‌ها نیز بالاتر از ۰/۷ بود که بیانگر برازش مطلوب مدل بین داده‌های اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده بود. بیش‌ترین مقدار متوسط دو ساله شاخص‌های بهره‌وری آبی شبیه‌سازی شده در تیمار آبیاری سه روز پس از محو آب از سطح زمین + ۱۲۰ کیلوگرم نیتروژن به‌دست آمد. تفکیک شاخص‌های بهره‌وری به اجزای سبز و آبی نشان داد که این تیمار برای بیش‌تر شاخص‌های بهره‌وری آب آبی و سبز بیشینه بود، اما بیشینه مقدار شاخص‌های بهره‌وری آب سبز و بهره‌وری تعرق ناشی از آب سبز به‌ترتیب در تیمارهای آبیاری پنج روز پس از محو آب از سطح زمین + ۱۲۰ کیلوگرم نیتروژن و آبیاری غرقاب دائم + ۱۲۰ کیلوگرم نیتروژن به‌دست آمد.

نتیجه‌گیری: مدیریت آبیاری و نیتروژن نقش اساسی در بهبود عملکرد برنج و بهره‌وری آب آبیاری دارند. مدل ORYZA2000 دقت بالایی در شبیه‌سازی سناریوهای مدیریتی و تحلیل اجزای تعادل آبی نشان داد و می‌تواند به‌عنوان ابزار تصمیم‌گیری در سیاست‌گذاری منابع آب و کود در مناطق برنج‌خیز کشور مورد استفاده قرار گیرد.

نحوه استناد به این مقاله: ذوالفقاری، پروین، رضایی، مجتبی، هزارجریبی، ابوطالب، و امیری، ابراهیم. (۱۴۰۵). شبیه‌سازی اثر مدیریت آبیاری و نیتروژن بر عملکرد برنج و بهره‌وری آب سبز و آبی با مدل ORYZA2000. *تحقیقات غلات*، *۱۶*(۱)، ۱۶-۱. doi: 10.22124/CR.2026.31892.1882

ناشر: دانشگاه گیلان

© حق چاپ برای نویسنده(گان) محفوظ است.

مقدمه

برنج (*Oryza sativa* L.) یکی از مهم‌ترین غلات در سطح جهان است، به‌طوری که برنج آبی بیش از ۷۵ درصد از کل تولید جهانی برنج را تأمین می‌کند (Singh *et al*., 2021). برای پاسخ به افزایش ۶۰ درصدی تقاضای جهانی غذا تا سال ۲۰۵۰ (Kumawat, 2025)، یافتن روش‌های نوآورانه‌ای برای بهینه‌سازی تولید غذا (به‌ویژه برنج) و مصرف آب و نیتروژن (N) ضروری است. هم‌زمان، گزارش‌های تحلیلی معاصر نشان می‌دهند که شکاف بهره‌وری آب و نیتروژن در سامانه‌های برنج آبی، اگر بدون مدیریت تلفیقی باقی بماند، می‌تواند اهداف پایداری تولید را با چالش جدی مواجه کند. از این‌رو رویکردهای نوین مبتنی بر مدیریت همزمان آب و نیتروژن و استفاده از مدل‌های فرآیندمحور برای سیاست‌گذاری کارا ضروری است (Rosolem *et al*., 2017; Plett *et al*., 2020).

برنج آبی به‌عنوان محصولی با نیاز آبی بالا شناخته می‌شود (Sivapalan, 2015). از طرفی کمبود آب در زمین‌های کشاورزی یک معضل جهانی رو به افزایش است، در حالی‌که آب آبیاری به‌دلیل بهره‌وری پایین آبی ناشی از مدیریت نامناسب منابع هدر می‌رود (Amarasingha *et al*., 2015). در این میان، توجه به تفکیک منابع آبی مصرف شده در تولید برنج، یعنی آب سبز (رطوبت حاصل از بارندگی) و آب آبی (آب برداشت شده از منابع سطحی و زیرزمینی)، اهمیت فزاینده‌ای یافته است. مطالعات نشان داده‌اند که سهم آب سبز در تولید برنج در بسیاری از کشورهای آسیایی مانند هند، اندونزی و فیلیپین بیش‌تر از آب آبی است، در حالی‌که در کشورهایی مانند آمریکا و پاکستان، آب آبی سهم غالب را دارد (Ali *et al*., 2021). این تمایز سبز/آبی نه‌تنها برای تحلیل رد پای آب بلکه برای طراحی راهبردهای منطقه‌ای تخصیص منابع در شرایط محدودیت آبی اهمیت دارد و نشان می‌دهد که بهینه‌سازی بهره‌وری باید متناسب با سهم غالب هر منبع تنظیم شود (Hoekstra & Mekonnen, 2012; Chukalla *et al*., 2015). از آنجا که یافتن روش‌های مناسب برای افزایش بهره‌وری آب بسیار ضروری است، تکنیک‌های متعددی برای صرفه‌جویی در مصرف آب معرفی شده‌اند تا به کشاورزان برنج‌کار در مقابله با کم‌آبی کمک کنند (Liu *et al*., 2015).

عملکرد برنج تحت تأثیر تعاملات پیچیده بین عوامل ژنتیکی و متغیرهای محیطی از جمله شرایط دمایی، الگوهای تابش خورشید، دسترسی به آب، رژیم‌های کوددهی، موقعیت جغرافیایی و ویژگی‌های خاک قرار دارد (Chen *et al*., 2024)، و به‌نظر می‌رسد به‌حداکثر رساندن رشد و عملکرد محصول از طریق کاربرد گسترده کود نیتروژن توسط کشاورزان هر ساله قابل دستیابی است. اگرچه نیتروژن یک عامل کلیدی در تعیین عملکرد محصول در سطح جهانی است (Rosolem *et al*., 2017; Plett *et al*., 2020) و کاربرد آن تاثیر قابل توجهی بر تولید برنج، جذب نیتروژن و ویژگی های مختلف محصول دارد، اما استفاده بیش از حد و مدیریت نامناسب آبیاری، منجر به بهره‌وری ضعیف نیتروژن (تلفات تا ۴۶ درصد از طریق دنتیتریفیکاسیون و ۵۰ درصد از طریق تبخیر، بر اساس سطح نیتروژن مصرفی و روش آبیاری) و اثرات منفی بر محیط زیست و سلامت انسان شده است (Zhou *et al*., 2017; Latifah *et al*., 2018). بر اساس مرورهای اخیر، رژیم‌های آبیاری با کاهش دوره‌های بی‌هوازی و کنترل عمق آب سطحی می‌توانند هم دنیتریفیکاسیون را محدود کنند و هم کارایی جذب نیتروژن را بهبود دهند، که این امر در سامانه‌های آبیاری تناوبی (AWD) نسبت به غرقاب مداوم به‌طور معنی‌دار گزارش شده است (Soliman *et al*., 2024).

مدیریت آبیاری می‌تواند کارآیی استفاده از نیتروژن را در گیاهان با حفظ تعادل مناسب بین شرایط هوازی و بی‌هوازی افزایش دهد. این تعادل به کاهش اتلاف نیتروژن از طریق آبشویی کمک می‌کند که به‌طور متفاوتی بر دسترسی نیتروژن تأثیر می‌گذارد. مطالعات نشان داده‌اند که برنج کشت شده تحت آبیاری غرقاب پیوسته معمولاً زیست‌توده کم‌تری نسبت به برنجی که با روش آبیاری تناوبی (AWD) مدیریت می‌شود، تولید می‌کند. یکی از دلایل احتمالی این موضوع آن است که شرایط بی‌هوازی در خاک‌های غرقاب باعث دنیتریفیکاسیون می‌شود که طی آن نیترات به‌صورت گاز از خاک خارج شده و وارد جو می‌شود. در مقابل، آبیاری تناوبی دوره‌های بی‌هوازی را کاهش می‌دهد و دنیتریفیکاسیون را محدود می‌کند و در نتیجه نیتروژن بیش‌تری در خاک باقی می‌ماند تا توسط گیاه جذب شود (Baharuddin *et al*., 2025). طبق گزارش سلیمان و همکاران (Soliman *et al*., 2024)، آبشویی نیتروژن به‌ویژه در مراحل اولیه رشد در زمین‌های غرقاب برنج رایج است. در نتیجه، گیاهان در این دوره بحرانی برای دستیابی به رشد بهینه با مشکل مواجه

می‌شوند. شی و همکاران (Shi *et al*., 2020) طی مطالعه‌ای در زمینه کارایی آب و نیتروژن تاکید کردند که شناسایی سطوح بهینه کاربرد آب و نیتروژن برای دستیابی به عملکرد مناسب دانه در کشت برنج از اهمیت بالایی برخوردار است و مدل‌های گیاهی در این زمینه بسیار کاربردی و مقرون به صرفه هستند.

علاوه بر مسائل مرتبط با تولید، فعالیت‌های کشاورزی در استان گیلان نقش مهمی در انتقال عناصر غذایی به اکوسیستم‌های آبی منطقه ایفا می‌کنند. یک مطالعه بلندمدت در تالاب انزلی (Fallah *et al*., 2021) نشان می‌دهد که تجمع تدریجی نیتروژن و فسفر، تالاب را به وضعیت «فوق غنی‌شدگی حاد» رسانده است. در مطالعات مختلف، شستشوی حجم عظیمی از نیتروژن و فسفر از خاک‌های کشاورزی به رودخانه‌های منتهی به تالاب انزلی تأیید شده است (Ebrahimi *et al*., 2021, 2022). به‌کارگیری راهبردهای مدیریتی مناسب در مصرف نیتروژن و زمان‌بندی بهینه آبیاری می‌تواند مقدار نیتروژن قابل شستشو به منابع آب سطحی را کاهش دهد (Ashouri, 2019; Amirhajloo *et al*., 2023). بر این اساس، ارزیابی راهبردهای مدیریت توأمان آبیاری و نیتروژن با استفاده از مدل‌های فرآیندمحور، می‌تواند ابزاری مؤثر برای کاهش اتلاف عناصر غذایی، افزایش بهره‌وری آب و در نهایت کاهش فشارهای زیست‌محیطی بر اکوسیستم‌های آبی حساس شمال کشور باشد.

تا به امروز، مدل‌های رشد گیاهی متعددی از جمله CropSyst، DSSAT، CERES-Rice و ORYZA2000 توسعه یافته‌اند (Linker & Ioslovich, 2017; Singh *et al*., 2017; Umair *et al*., 2017; Ojeda *et al*., 2018). مدل ORYZA2000 از یک الگوی محاسباتی روزانه برای نرخ تولید ماده خشک اندام‌های گیاه و نرخ توسعه فنولوژیک استفاده می‌کند. با یکپارچه‌سازی این نرخ‌ها در طول زمان، تولید ماده خشک و مرحله رشدی گیاه طی فصل رشد شبیه‌سازی می‌شود (Bouman & Van Laar, 2006). این مدل تحت شرایط بالقوه، محدودیت آب یا محدودیت نیتروژن در کشورهای فیلیپین، هند، اندونزی، ایران و چین ارزیابی شده است. امیری و رضایی (Amiri & Rezaei, 2010) با شبیه‌سازی مدیریت‌های مختلف آبیاری و کود نیتروژن بر رقم هاشمی در شمال ایران با استفاده از مدل ORYZA2000 گزارش کردند که این مدل عملکرد دانه و زیست‌توده را در سطح رضایت‌بخشی (به‌ترتیب با ریشه میانگین مربعات خطای نرمال‌شده (NRMSE) بین ۵ تا ۱۱ درصد برای عملکرد دانه و ۵ تا ۲۸ درصد برای زیست‌توده) شبیه‌سازی کرد. همچنین این مطالعه با شبیه‌سازی تعادل آبی، شاخص‌های بهره‌وری آبی را برای بهره‌وری آب آبیاری (WP_I)، بهره‌وری آب آبیاری و باران (WP_{I+R})، بهره‌وری تبخیر و تعرق (WP_{ET})، بهره‌وری تعرق (WP_T) و بهره‌وری تبخیر و تعرق و نفوذ عمقی (WP_{ETQ}) به‌ترتیب ۱/۴، ۱/۰۷، ۱/۰۷، ۱/۵۷ و ۰/۸۲ کیلوگرم بر متر مکعب گزارش کرد. جائو و همکاران (Gao *et al*., 2023) نیز دینامیک نیتروژن و تولید زیست‌توده رقم ژاپونیکا را در شالیزارهای مناطق سرد با استفاده از مدل ORYZA مطالعه و نشان دادند که عملکرد خوبی در شبیه‌سازی عمق آب سطحی، جذب و توزیع نیتروژن و تولید اندام‌های گیاهی (با ضریب تبیین ۰/۶۷) دارد. ارزیابی‌های دیگر نیز نشان داده‌اند که ORYZA2000 در پیش‌بینی شاخص‌های کلیدی مانند عملکرد دانه، زیست‌توده و نیتروژن گیاه تحت مدیریت‌های مختلف نیتروژن و آبیاری، دقت رضایت‌بخشی دارد و برای انتخاب راهبردهای بهینه قابل اتکا است (Ebrahimirad *et al*., 2019; Modiri *et al*., 2024).

علاوه بر این، شبیه‌سازی تعادل آبی و شاخص‌های بهره‌وری آب در این مدل امکان‌پذیر است و می‌تواند در تعیین راهبردهای بهینه آبیاری و کوددهی نقش مؤثری ایفا کند. بهره‌وری آب را می‌توان به‌صورت عملکرد دانه بر واحد آب مصرف‌شده در فرآیندهایی مانند تبخیر و تعرق تعریف کرد. این شاخص ابزار مناسبی برای تشخیص محل و زمان صرفه‌جویی در مصرف آب فراهم می‌کند. در حالی‌که بهره‌وری آب در بسیاری از مطالعات به‌صورت کلی گزارش می‌شود، تفکیک آن به مؤلفه‌های سبز و آبی کم‌تر مورد توجه قرار گرفته است. این تفکیک به‌ویژه در سیستم‌های برنج اهمیت دارد، زیرا سهم منابع آبی در مناطق مختلف متفاوت بوده و درک این سهم‌ها می‌تواند در سیاست‌گذاری و بهینه‌سازی مدیریت منابع آب نقش کلیدی داشته باشد. بر این اساس، هدف پژوهش حاضر ارزیابی اثرات توأمان مدیریت آبیاری و نیتروژن بر عملکرد برنج و شاخص‌های بهره‌وری آب با تفکیک اجزای سبز و آبی با استفاده از مدل فرآیندمحور ORYZA2000 است تا ضمن اعتبارسنجی دقت مدل، راهبردهای مدیریتی بهینه متناسب با سهم منابع آبی (بارندگی در برابر آبیاری) برای شرایط برنج‌خیز شمال کشور تبیین شود.

مواد و روش‌ها

روش اجرای آزمایش

این پژوهش طی دو سال زراعی ۱۳۹۲ و ۱۳۹۳ در مؤسسه تحقیقات برنج کشور واقع در رشت با مختصات جغرافیایی "۱۲′۱۹ °۳۷ عرض شمالی و "۳۸′۲۸ °۴۹ طول شرقی و ارتفاع هفت متر پایین‌تر از سطح دریا انجام شد. بر اساس آمار ۱۰ ساله ایستگاه سینوپتیک رشت، بارندگی سالانه رشت ۱۴۴۱ میلی‌متر و متوسط دمای هوای آن ۱۶/۸ درجه سلسیوس است. اقلیم منطقه نیمه‌مدیترانه‌ای گرم با تابستان‌های گرم و مرطوب و زمستان‌های ملایم طبقه‌بندی می‌شود.

آزمایش به‌صورت کرت‌های خردشده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. عامل اصلی (مدیریت آبیاری) در چهار سطح شامل آبیاری غرقاب دائم (I1) و آبیاری یک روز (I2)، سه روز (I3) و پنج روز پس از محو شدن آب از سطح زمین (I4) و عامل فرعی کود نیتروژن در چهار سطح شامل بدون مصرف نیتروژن (N1) و مصرف ۶۰ (N2)، ۹۰ (N3) و ۱۲۰ (N4) کیلوگرم نیتروژن خالص در هکتار بود. هر تکرار شامل ۱۶ تیمار و کل آزمایش شامل ۴۸ واحد آزمایشی بود. مساحت هر واحد آزمایشی ۱۵ مترمربع (۵×۳ متر) و فاصله کاشت نشاها ۲۵×۲۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. رقم مورد استفاده، برنج هیبرید «بهار» بود که حاصل تلاقی والد مادری IR58025A و والد پدری IR42686R می‌باشد. آزمایش‌های مختلف در سال‌های متفاوت نشان داده است که این رقم، علاوه بر داشتن عملکرد بالا و سازگاری خوب با شرایط استان گیلان، دارای کیفیت پخت مناسبی است.

عملیات آماده‌سازی زمین شامل شخم اول در زمستان و شخم دوم، تسطیح و ماله‌کشی در بهار انجام شد. سپس نقشه آزمایش در زمینی به مساحت حدود ۸۰۰ مترمربع پیاده‌سازی شد. بذرپاشی در خزانه در اواسط فروردین‌ماه انجام شد. نشاها پس از حدود ۴۰ روز و در اواخر اردیبهشت‌ماه به زمین اصلی منتقل شدند. در ۲۰ روز نخست پس از نشاکاری، همه تیمارها به‌صورت غرقابِ دائم نگهداری شدند تا نشاها استقرار یابند. پس از آن، تیمارهای آبیاری مطابق با طرح (غرقاب دائم، آبیاری ۱، ۳ و ۵ روز پس از محو آب از سطح زمین) اعمال شد. در هر آبیاری، آب تا ارتفاع پنج سانتی‌متر وارد کرت شد و حجم آن با کنتور حجمی اندازه‌گیری شد. به‌منظور جلوگیری از تبادل آب و مواد غذایی بین کرت‌ها، مرز هر کرت با پلاستیک تا عمق ۳۰ سانتی‌متر پوشانده شد. کود نیتروژن از منبع اوره، ۵۰ درصد هنگام نشاکاری، ۲۵ درصد در مرحله حداکثر پنجه‌زنی و ۲۵ درصد باقیمانده در مرحله آبستنی به خاک داده شد. همچنین بر اساس آزمون خاک، ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار سوپرفسفات تریپل و ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار سولفات پتاسیم به‌عنوان کود پایه مصرف شد. برای کنترل شیمیایی علف‌های هرز (به‌ویژه سوروف)، دو روز قبل از نشاکاری از علف‌کش بوتاکلر به میزان ۳/۵ لیتر در هکتار استفاده و پس از ۴۸ ساعت آب کرت‌ها تخلیه شد. وجین دستی نیز در دو نوبت پس از نشاکاری انجام شد. برای کنترل کرم ساقه‌خوار برنج، سم دیازینون ۱۰ درصد به مقدار ۱۵ کیلوگرم در هکتار طبق توصیه سازمان حفظ نباتات استفاده شد. برداشت محصول نیز در اواسط شهریورماه انجام شد.

اندازه‌گیری‌ها و تجزیه نمونه‌ها

شاخص سطح برگ (LAI) در مرحله گلدهی با استفاده از دستگاه LI-3100 ساخت شرکت Li-Cor اندازه‌گیری و به‌عنوان حداکثر مقدار شاخص سطح برگ در نظر گرفته شد. برای اندازه‌گیری عملکرد دانه، مساحت پنج مترمربع از هر کرت پس از حذف حاشیه، برداشت و پس از تعیین رطوبت دانه‌ها، بر اساس رطوبت ۱۴ درصد اندازه‌گیری شد (Gao *et al*., 2023). برای تعیین عملکرد زیست‌توده، تعداد هشت بوته از هر کرت در زمان رسیدگی، برداشت و پس از قرار گرفتن در گرم‌خانه در دمای ۷۰ درجه سلسیوس به‌مدت ۴۸ ساعت، وزن خشک آن‌ها محاسبه شد (Gao *et al*., 2023). برای اندازه‌گیری نیتروژن اندام‌های گیاهی نیز چهار بوته از هر کرت در زمان برداشت انتخاب و سپس نیتروژن نمونه‌ها به روش کجلدال اندازه‌گیری شد (Gao *et al*., 2023).

مدل‌سازی با ORYZA2000

مدل ORYZA2000 یک مدل فرآیندمحور است که رشد و نمو گیاه برنج را در سه سناریوی اصلی (تولید پتانسیل، محدودیت آبی و محدودیت نیتروژن) شبیه‌سازی می‌کند (Li *et al*., 2013). این مدل با ادغام چندین زیرمدل تخصصی شامل فنولوژی، فتوسنتز و تعادل کربن، تخصیص ماده خشک، بیلان آب و دینامیک نیتروژن، در یک چارچوب واحد توسعه یافته است. انعطاف‌پذیری این مدل در واسنجی پارامترهای گیاهی و خاکی بر اساس داده‌های محلی، آن را به ابزاری مناسب برای تحلیل

سناریوهای مختلف مدیریت آبیاری و کوددهی تبدیل کرده است. به‌همین دلیل، ORYZA2000 در مطالعاتی از ارزیابی ریسک‌های اقلیمی تا بهینه‌سازی مصرف آب و نیتروژن به‌طور گسترده به‌کار رفته و دقت آن در شرایط متنوع تأیید شده است (Baharuddin *et al*., 2025).

در شرایط بالقوه رشد، ویژگی‌های رقم‌های گیاهی از نظر فنولوژی و فرایندهای فیزیولوژیک و مورفولوژیک، عوامل اصلی تعیین کننده رشد گیاه در هر روز محسوب می‌شوند. میزان کل روزانه فتوسنتز گیاه بر اساس میزان نور، دما و شاخص سطح برگ محاسبه می‌شود. فتوسنتز کل کنوپی بر اساس مقدار شاخص سطح برگ و ویژگی‌های فتوسنتزی تک‌برگ که به غلظت ازت برگ بستگی دارد، محاسبه می‌شود. ماده خشک تولید شده بین بخش‌های مختلف گیاه تقسیم می‌شود. ضرایب اختصاص نیز بر اساس توابع مربوطه که به فنولوژی گیاه بستگی دارند، در مدل گنجانده می‌شوند. پارامترهای گیاهی در مدل ORYZA2000 بر اساس آزمایش‌های انجام شده روی رقم‌های IRRI در گلخانه‌ها و مزارع مختلف به‌دست آمده است. در حدود ۱۰ درصد از پارامترهای گیاهی در رقم‌های مختلف متفاوت است و سایر پارامترها در تمامی رقم‌های برنج یکسان هستند (Bouman & Tuong, 2001)، به‌عبارت دیگر، بیش‌تر پارامترهای گیاهی برای برنج مشابه است و می‌توانند برای کلیه رقم‌ها استفاده شوند و فقط برخی پارامترها به‌صورت خاص برای رقم و محیط مورد مطالعه تنظیم می‌شوند. این پارامترها شامل سرعت توسعه فنولوژیکی، عوامل تفکیک ماده خشک، سرعت رشد نسبی سطح برگ، سطح ویژه برگ، سرعت مرگ برگ و کسر ذخیره ساقه هستند.

در شرایط مدیریت آبیاری، مدل نیاز به پارامترهای هیدورلیکی معادله ون‌گنوختن (Van Genuchten *et al*., 1992) لایه‌های خاک دارد. برای اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی خاک شامل رطوبت نقطه اشباع (θ_{SAT})، ظرفیت مزرعه‌ای (θ_{FC})، نقطه پژمردگی دائم (θ_{PWP})، هدایت هیدرولیکی اشباع (K_{SAT}) و مقدار نشت و نفوذ عمقی، از خاک مزرعه نمونه‌برداری و پارامترهای هیدورلیکی معادله ون‌گنوختن لایه‌های خاک (α، n و λ) به‌کمک مدل RETC محاسبه شد. پارامترهای فیزیکی و هیدورلیکی خاک مزرعه آزمایشی در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و پارامترهای ون‌گنوختن لایه‌های خاک مزرعه آزمایشی

Table 1. Physical properties and Van Genuchten parameters of soil layers of the experimental field

Depth (cm)	Loam (%)	Sand (%)	Bulk density (g/cm)	θ_{PWP}	θ_{FC}	K_{SAT} (cm/day)	θ_{SAT}	α (cm^{-1})	n
0-10	39	14	1.1	0.27	0.4	57.54	0.65	0.03	1.23
10-20	39	17	1.2	0.3	0.4	30.8	0.62	0.03	1.2
20-30	44	9	1.32	0.3	0.41	0.4	0.62	0.06	2.99
30-40	42	11	1.31	0.3	0.42	11.4	0.6	0.26	1.17

واسنجی و اعتبارسنجی مدل

واسنجی مدل با داده‌های حاصل از تیمار آبیاری غرقاب و اعتبارسنجی با داده‌های تیمارهای آبیاری (یک، سه و پنج روز پس از محو آب از سطح زمین) انجام شد. ابتدا برنامه DRATES اجرا و مقادیر سرعت توسعه فنولوژیکی در چهار مرحله رشد رویشی پایه (DVRJ)، حساسیت به نور (DVRI)، شکل‌گیری خوشه (DVRP) و پر شدن دانه (DVRR)) محاسبه شد. سپس برنامه PARAM اجرا و سایر پارامترهای مورد نظر (حداکثر سرعت رشد نسبی سطح برگ (RGRLMX)، کسر ذخیره ساقه (FSTR)، سرعت مرگ برگ (DRLVT)، سطح ویژه برگ (SLA) و تفکیک ماده خشک بین برگ (FLV)، ساقه (FST)، خوشه (FSO) و کل (FAGT) در طول دوره رشد محاسبه شد.

برای بررسی تفاوت معنی‌دار بین داده‌های شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده از آزمون t استفاده و برای اعتبارسنجی مدل از ضریب تبیین (R^2)، ریشه دوم میانگین مربع خطا (RMSE)، ریشه دوم میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) و عملکرد مدل (EF) استفاده شد. RMSE تفاوت بین مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل و مقادیر مشاهده شده یک پارامتر را اندازه‌گیری می‌کند (رابطه ۱):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i - s_i)^2}{n}} \quad (۱)$$

که در آن، S_i عملکرد برنج شبیه‌سازی شده (کیلوگرم بر هکتار)، O_i عملکرد برنج مشاهده شده (کیلوگرم بر

هکتار)، و n تعداد داده‌ها و مشاهدات است. ریشه دوم میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) و عملکرد مدل (EF) نیز بر اساس روابط (۲) و (۳) محاسبه شدند:

$$NRMSE = \frac{100}{\bar{O}} \times \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i - s_i)^2}{n}} \quad (۲)$$

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i-1}^{n}(S_i - O_i)^2}{\sum_{i-1}^{n}(\bar{O} - O_i)^2} \quad (۳)$$

ریشه دوم میانگین مربعات خطا، تفاوت برآورد بیش‌تر یا کم‌تر از حد مدل در مقایسه با مشاهدات (اندازه‌گیری‌ها) را نشان می‌دهد و مقدار آن باید کم‌تر یا برابر با خطای معیار باشد. چنانچه ریشه دوم میانگین مربعات خطای نرمال شده کم‌تر از ۱۰، بین ۲۰-۱۰، بین ۳۰-۲۰ و بیش‌تر از ۳۰ باشد، به‌ترتیب برآورد عالی، خوب، متوسط و ضعیف شبیه‌سازی را نشان می‌دهد (Moriasi *et al.*, 2007). کارایی مدل، عملکرد مدل را نسبت به میانگین داده‌های مشاهده شده ارزیابی می‌کند و می‌تواند مقادیر مثبت یا منفی داشته باشد (Bannayan & Hoogenboom, 2008; Huang *et al.*, 2009).

محاسبات بیلان و بهره‌وری آب

بیلان آب طی فصل رشد برنج با استفاده از رابطه (۴) محاسبه شد:

$$I + R = E + T + D + \Delta W \quad (۴)$$

که در آن، I مقدار آبیاری، R بارندگی، E تبخیر واقعی، T تعرق واقعی، D نشت و نفوذ عمقی و ΔW تغییرات ذخیره آب در ناحیه ریشه می‌باشد. مقادیر I و R به‌صورت تجربی اندازه‌گیری و سایر اجزا با استفاده از خروجی‌های مدل ORYZA2000 محاسبه شدند. برای تفکیک تبخیر و تعرق، مدل از روابط نوری و آیرودینامیکی بهره می‌گیرد و تأثیر مکش آب خاک بر تبخیر و تعرق واقعی را نیز لحاظ می‌کند. بهره‌وری مصرف آب با استفاده از روابط زیر محاسبه شدند:

$$WPI = \frac{Y_g}{I} \quad (۵)$$

$$WPI = \frac{Y_g}{I+R} \quad (۶)$$

$$WPI = \frac{Y_g}{E+T} \quad (۷)$$

$$WPI = \frac{Y_g}{T} \quad (۸)$$

$$WPI = \frac{Y_g}{E+T+Q} \quad (۹)$$

در این روابط، Y_g عملکرد دانه و Q نشت و نفوذ عمقی است. این شاخص‌ها امکان مقایسه کارآیی مصرف آب در تیمارهای مختلف آبیاری را فراهم و نقش مدیریت آبیاری در بهینه‌سازی بهره‌وری آب را برجسته می‌کنند.

تفکیک بهره‌وری آب سبز و آب آبی

در این مطالعه، به‌منظور تحلیل دقیق‌تر بهره‌وری آب در سامانه‌های کشاورزی، سهم آب سبز و آب آبی در شاخص‌های بهره‌وری به‌تفکیک محاسبه شد. آب سبز به رطوبتی اطلاق می‌شود که از طریق بارندگی در خاک ذخیره و توسط گیاه از طریق تبخیر و تعرق مصرف می‌شود، در حالی‌که آب آبی شامل منابع برداشت‌شده از رودخانه‌ها، چاه‌ها یا مخازن است که به‌صورت مستقیم برای آبیاری استفاده می‌شود (Hoekstra & Mekonnen, 2012). تفکیک این دو نوع آب در ارزیابی بهره‌وری، به‌ویژه در مناطق دارای محدودیت آبی، اهمیت بالایی دارد، چرا که سهم بارندگی در تأمین نیاز آبی گیاه می‌تواند قابل توجه باشد. برای تعیین سهم هر نوع آب، ابتدا ضرایب زیر محاسبه شدند:

$$f_{blue} = \frac{I}{I+R} \quad (۱۰)$$

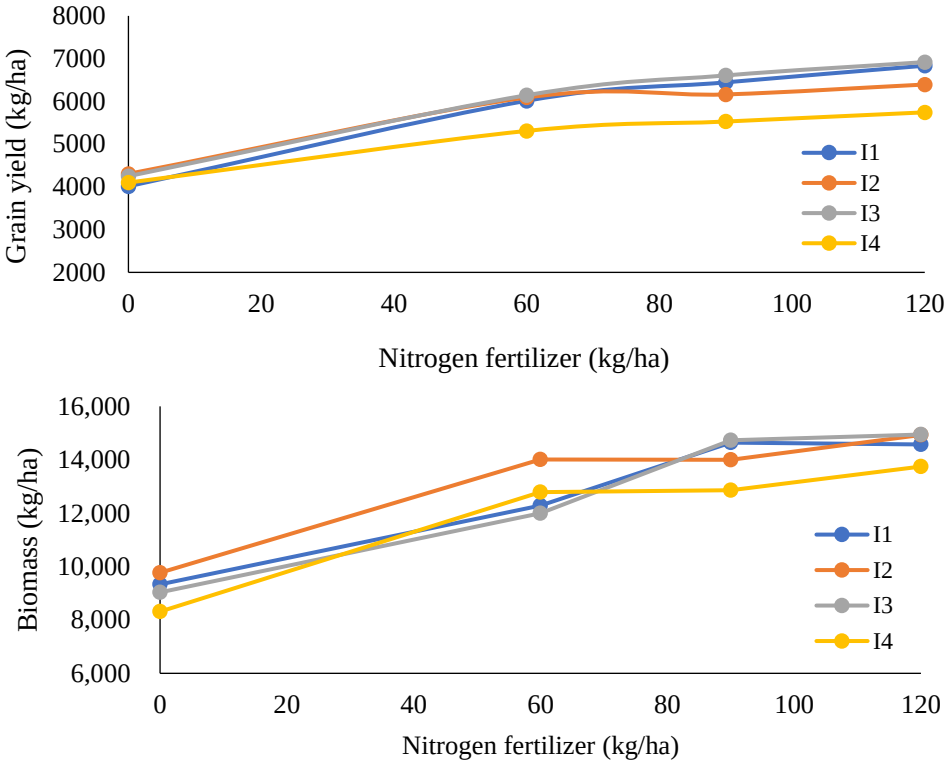
$$f_{green} = \frac{R}{I+R} \quad (۱۱)$$

این ضرایب به‌عنوان وزن در شاخص‌های بهره‌وری کل (WPI+R)، تبخیر (WPE)، تعرق (WPT) و تبخیر و تعرق (WPET) اعمال شدند تا سهم هر نوع آب در بهره‌وری نهایی محصول به‌تفکیک محاسبه شود. این روش که با الهام از چارچوب ردپای آب توسعه یافته است، امکان تحلیل دقیق‌تر عملکرد سامانه‌های آبیاری را فراهم می‌کند و می‌تواند در بهینه‌سازی مصرف منابع آبی نقش مؤثری ایفا کند (Chukalla *et al.*, 2015). با تفکیک سهم آب سبز و آبی، می‌توان مدیریت آبیاری را بر بهره‌وری محصول نیز به‌صورت هدف‌مندتر بررسی کرد.

نتایج و بحث

اندازه‌گیری شاخص‌های مورد نیاز برای مدل‌سازی طی دو سال کشت متوالی ۱۳۹۲-۱۳۹۳ انجام گرفت. میانگین عملکرد دانه رقم بهار در سال‌های ۱۳۹۲ و ۱۳۹۳ به‌ترتیب برابر با ۵۸۷۵ و ۵۴۸۲ کیلوگرم در هکتار بود و بیش‌ترین عملکرد دانه در متوسط این سال‌ها به‌ترتیب در تیمارهای I3N4، I1N4 و I2N3 مشاهده شد. میانگین عملکرد زیست‌توده نیز در سال‌های ۱۳۹۲ و ۱۳۹۳ به‌ترتیب برابر با ۱۳۱۶۹ و ۱۲۰۷۳ کیلوگرم در هکتار بود و بیش‌ترین عملکرد زیست‌توده به‌ترتیب در تیمارهای I3N4، I2N4،

I3N3 مشاهده شد. این نتایج نشان می‌دهد که تیمار آبیاری سه روز پس از محو آب از سطح زمین با مصرف ۱۲۰ کیلوگرم در هکتار کود نیتروژن، بیش‌ترین عملکرد دانه و زیست‌توده را در رقم بهار تولید کرده است. میانگین نیتروژن کل در سال‌های مورد مطالعه به‌ترتیب ۱۳۵ و ۱۲۴ کیلوگرم در هکتار بود و تیمارهای I4N4، I1N4 و I3N4 بیش‌ترین مقدار را داشتند. همچنین، میانگین نیتروژن دانه در این سال‌ها به‌ترتیب ۸۶ و ۸۴ کیلوگرم در هکتار بود و تیمارهای I1N4، I3N4 و I2N4 به‌ترتیب دارای بیش‌ترین مقدار بودند. این نتایج نشان می‌دهد که فارغ از روش آبیاری، اعمال تیمار ۱۲۰ کیلوگرم کود نیتروژن بیش‌ترین نیتروژن ذخیره شده در کل اندام هوایی و دانه را برای این رقم در پی داشته است. شاخص سطح برگ نیز دارای میانگین ۳/۴۷ و ۳/۴۸ به‌ترتیب در سال‌های ۱۳۹۲ و ۱۳۹۳ بود و بیش‌ترین میزان آن طی دو سال در تیمارهای I3N4، I1N4 و I1N3 مشاهده شد. به این ترتیب، بیش‌ترین شاخص سطح برگ رقم بهار در تیمار آبیاری سه روز پس از محو آب از زمین با مصرف ۱۲۰ کیلوگرم در هکتار کود نیتروژن به‌دست آمده است. در مجموع نتایج نشان دادند که تیمار آبیاری سه روز پس از محو آب از زمین و مصرف کود ۱۲۰ کیلوگرم در هکتار بهترین تیمار برای رشد زیستی و اقتصادی رقم بهار در شهر رشت بودند (شکل ۱). به‌نظر می‌رسد آبیاری سه‌روزه باعث کاهش دوره‌های بی‌هوازی و افزایش جذب نیتروژن می‌شود و مصرف ۱۲۰ کیلوگرم نیتروژن نیز کارایی فتوسنتز و رشد زیست‌توده را افزایش داده است. این نتایج با یافته‌های دیگران در رابطه با اثربخشی تیمارهای تلفیقی آبیاری تناوبی و کود نیتروژن مطابقت داشت (Amiri & Rezaei, 2010; Gao *et al*., 2023).



شکل ۱- تغییرات عملکرد دانه و زیست‌توده برنج رقم هیبرید بهار تحت مدیریت‌های مختلف آب و کود طی دو سال

Figure 1. Changes in grain yield and biomass of hybrid rice Bahar under different water and fertilizer management practices over two years

واسنجی و اعتبارسنجی مدل

مدل با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده برای فصل رشد سال ۱۳۹۲ واسنجی و با استفاده از داده‌های سال ۱۳۹۳ صحت‌سنجی شد. مدل ORYZA2000 از نظر شبیه‌سازی عملکرد دانه، عملکرد زیست‌توده، نیتروژن کل، نیتروژن دانه و شاخص سطح برگ تحت رژیم‌های مختلف آبیاری و سطوح گوناگون کود نیتروژن مورد ارزیابی قرار گرفت. مقدار آماره میانگین مربعات خطا (RMSE) برای

شاخص‌های عملکرد بین ۷۵۸-۴۱۸، برای شاخص‌های اندازه‌گیری نیتروژن بین ۱۰-۹ و برای شاخص سطح برگ در حدود یک بود. مقدار آماره میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) برای شاخص‌های عملکرد و نیتروژن کم‌تر از ۱۰ و در محدوده عالی و برای شاخص سطح برگ در محدوده متوسط (۲۹) قرار گرفت. آماره عملکرد مدل (EF) برای نیتروژن کل بیش‌ترین مقدار (۰/۹۱) و برای شاخص سطح برگ کم‌ترین مقدار (۰/۳۳) را به‌خود اختصاص داد. سایر شاخص‌های واسنجی شده دارای مقادیر بالای ۰/۷ بودند و در سطح مطلوب ارزیابی شدند. همبستگی بین شاخص‌های اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده نیز در تمامی موارد بالاتر از ۰/۷ و در سطح مطلوب بودند. نتایج حاصل از آزمون t نشان داد که تفاوت معنی‌داری بین شاخص‌های اندازه‌گیری شده و مقادیر شبیه‌سازی شده توسط مدل در سطح احتمال یک درصد وجود نداشت، اما شاخص سطح برگ در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار شد و این نشان می‌دهد که مدل نتوانسته است به‌طور مطلوبی شاخص سطح برگ را شبیه‌سازی کند (جدول ۲).

نتایج صحت‌سنجی آماره‌های ارزیابی شرایط بهتری را برای شبیه‌سازی شاخص سطح برگ (NRMSE=۱۴، RMSE=۰/۴۹، EF =۰/۶۷) در مرحله صحت‌سنجی نشان داد. برای سایر شاخص‌ها با NRMSE در محدوده بین ۱۰ تا ۲۰، مدل‌سازی در سطح خوب قرار گرفت. همچنین مقادیر همبستگی بین پارامترها در تمامی موارد بالاتر از ۰/۷ و در سطح مطلوبی قرار داشت. نتایج آزمون (t) اختلاف معنی‌داری بین داده‌های اندازه‌گیری‌شده و شبیه‌سازی شده نشان نداد. اگرچه عملکرد مدل نسبت به مقادیر آن در سطح واسنجی افت داشت، اما برای تمامی شاخص‌ها بالاتر از ۰/۶ بود (جدول ۲). ابراهیمی راد و همکاران (Ebrahimirad *et al.*, 2019) توانایی مدل ORYZA2000 را در پیش‌بینی عملکرد دانه (NRMSE=۱۴/۲۳ و RMSE=۵۳۳)، عملکرد زیست‌توده (NRMSE=۱۰/۷۶ و RMSE=۱۰۳۲)، وزن کاه و کلش (NRMSE=۱۲/۹۱ و RMSE=۷۳۹) و شاخص برداشت (NRMSE=۰/۰۴ و RMSE=۱۰/۳۲) در سطح مطلوبی ارزیابی کردند. مدیری و همکاران (Modiri *et al.*, 2024) در مرحله صحت‌سنجی مدل ORYZA2000 مقدار آماره‌های خطا را برای شاخص‌های عملکرد دانه (NRMSE=۵ و RMSE=۴۱۴)، عملکرد زیست‌توده (NRMSE=۴ و RMSE=۸۸۳)، نیتروژن دانه (NRMSE=۴ و RMSE=۵)، نیتروژن کل (NRMSE=۸ و RMSE=۱) و شاخص سطح برگ (NRMSE=۱۰ و RMSE=۰/۴) در سطح عالی گزارش کردند که با نتایج تحقیق حاضر مطابقت داشت. آن‌ها همچنین مدل ORYZA2000 را به‌عنوان یک مدل شبیه‌ساز مطلوب برای انتخاب بهترین راه‌کار جهت بهبود عملکرد برنج تحت مدیریت‌های مختلف کود نیتروژن در مناطق برنج‌خیز شمال کشور معرفی کردند.

جدول ۲ - نتایج شبیه‌سازی پارامترهای گیاهی مدل ORYZA2000 در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی

Table 2. Simulation results of plant parameters of the ORYZA2000 model in calibration and validation stages

Stage	Parameter	N	X_{obs} (SD)[a]	X_{sim} (SD)[a]	R^2 [b]	P(t)[c]	RMSE[d]	NRMSE(%)[e]	EF[f]
Calibration	Grain yield (kg/ha)	16	5875 (875)	5655 (1052)	0.9	0.27	418	7	0.77
	Biological yield (kg/ha)	16	13169 (2040)	12654 (1854)	0.93	0.24	758	6	0.86
	Total nitrogen (kg/ha)	16	135 (35)	131 (31)	0.93	0.37	10	8	0.91
	Grain nitrogen (kg/ha)	16	86 (24)	84 (18)	0.93	0.39	9	10	0.87
	Leaf area index	16	3.47 (1.24)	4.31(1.17)	0.79	0.03	1	29	0.33
Validation	Grain yield (kg/ha)	16	5482 (1110)	6007 (864)	0.92	0.08	644	12	0.66
	Biological yield (kg/ha)	16	12073 (2575)	11844 (1326)	0.86	0.38	1455	12	0.68
	Total nitrogen (kg/ha)	16	124 (35)	139 (39)	0.89	0.12	19	15	0.71
	Grain nitrogen (kg/ha)	16	84 (17)	90 (16)	0.96	0.16	7	9	0.83
	Leaf area index	16	3.48 (0.86)	3.61 (0.42)	0.9	0.29	0.49	14	0.67

[a] X_{obs} and X_{sim}, Average observed and simulated values, respectively, and SD, Standard deviation.
[b] R^2, Coefficient of determination
[c] P(t), t-significant probability level
[d] RMSE, Root of error mean square
[e] NRMSE, Normalized root of error mean square
[f] EF, Model efficiency

عملکرد و شاخص‌های بهره‌وری آبی

میانگین دو ساله عملکرد در تیمارهای مختلف آبیاری و کود در شکل (۱) ارایه شده است. بیش‌ترین تغییرات در تیمارهای صرفه‌جویی آبی نسبت به تیمار غرقاب، به‌ترتیب مربوط به تیمار آبیاری یک روز پس از محو آب از سطح زمین (I2N1) با ۷/۲۶+ درصد افزایش عملکرد نسبت به تیمار پایه (I1N1) و تیمار آبیاری پنج روز پس از محو آب از سطح زمین (I4N4) با ۱۵/۹۷- درصد کاهش عملکرد نسبت به تیمار پایه (I1N4) مشاهده شد. به بیان دیگر، تیمارهای مختلف صرفه‌جویی آبی (از I2 تا I4) به‌ترتیب با کاهش ۸/۸۷، ۱۵/۴۴ و ۳۴/۰۲ درصد نسبت به میزان آب مصرفی در تیمار غرقاب، به‌طور متوسط ۰/۵۷- تا ۲/۹۵+ و ۹/۹۴- درصد تغییر عملکرد نسبت به متوسط عملکرد تیمارهای مختلف آبیاری غرقابی داشتند. در تیمار I2 آبیاری یک روز پس از محو آب موجب حفظ شرایط نیمه‌هوازی و کاهش دنیتریفیکاسیون و در تیمار I4 فاصله طولانی آبیاری باعث تنش آبی و کاهش فتوسنتز شد، در حالی‌که در تیمار I3 شرایط بینابین و بهینه‌ای برای گیاه ایجاد شد.

با استفاده از مدل ORYZA2000، اجزای توازن آبی شبیه‌سازی‌شده شامل تعرق (T)، تبخیر و تعرق (ET)، جریان خروجی پایین‌دستی (Q_{bot}) محاسبه شد. سپس با استفاده از این اجزا و عملکرد دانه واقعی اندازه‌گیری‌شده (Y_g)، شاخص‌های بهره‌وری محاسبه شدند. نتایج نشان داد که متوسط بهره‌وری آبی در تمامی تیمارها برای شاخص‌های WP_I و WP_{I+R} در سال ۱۳۹۲ (به‌ترتیب ۱/۲۶ و ۰/۸۳کیلوگرم بر مترمکعب) بیش‌تر از سال ۱۳۹۳ (به‌ترتیب ۰/۸۸ و ۰/۵۳ کیلوگرم بر مترمکعب) بود. علت این تفاوت را می‌توان در مقادیر آب مورد استفاده برای آبیاری و بارش در سال‌های مذکور یافت. به‌عبارت دیگر، کاهش آب آبیاری در سال ۱۳۹۲ موجب افزایش نسبت عملکرد به واحد آب مصرفی شد، زیرا شرایط رطوبتی کنترل شده باعث کاهش تلفات تبخیر و افزایش سهم تعرق شد. در سال ۱۳۹۳ مقدار آب آبیاری و بارش بیش‌تری (به‌ترتیب ۶۴۸ و ۳۹۹ میلی‌متر) نسبت به سال ۱۳۹۲ (به‌ترتیب ۴۷۰ و ۲۳۶ میلی‌متر) مورد استفاده گیاه برنج قرار گرفته است، در حالی‌که متوسط عملکرد آن (۵۴۸۲ کیلوگرم بر هکتار) نسبت به سال اول (۵۸۷۵ کیلوگرم بر هکتار) کم‌تر بوده است و همین عامل منجر به کاهش بهره‌وری آب آبیاری و بارش شده است. این نتایج نشان می‌دهد که انتخاب تناوب آبیاری مناسب می‌تواند بهره‌وری آب سبز و آبی را افزایش دهد و مبنای تصمیم‌گیری مدیریتی در شرایط کم‌آبی باشد.

جدول ۳- متوسط دوساله اجزای بیلان آب (میلی‌متر) در تیمارهای مورد مطالعه

Table 3. Two-year average of water balance components (mm) in the studied treatments

E	T	ET	I	D	Rain (mm)	ΔW
306.5	310	616.5	654	258	317.5	97
260.5	352	612.5	654	246.5	317.5	112.5
256.5	356	612.5	654	246.5	317.5	112.5
255	356.5	611.5	654	246.5	317.5	113.5
259	305.5	564.5	596	238	317.5	111
216.5	348.5	565	596	239	317.5	109.5
213	352.5	565.5	596	239	317.5	109
209.5	358	567.5	596	240.5	317.5	105.5
232	307	539	553	243.5	317.5	88
188.5	349.5	538	553	244	317.5	88.5
184.5	353	537.5	553	244	317.5	89
183	355	538	553	244	317.5	88.5
236	292.5	528.5	431.5	224.5	317.5	-4
197	333	530	431.5	224.5	317.5	-5.5
194.5	336.5	531	431.5	224.5	317.5	-6.5
193	338.5	531.5	431.5	224.5	317.5	-7

E, Evaporation; T, Transpiration; ET, Evapotranspiration; I, Irrigation; D, Drainage; ΔW, Changes in water storage in the root zone.

متوسط دو ساله شاخص‌های بهره‌وری در تیمارهای مختلف در شکل ۲ ارائه شده است. متوسط شاخص W_{PT} و WP_{T+E} در سال ۱۳۹۳ (به‌ترتیب ۱/۹ و ۱/۰۷کیلوگرم بر مترمکعب) بیش‌تر از سال ۱۳۹۲ (به‌ترتیب ۱/۵ و ۰/۹۷کیلوگرم بر مترمکعب) بوده است، زیرا مقدار متوسط برای تبخیر و تعرق در سال اول بیش‌تر از سال دوم بود. با این وجود متوسط شاخص WETQ (۰/۷۱کیلوگرم بر مترمکعب) تقریبا در هر دو سال برابر بود. کاهش تبخیر سطحی در سال دوم موجب شد سهم بیش‌تری از آب مصرفی به تعرق اختصاص یابد و در نتیجه بهره‌وری آب افزایش پیدا کند. برای بهبود WP_{ET}، کاهش تبخیر خاک در نسبت ET اهمیت دارد. مصرف نیتروژن و آبیاری تناوبی این نسبت را افزایش می‌دهند، زیرا مصرف نیتروژن با افزایش سطح برگ و ظرفیت فتوسنتزی، سهم تعرق را در ET افزایش می‌دهد و آبیاری تناوبی با کاهش عمق آب سطحی، تبخیر مستقیم را محدود می‌کند. در کشت برنج، تبخیر بالا به‌دلیل تقاضای زیاد تبخیری و نگهداری آب سطحی، موجب اتلاف آب می‌شود. تغییرات مدیریتی مانند آبیاری تناوبی می‌تواند این اتلاف را کاهش دهد و موجب بهبود بهره‌وری آب شود. سایر مطالعات نیز نشان دادند که آبیاری تناوبی نسبت به غرقاب مداوم، کارایی مصرف آب را بهبود می‌بخشد (Bouman & Tuong, 2001; Belder *et al.*, 2007). این نتایج نشان می‌دهد که ترکیب مدیریت نیتروژن و آبیاری تناوبی می‌تواند راهبردی مؤثر برای افزایش بهره‌وری آب در شرایط کم‌آبی در شمال ایران باشد.

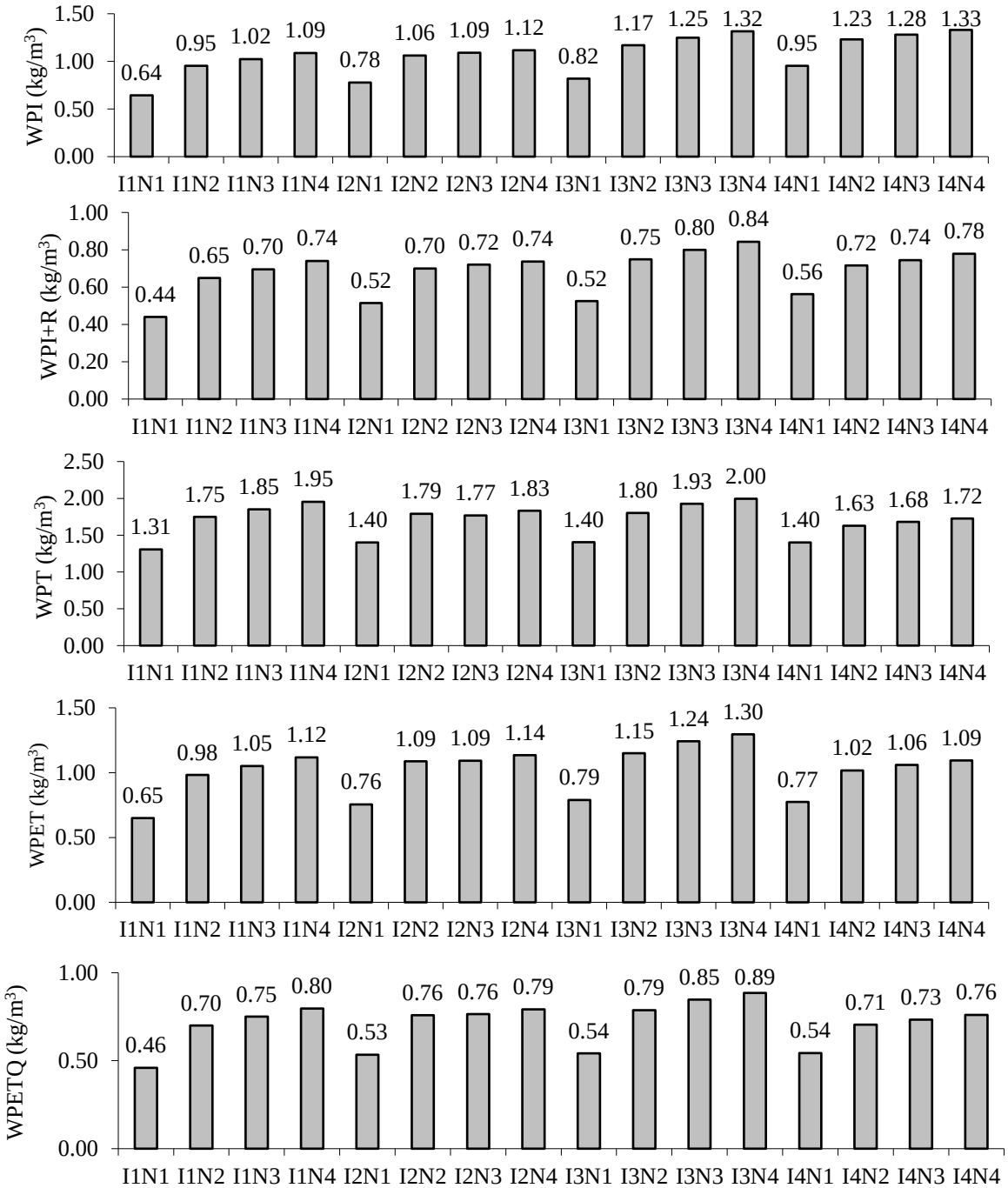
تفکیک بهره‌وری آب آبی و سبز

نتایج حاصل از شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شاخص‌های بهره‌وری آب (شکل ۳) نشان داد که تقریباً تمامی مؤلفه‌ها، اعم از بهره‌وری کل آب (WP)، بهره‌وری تبخیر و تعرق (WP_{ET})، بهره‌وری تعرق (WP_T) و بهره‌وری تبخیر (WP_E)، هم برای آب آبی (آبیاری) و هم برای آب سبز (باران)، بیش‌ترین مقادیر خود را در تیمار آبیاری سه روز پس از محو آب از سطح زمین همراه با مصرف ۱۲۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار (I3N4) به‌دست آوردند. تنها استثنا در این میان شاخص بهره‌وری تعرق ناشی از آب سبز (WP_{Tg}) بود که در تیمار غرقابی همراه با همین سطح کوددهی (I1N4) مقادیر بالاتری نسبت به I3N4 داشت. علت این امر آن است که در شرایط غرقابی، بارندگی به‌طور مستقیم به تعرق گیاه کمک می‌کند و اثر محدودکننده تبخیر سطحی کم‌تر بوده است. این موضوع الگوی کلی برتری I3N4 را در اغلب شاخص‌ها تأیید و همزمان نقش متمایز شرایط غرقابی را در بهره‌برداری از بارندگی در فرآیند تعرق برجسته می‌کند.

برتری تیمار I3N4 در اغلب شاخص‌ها را می‌توان ناشی از چند مکانیسم کلیدی دانست. نخست آن‌که، مدیریت آبیاری به روش صرفه‌جویانه، موجب کاهش مدت زمان ماندآب سطحی و در نتیجه کاهش تبخیر مستقیم از سطح خاک و آب می‌شود. این امر سهم نسبی تعرق در مجموع تبخیر و تعرق را افزایش می‌دهد و از این طریق شاخص‌های WP_{ET} و WP_T افزایش می‌یابند (Bouman & Tuong, 2001; Belder *et al.*, 2007). به‌عبارت دیگر، آبیاری صرفه‌جویانه باعث می‌شود نسبت آب مصرف‌شده در فرآیندهای سازنده (تعرق) نسبت به فرآیندهای اتلافی (تبخیر) بیش‌تر شود. عامل دوم، هم‌افزایی مصرف نیتروژن و آبیاری است. تأمین نیتروژن کافی در تیمار I3N4 با افزایش شاخص سطح برگ و ظرفیت فتوسنتزی موجب ارتقای کارآیی تعرق می‌شود، زیرا گیاه می‌تواند به‌ازای هر واحد آب مصرفی در تعرق، زیست‌توده و دانه بیش‌تری تولید کند. رابطه نزدیک بین تغذیه نیتروژنی و بهره‌وری مصرف آب پیش‌تر نیز در مطالعات جهانی مورد تأکید قرار گرفته است (Rosolem *et al.*, 2017; Plett *et al.*, 2020). بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که ترکیب آبیاری صرفه‌جویانه با مدیریت بهینه نیتروژن، نه تنها اتلاف آب را کاهش می‌دهد، بلکه کارآیی استفاده از آب موجود را نیز بهبود می‌بخشد.

یکی دیگر از دلایل مهم در برتری I3N4 کاهش تلفات آب آبی از طریق رواناب و نفوذ عمقی است. در شرایط غرقابی، بخش قابل توجهی از آب آبیاری از طریق نشت عمقی و خروج از ناحیه ریشه هدر می‌رود، در حالی‌که در آبیاری صرفه‌جویانه حجم آب ورودی کنترل‌شده‌تر است و سهم بیش‌تری از آن مستقیماً در اختیار گیاه قرار می‌گیرد. این موضوع بهبود بهره‌وری آب آبی را در شاخص‌های تفکیک‌شده توضیح می‌دهد و با نتایج پژوهش‌های مرتبط در چارچوب ردپای آب و بهره‌وری منابع آبی همخوانی دارد (Hoekstra & Mekonnen, 2012; Chukalla *et al.*, 2015). این نتایج نشان می‌دهد که ترکیب آبیاری تناوبی سه‌روزه با مصرف بهینه نیتروژن می‌تواند به‌عنوان راهبردی مؤثر برای افزایش بهره‌وری آب سبز و آبی در

شرایط کم‌آبی در شمال ایران برای رقم بهار توصیه شود. برتری تیمار غرقابی I1N4 برای شاخص WP_{Tg} را می‌توان ناشی از شرایط اشباع مداوم خاک دانست. در چنین شرایطی، بارندگی‌های فصلی با احتمال بیش‌تری در پروفیل خاک ذخیره می‌شوند و توسط ریشه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. به‌عبارت دیگر، سهم تعرق تأمین‌شده از بارندگی در غرقاب بیش‌تر است، زیرا خاک همواره در حالت اشباع قرار دارد و ظرفیت بیش‌تری برای جذب و نگهداری رطوبت ناشی از بارش دارد. در مقابل، در آبیاری تناوبی بخشی از بارندگی ممکن است در دوره‌های خشکی قبل از آبیاری تبخیر شود یا به‌طور کامل به مصرف گیاه نرسد و به همین دلیل WP_{Tg} در این تیمار پایین‌تر باقی می‌ماند (Hoekstra & Mekonnen, 2012; Liu *al el*., 2015).



شکل۲- شاخص‌های بهره‌وری مصرف آب در مدیریت‌های مختلف آبیاری و نیتروژن

Figure 2. Water use efficiency indicators in different irrigation and nitrogen managements

Treat	WP_b	WP_g	WPT_b	WPT_g	WPE_b	WPE_g	$WPET_b$	$WPET_g$
I1N1	0.30	0.14	1.94	4.04	1.98	4.22	0.96	2.03
I1N2	0.44	0.21	2.60	5.39	3.50	7.46	1.45	3.05
I1N3	0.47	0.22	2.75	5.70	3.82	8.13	1.56	3.26
I1N4	0.50	0.24	2.90	6.03	4.08	8.71	1.65	3.47
I2N1	0.34	0.17	2.13	4.08	2.53	4.88	1.15	2.21
I2N2	0.46	0.24	2.74	5.18	4.29	8.19	1.66	3.15
I2N3	0.47	0.24	2.70	5.13	4.41	8.46	1.67	3.17
I2N4	0.49	0.25	2.80	5.29	4.66	8.90	1.74	3.29
I3N1	0.34	0.19	2.20	3.87	2.87	5.08	1.24	2.18
I3N2	0.48	0.27	2.83	4.95	5.12	9.04	1.81	3.17
I3N3	0.51	0.29	3.03	5.29	5.62	9.92	1.95	3.42
I3N4	0.54	0.30	3.14	5.49	5.93	10.49	2.03	3.57
I4N1	0.34	0.23	2.43	3.43	2.98	4.28	1.34	1.90
I4N2	0.42	0.29	2.87	3.90	4.77	6.55	1.79	2.44
I4N3	0.44	0.31	2.96	4.01	5.04	6.91	1.86	2.54
I4N4	0.46	0.32	3.03	4.15	5.23	7.26	1.92	2.64



شکل ۳- متوسط شاخص‌های بهره‌وری آب سبز و آبی طی دو سال (اندیس‌های b و g به‌ترتیب برای آب آبی و سبز استفاده شده است)

Figure 3. Hit point diagram of average water productivity indices of green and blue water in two years (b and g indices are used for blue and green water, respectively)

بنابراین می‌توان گفت هرچند سیستم غرقابی می‌تواند بهره‌وری تعرق ناشی از آب سبز را بهبود بخشد، اما در مجموع مدیریت‌های مبتنی بر آبیاری تناوبی، به‌ویژه در ترکیب با مصرف کافی نیتروژن، گزینه بهتری برای دستیابی به کارآیی بالای مصرف منابع آبی و افزایش عملکرد محصول محسوب می‌شوند. این نتیجه نه تنها در این آزمایش به‌دست آمد، بلکه با مطالعات متعددی که بر نقش مدیریت آبیاری در افزایش بهره‌وری و کاهش ردپای آب تأکید کرده‌اند نیز هماهنگ است (Amarasingha *et al.*, 2015; Soliman *et al.*, 2024). بنابراین، در مناطق با محدودیت آب آبی، اتخاذ راه‌کارهای مشابه I3N4 می‌تواند به‌عنوان یک روش مدیریتی پایدار توصیه شود. اجرای چنین راهبردی می‌تواند علاوه بر افزایش عملکرد، فشار بر منابع آبی را کاهش دهد و رد پای آب تولید برنج را در مناطق کم‌آب به‌حداقل برساند.

نتیجه‌گیری کلی

نتایج این پژوهش نشان داد که مدیریت تلفیقی آبیاری و نیتروژن اثر قابل‌توجهی بر عملکرد دانه، زیست‌توده و شاخص‌های بهره‌وری آب در برنج رقم بهار دارد. در میان تیمارهای بررسی‌شده، تیمار آبیاری سه‌روزه پس از خروج آب از سطح زمین همراه با مصرف ۱۲۰ کیلوگرم نیتروژن خالص در هکتار (I3N4) با میانگین ۷/۲ تن در هکتار، بالاترین عملکرد دانه را طی دو سال تولید کرد. در مقابل، تیمار غرقابی بدون مصرف نیتروژن (I1N1) دارای کم‌ترین عملکرد با میانگین ۴/۰۱ تن در هکتار بود. این اختلاف بیش از ۳/۲ تن در هکتار نشان‌دهنده نقش تعیین کننده نیتروژن در بهینه‌سازی عملکرد تحت شرایط مختلف آبیاری است. تیمار I3N4 با متوسط ۱۳/۱ و ۱۲ تن در هکتار به‌ترتیب در سال ۱۳۹۲ و ۱۳۹۳ دارای بالاترین عملکرد زیست‌توده نیز بود، در حالی‌که تیمارهای با فاصله آبیاری طولانی‌تر کاهش قابل‌توجهی در زیست‌توده داشتند. مقدار نیتروژن کل ذخیره‌شده در اندام‌های هوایی در تیمارهای پرنیتروژن (I1N4، I3N4 و I4N4) در دو سال به‌طور متوسط ۱۳۵ و ۱۲۴ کیلوگرم در هکتار و نیتروژن دانه در تیمارهای I1N4، I3N4 و I2N4 در دو سال به‌ترتیب ۸۶ و ۸۴ کیلوگرم در هکتار بیشینه شد. شاخص سطح برگ (LAI) در تیمار I3N4 در دو سال به‌ترتیب ۳/۴۷ و ۳/۴۸ بود که نسبت به تیمارهای دیگر بالاترین میزان را داشت و تأثیر هم‌افزایی نیتروژن و آبیاری تناوبی بر توسعه سطح برگ و ظرفیت فتوسنتزی را نشان داد. بررسی شاخص‌های بهره‌وری آب نیز نشان داد که بیش‌ترین مقدار بهره‌وری کل آب (WP) و اجزای آن (WPE، WPT و WPET) در

تیمار I3N4 حاصل شد. به‌طور مشخص، بهره‌وری آب آبیاری در این تیمار در سال اول و دوم به‌ترتیب ۱/۶۳ و ۱/۳۳ کیلوگرم دانه بر مترمکعب بود، در حالی‌که تیمارهای با فاصله آبیاری طولانی‌تر (I4) به‌دلیل افت شدید عملکرد، بهره‌وری کم‌تری داشتند. تنها استثنا شاخص WPTg (بهره‌وری تعرق ناشی از بارندگی) بود که در تیمار غرقابی I1N4 بالاتر از I3N4 بود، زیرا شرایط اشباع مداوم خاک امکان ذخیره و استفاده بیش‌تر از بارندگی را فراهم کرد.

مدل ORYZA2000 توانست روندهای مشاهده شده را با دقت قابل قبولی شبیه‌سازی کند و آزمون t اختلاف معنی‌داری بین داده‌های اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده نشان نداد. مقدار RMSE نرمال‌شده برای شاخص‌های گیاهی در سطح رضایت‌بخش قرار داشت و ضریب تعیین (R^2) بین داده‌های شبیه‌سازی‌شده و مشاهده شده برابر با ۰/۷ بود که اعتبار مدل را تأیید می‌کند. این موضوع قابلیت استفاده از مدل در طراحی سناریوهای مدیریتی آینده را تقویت می‌کند. به‌طور کلی، نتایج این پژوهش نشان داد که افزایش نیتروژن به‌تنهایی نمی‌تواند بهره‌وری منابع را تضمین کند، بلکه نوع مدیریت آبیاری نقش مکمل و حیاتی دارد. ترکیب آبیاری تناوبی سه‌روزه با مصرف ۱۲۰ کیلوگرم نیتروژن (I3N4) بالاترین عملکرد و بهره‌وری آب را در بیش‌تر شاخص‌ها نشان داد. بنابراین، اتخاذ راهبردهایی مشابه I3N4 می‌تواند به‌عنوان گزینه‌ای پایدار برای مدیریت منابع آبی در مناطق کم‌آب توصیه شود. پیشنهاد می‌شود این نتایج در مقیاس‌های وسیع‌تر و شرایط اقلیمی متنوع‌تر بررسی شوند تا قابلیت تعمیم آن‌ها به سطح ملی مشخص شود.

تضاد منافع

نویسندگان تایید می‌کنند که این تحقیق در غیاب هر گونه روابط تجاری یا مالی که می‌تواند به‌عنوان 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 تا کنون 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

Amarasingha, R.P., Suriyagoda, L.D., Marambe, B., Gaydon, D.S., Galagedara, L.W., Punyawardena, R., Silva, G.L., Nidumolu, U., & Howden, M. (2015). Simulation of crop and water productivity for rice (*Oryza sativa* L.) using APSIM under diverse agro-climatic conditions and water management techniques in Sri Lanka. *Agricultural Water Management*, *160*, 132-143. doi: 10.1016/j.agwat.2015.07.001.

Amirhajloo, S., Gheysari, M., Shayannejad, M., & Shirvani, M. (2023). Effects of applied nitrogen fertilizers and irrigation strategies on environmental protection and yield indices of winter wheat and barley in a Mediterranean climate region of Iran. *Water Supply*, *23*(11), 4386-4402. doi: 10.2166/ws.2023.299.

Amiri, E., & Rezaei, M. (2010). Evaluation of water-nitrogen schemes for rice in Iran, using ORYZA2000 model. *Communications in Soil Science & Plant Analysis*, *41*(20), 2459-2477. doi: 10.1080/00103624.2010.511377.

Ashouri, M. (2019). Nitrate pollution reduction using biological fertilizers in paddy fields, the South Caspian sea basin, Guilan province, Iran. *Caspian Journal of Environmental Sciences*, *17*(1), 63-71. doi: 10.22124/cjes.2019.3345.

Baharuddin, A.K., Padjung, R., Kaimuddin, K., Musa, Y., Bahrun, A.H., Yassi, A., Casimero, M., Llorca, L., Bugayong, I., Jardinero, B., & Sembiring, H. (2025). Validation assessment of nitrogen and irrigation effects on early maturing rice varieties Cakrabuana and Inpari 13 through ORYZA (v3) modeling. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, *9*, 1541691. doi: 10.3389/fsufs.2025.1541691.

Bannayan, M., & Hoogenboom, G., (2008). Weather Analogue: A tool for real-time prediction of daily weather data realizations based on a modified k-nearest neighbor approach. *Environmental Modelling & Software*, *3*, 703-713. doi: 10.1016/j.envsoft.2007.09.011.

Belder, P., Bouman, B.A.M., Cabangon, R., Guoan, L., Quilang, E.J.P., Li, Y., Spiertz, J.H.J., & Tuong, T.P. (2007). Effect of water-saving irrigation on rice yield and water use in typical lowland conditions in Asia. *Agricultural Water Management*, *87*, 37-46. doi: 10.1016/j.agwat.2003.09.002.

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*, 11-30. doi: 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*, 249-273. doi: 10.1016/j.agsy.2004.09.011.

Chen, R.R., Li, D.X., Fu, J., Qin, P., Zhang, X.W., Sun, Z.B., He, K., Li, L., Zhou, W., Wang, Y.J., Wang, K., Liu, X.M., & Yang, Y.Z. (2024). Exploration of quality variation and stability of hybrid rice under multi-environments. *Molecular Breeding*, *44*(1), 4. doi: 10.1007/s11032-024-01442-3.

Chukalla, A.D., Krol, M.S., & Hoekstra, A.Y. (2015). Green and blue water footprint reduction in irrigated agriculture: effect of irrigation techniques, irrigation strategies and mulching. *Hydrology & Earth System Sciences*, *19*(12), 4877-4891. doi: 10.5194/hess-19-4877-2015.

Ebrahimi, E., Asadi, H., Joudi, M., Rashti, M.R., Farhangi, M.B., Ashrafzadeh, A., & Khodadadi, M. (2021). Variation entry of sediment, organic matter and different forms of phosphorus and nitrogen in flood and normal events in the Anzali wetland. *Journal of Water & Climate Change*, *13*(2), 434-450. doi: 10.2166/wcc.2021.456.

Ebrahimi, E., Asadi, H., Rahmani, M., Farhangi, M.B., & Ashrafzadeh, A. (2022). Effect of precipitation and sediment concentration on the loss of nitrogen and phosphorus in the Pasikhan River. *AQUA - Water Infrastructure, Ecosystems & Society*, *71*(2), 211-228. doi: 10.2166/aqua.2022.097.

Ebrahimirad, H., Babazadeh, H., Amiri, E., & Sedghi, H. (2019). Evaluation of water balance and water productivity in rice under water-management and different plant density with use Ceres-Rice and ORYZA2000 models. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, *13*(1), 165-176. [In Persian]. dor: 20.1001.1.20087942.1398.13.1.15.1.

Fallah, M., Pirali Zefrehei, A.R., & Hedayati, A.A. (2021). Evaluating limnological condition of Anzali International Wetland during a 32 year period using nutrient parameters and TSI indices. *Iranian Journal of Fisheries Sciences*, *20*(2), 370-384. doi: 10.22092/ijfs.2021.123818.

Gao, Y., Sun, Ch., Ramos, T., Huo, Z., Huang, G., & Xu, X. (2023). Modeling nitrogen dynamics and biomass production in rice paddy fields of cold regions with the ORYZA-N model. *Ecological Modelling*, *475*, 110184. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2022.110184.

Hoekstra, A.Y. & Mekonnen, M.M. (2012). The water footprint of humanity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *109*(9), 3232-3237. doi: 10.1073/pnas.1109936109.

Huang, Y., Yu, Y., Zhang, W., Sun, W., Liu, S., Jiang, J., Wu, J., Yu, W., & Yang, Z. (2009). Agro-C: A biogeophysical model for simulating the carbon budget of agroecosystems. *Agricultural & Forest Meteorology*, *149*, 106-129. doi: 10.1016/j.agrformet.2008.07.013.

Kumawat, A., Kumar, D., Shivay, Y.S., Yadav, D., Madhu, M., Ali, Sh., Gawdiya, S., Kumar, A., Sadhukhan, R., & Jat. R.A. (2025). Agronomic performance, grain quality and water productivity of basmati rice (*Oryza sativa* L.) under sixteen years long-term organic production system. *Paddy & Water Environment*, 24, 63-77. doi: 10.1007/s10333-025-01050-7.

Latifah, O., Ahmed, O.H., & Abdul Majid, N.M. (2018). Enhancing nitrogen availability, ammonium adsorption-desorption, and soil pH buffering capacity using composted paddy husk. *Eurasian Soil Sciences*, *50*(12), 1483-1493. doi: 10.1134/S1064229317130038.

Li, T., Raman, A.K., Marcaida III, M., Kumar, A., Angeles, O., & 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. doi: 10.1016/j.fcr.2013.05.006.

Linker, R., & Ioslovich, I. (2017). Assimilation of canopy cover and biomass measurements in the crop model AquaCrop. *Biosystems Engineering*, *162*, 57-66. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2017.08.003.

Liu, H., Hussain, S., Zheng, M., Peng, S., Huang, J., Cui, K., & Nie, L. (2015). Dry direct-seeded rice as an alternative to transplanted-flooded rice in ventral China. *Agronomy for Sustainable Development*, *35*, 285-294. doi: 10.1007/s13593-014-0239-0.

Modiri, E., Barari Tari, D., Amiri, E., Niknejad, Y., & Fallah Amoli, H. (2024). Simulation of rice leaf area, yield, and nitrogen content in different nitrogen utilization management via the ORYZA2000 model. *Journal of Crops Improvement*, *26*(2), 235-252. [In Persian]. doi: 10.22059/jci.2024.343268.2711.

Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Bingner, R.L., Harmel, R.D., & Veith, T.L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, *50*(3), 885-900. doi: 10.13031/2013.23153.

Ojeda, J.J., Volenec, J.J., Brouder, S.M., Caviglia, O.P., & Agnusdei, M.G. (2018). Modelling stover and grain yields, and subsurface artificial drainage from long-term corn rotations using APSIM. *Agricultural Water Management*, *195*, 154-171. doi: 10.1016/j.agwat.2017.10.010.

Plett, D.C., Ranathunge, K., Melino, V.J., Kuya, N., Uga, Y., & Kronzucker, H.J. (2020). The intersection of nitrogen nutrition and water use in plants: new paths toward improved crop productivity. *Journal of Experimental Botany*, *71*(15), 4452-4468. doi: 10.1093/jxb/eraa049.

Rosolem, C.A., Ritz, K., Cantarella, H., Galdos, M.V., Hawkesford, M.J., Whalley, W.R., & Mooney, S.J. (2017). Enhanced plant rooting and crop system management for improved N use efficiency. *Advances in Agronomy*, *146*, 205-239. doi: 10.1016/bs.agron.2017.07.002.

Shi, X., Hu, K., Batchelor, W.D., Liang, H., Wu, Y., Wang, Q., Fu, J., Cui, X., & Zhou, F. (2020). Exploring optimal nitrogen management strategies to mitigate nitrogen losses from paddy soil in the middle reaches of the Yangtze River. *Agricultural Water Management*, *228*, 105877. doi: 10.1016/j.agwat.2019.105877.

Singh, B., Mishra, S., Bisht, D.S., & Joshi, R. (2021). Growing rice with less water: Improving productivity by decreasing water demand. In: Ali, J., & Wani, S.H. (Eds.). Rice Improvement: Physiological, Molecular Breeding and Genetic Perspectives. Springer, Cham. pp. 147-170. doi: 10.1007/978-3-030-66530-2_5.

Singh, P.K., Singh, K.K., Bhan, S.C., Baxla, A.K., Singh, S., Rathore, L.S., & Gupta, A. (2017). Impact of projected climate change on rice (*Oryza sativa* L.) yield using CERES-rice model in different agroclimatic zones of India. *Current Science*, *112*(1), 108-115. doi: 10.18520/cs/v112/i01/108-115.

Sivapalan, S. (2015). Water balance of flooded rice in the tropics. In: Salik Javaid, M. (Ed.). Irrigation and Drainage: Sustainable Strategies and Systems. IntechOpen. pp. 91-118. doi: 10.5772/59043.

Soliman, E., Azam, R., Hammad, S.A., Mosa, A.A., & Mansour, M.M. (2024). Impacts of alternate wetting and drying technology on water use and soil nitrogen transformations for sustainable rice production: A review. *Journal of Soil Sciences & Agricultural Engineering*, *15*, 151-163. doi: 10.21608/jssae.2024.291648.1228.

Umair, M., Shen, Y., Qi, Y., Zhang, Y., Ahmad, A., Pei, H., & Liu, M. (2017). Evaluation of the CropSyst model during wheat-maize rotations on the north China plain for identifying soil evaporation losses. *Frontiers in Plant Science*, *8*, 1667. doi: 10.3389/fpls.2017.01667.

Van Genuchten, M.T., Leij, F.J., & Yates, S.R. (1992). The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils. Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory, Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency.

Zhou, W., Lv, T.F., Yang, Z.P., Wang, T., Fu, Y., Chen, Y., Hu, B.H., & Ren, W.J. (2017). Morphophysiological mechanism of rice yield increase in response to optimized nitrogen management. *Scientific Reports*, *7*(1), 17226. doi: 10.1038/s41598-017-17491-y.