Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

*Journal of Water and Soil Conservation*

Print ISSN: 2322-2069
Online ISSN: 2322-2794

# Evaluation of the influence of water management and different methods of nitrogen application on rice yield and water use efficiency

**Samira Ziaeifar[1], Hosein Khozeymehnezhad[*2], Hassan Alinezhad[3], Abdullah Darzi-Naftchali[4]**

1. Ph.D. Student in Water Resources Engineering, Dept. of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Birjand University, Birjand, Iran (Expert, Dept. of Water Engineering, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran). E-mail: ssziaeifar@birjand.ac.ir
2. Corresponding Author, Associate Prof., Dept. of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran. E-mail: hkhozeymeh@birjand.ac.ir
3. M.Sc. Graduate of Irrigation and Drainage, Dept. of Water Engineering, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. E-mail: hassanalinejad70@gmail.com
4. Associate Prof., Dept. of Water Engineering, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. E-mail: abdullahdarzi@yahoo.com

**Article Info**

**Article type:**
Research Full Paper

**Article history:**
Received: 02.27.2022
Revised: 06.24.2022
Accepted: 07.20.2022

**Keywords**:
CERES-RICE model,
Irrigation frequency,
Nitrogen use efficiency,
Rice yield,
Water management

**ABSTRACT**

**Background and Objectives:** Simultaneous improvement of water and nitrogen use efficiency in paddy fields is necessary to reduce the environmental- related issues. Rice, as one of the most important crop, provides the main food of more than half of the world's population. According to the latest available statistics, in the crop year 2017-2018, the rice cultivated area the country was 622991 ha, which mainly belongd to the five provinces of Gilan (35.3%), Mazandaran (34.3%), Khuzestan (10.9%), Golestan (9.9%) and Fars (3.4%). Among different provinces, Mazandaran province is the main producer of rice in the country with the production of 1113715 tons of rice. Additionally, rice is the predominant crop in Mazandaran province.

**Materials and Methods:** The required field data of Daylamani rice cultivar were obtained during two rice growing seasons (2011-2012) from one ha consolidated paddy field in Sari, Mazandaran province. Data from 2011 were used for calibration and data from 2012 were used for validation of the CERES-Rice model of DSSAT V4.7.5 software package. By using the validated model, the effect of different scenarios of water and nitrogen fertilizer management on water use efficiency (WUE), economic water use efficiency (EWP), physiological efficiency of nitrogen consumption for grain production (NUEg), harvest index and nitrogen harvest index (NHI) were evaluated. The calibrated model was then applied to evaluate the combined effect of three types of irrigation management including continuous flooding ($I_1$), intermittent irrigation with 5 ($I_2$) and 8 ($I_3$) days irrigation frequency and six N fertilizer management treatments including $N_1$ (50% at planting (P), 25% at tillering (T) and 25% at clustering (C)), $N_2$ (25% at P, 50% at T and 25% C), $N_3$ (25% at P, 25% C and 50% at T), $N_4$ (fertilization at C), $N_5$ (fertilization at T) and $N_6$ (fertilization at P).

**Results:** The minimum (832 kg/ha) and maximum (3640 kg/ha) grain yield were obtained in $I_1N_6$ and $I_3N_5$, respectively. The simulations showed that the effect of fertilization time and type of irrigation were not independent of each other. $I_3N_5$ resulted in maximum HI (0.39), minimum soil evaporation (173.4 mm), maximum WUE (one kg/m$^3$), maximum EWP

($12\times10^4$ Rials/$m^3$), minimum nitrate losses (52.47 kg/ha), the highest nitrogen fertilizer uptake (99 kg/ha), maximum NUEg (one) and minimum nitrogen stress (0.05). Also, the maximum NHI (0.37) belonged to the $I_2N_5$ treatment.

**Conclusion:** Based on the results, among the applied managements, according to the components of crop yield, harvest index, water productivity, EWP, NUEg, nitrogen uptake, nitrate leaching and NHI, 8 days irrigation frequency was the best option in terms of irrigation management. Also, the use of $I_3N_5$ treatment as a superior combined-treatment under both fertilizer and irrigation management in the present study is recommended in terms of water and N use efficiency in the paddy fields of the province**.**

Cite this article: Ziaeifar, Samira, Khozeymehnezhad, Hosein, Alinezhad, Hassan, Darzi-Naftchali, Abdullah. 2022. Evaluation of the influence of water management and different methods of nitrogen application on rice yield and water use efficiency. *Journal of Water and Soil Conservation*, 29 (2), 135-154.

© The Author(s).
DOI: 10.22069/jwsc.2022.19993.3540
Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک

شاپا چاپی: ۲۳۲۲-۲۰۶۹
شاپا آنلاین: ۲۳۲۲-۲۷۹٤

# ارزیابی تأثیر مدیریت آب و روش‌های مختلف عرضه کود نیتروژن بر کارآیی مصرف آب و عملکرد برنج

سمیرا ضیایی‌فر[۱]، حسین خزیمه‌نژاد*[۲]، حسن علی‌نژاد[۳]، عبداله درزی نفتچالی[٤]

۱. دانشجوی دکتری مهندسی منابع آب، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران (کارشناس گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران). رایانامه: ssziaeifar@birjand.ac.ir
۲. نویسنده مسئول، دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران. رایانامه: hkhozeymeh@birjand.ac.ir
۳. دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران. رایانامه: hassanalinejad70@gmail.com
٤. دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران. رایانامه: abdullahdarzi@yahoo.com

**اطلاعات مقاله**

**نوع مقاله:**
مقاله کامل علمی- پژوهشی

**تاریخ دریافت:** ۰۰/۱۲/۰۸
**تاریخ ویرایش:** ۰۱/۰٤/۰۳
**تاریخ پذیرش:** ۰۱/۰٤/۲۹

**واژه‌های کلیدی:**
دور آبیاری،
عملکرد برنج،
کارایی مصرف نیتروژن،
مدل CERES-RICE،
مدیریت آب

**چکیده**

**سابقه و هدف:** کاهش اثرات زیست‌محیطی مرتبط با تلفات قابل توجه آب و نیتروژن از اراضی شالیزاری، مستلزم ارتقای هم‌زمان کارایی مصرف این نهاده‌ها می‌باشد. برنج به‌عنوان یکی از مهم‌ترین گیاهان زراعی، غذای اصلی بیش از نیمی از جمعیت جهان را تامین می‌کند. بر اساس آخرین آمار موجود، در سال زراعی ۲۰۱۸ – ۲۰۱۷ سطح زیر کشت برنج کشور ٦۲۲۹۹۱ هکتار بود که به‌طور عمده متعلق به پنج استان گیلان (۳۵/۳ درصد)، مازندران (۳٤/۳ درصد)، خوزستان (۱۰/۹ درصد)، گلستان (۹/۹ درصد) و فارس (۳/٤ درصد) بود. از میان استان‌های مختلف، استان مازندران با تولید ۱۱۱۳۷۱۵ تن شلتوک، تولیدکننده اصلی برنج کشور محسوب می‌شود. از سوی دیگر، بیش‌ترین سطح زیرکشت در بین کل محصولات زراعی در استان مازندران مربوط به برنج می‌باشد.

**مواد و روش‌ها:** داده‌های مزرعه‌ای مورد نیاز در طول دو فصل کشت برنج رقم دیلمانی در سال‌های ۱۳۹۰ و ۱۳۹۱ از حدود یک هکتار از اراضی شالیزاری تجهیز و نوسازی شهرستان ساری در استان مازندران تهیه شد. از داده‌های سال ۱۳۹۰ برای واسنجی و از داده‌های سال ۱۳۹۱ برای صحت‌سنجی مدل CERES-RICE از بسته نرم‌افزاری DSSAT V4.7.5 استفاده شد. با استفاده از مدل واسنجی شده، اثر سناریوهای مختلف مدیریت آب و کود نیتروژن بر شاخص‌های کارایی مصرف آب (WUE)، کارایی اقتصادی مصرف آب (EWP)، کارایی فیزیولوژیکی مصرف نیتروژن برای تولید دانه (NUEg)، شاخص برداشت (HI) و شاخص

برداشت نیتروژن (NHI) برنج بررسی شد. از مدل واسنجی شده برای ارزیابی اثر تلفیقی سه نوع مدیریت آبیاری شامل غرقاب دایم ($I_1$)، آبیاری متناوب با دور ۵ روز ($I_2$) و آبیاری متناوب با دور ۸ روز ($I_3$) و شش تیمار مدیریت کودی $N_1$ (۵۰٪ زمان کاشت، ۲۵٪ زمان پنجه‌زنی و ۲۵٪ زمان خوشه‌دهی)، $N_2$ (۲۵٪ زمان کاشت، ۵۰٪ زمان پنجه‌زنی و ۲۵٪ زمان خوشه‌دهی)، $N_3$ (۲۵٪ زمان کاشت، ۲۵٪ زمان خوشه‌دهی و ۵۰٪ زمان پنجه‌زنی)، $N_4$ (کوددهی در زمان خوشه‌دهی)، $N_5$ (کوددهی در زمان پنجه‌زنی) و $N_6$ (کوددهی در زمان کاشت) استفاده شد.

**یافته‌ها:** کم‌ترین عملکرد دانه (۸۳۲ کیلوگرم در هکتار) در تیمار $I_1N_6$ و بیش‌ترین مقدار آن (۳٦٤۰ کیلوگرم در هکتار) در تیمار $I_3N_5$ حاصل شد. شبیه‌سازی‌ها نشان داد که تأثیر زمان کوددهی و نوع آبیاری مستقل از یکدیگر نبود. تیمار $I_3N_5$، دارای حداکثر HI (۰/۳۹)، حداقل تبخیر از سطح خاک (۱۷۳/٤ میلی‌متر)، حداکثر WUE (یک کیلوگرم بر مترمکعب)، حداکثر EWP ($۱۲\times۱۰^{٤}$ ریال بر مترمکعب)، کم‌ترین تلفات نیترات (۵۲/٤۷ کیلوگرم بر هکتار)، بیش‌ترین جذب کود نیتروژن (۹۹ کیلوگرم بر هکتار)، حداکثر NUEg (یک) و حداقل تنش نیتروژن (۰/۰۵) بود. هم‌چنین حداکثر NHI (۰/۳۷)، متعلق به تیمار $I_2N_5$ بود.

**نتیجه‌گیری:** براساس نتایج، در مدیریت‌های اعمال شده با توجه به اجزای عملکرد محصول، شاخص برداشت، بهره‌وری آب، کارایی اقتصادی مصرف آب، کارایی مصرف نیتروژن، نیتروژن جذب‌شده، آبشویی نیترات و شاخص برداشت نیتروژن، مدیریت آبیاری با تناوب ۸ روز، به‌عنوان بهترین گزینه از نظر مدیریت آبیاری بود. هم‌چنین، استفاده از تیمار $I_3N_5$ به عنوان تیمار برتر تحت دو مدیریت کوددهی و آبیاری در پژوهش حاضر (در دوره ۲۰ تا ۵۰ روز پس از نشاکاری)، از نظر کارایی مصرف آب و نیتروژن مصرفی در شالیزارهای استان توصیه می‌شود.

**استناد**: ضیایی‌فر، سمیرا، خزیمه‌نژاد، حسین، علی‌نژاد، حسن، درزی نفتچالی، عبداله (۱۴۰۱). ارزیابی تأثیر مدیریت آب و روش‌های مختلف عرضه کود نیتروژن بر کارآیی مصرف آب و عملکرد برنج. *پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*، ۲۹ (۲)، ۱۵۴-۱۳۵.
DOI: 10.22069/jwsc.2022.19993.3540

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان
© نویسندگان.

## مقدمه

برنج به‌عنوان یکی از مهم‌ترین گیاهان زراعی، غذای اصلی بیش از نیمی از جمعیت جهان را تأمین می‌کند. این محصول در حدود ۱٦۷ میلیون هکتار کشت شده و تولید سالانه آن حدود ۷۷۲ میلیون تن گزارش شد (۱). بر اساس آخرین آمار موجود، در سال زراعی ۲۰۱۸-۲۰۱۷ سطح زیرکشت برنج کشور ٦۲۲۹۹۱ هکتار بود که به‌طور عمده متعلق به پنج استان شامل: گیلان (۳۵/۳ درصد)، مازندران (۳٤/۳ درصد)، خوزستان (۱۰/۹ درصد)، گلستان (۹/۹ درصد) و فارس (۳/٤ درصد) بود. از میان استان‌های مختلف، استان مازندران با تولید ۱۱۱۳۷۱۵ تن شلتوک، تولیدکننده اصلی برنج کشور محسوب می‌شود. از سوی دیگر، بیش‌ترین سطح زیرکشت در بین کل محصولات زراعی در استان مازندران مربوط به برنج است (۲). کشت برنج بیش‌تر به‌صورت آبی بوده و روش رایج برای آبیاری آن، غرقاب دائم است. درنتیجه، بخش قابل‌توجهی از آب مصرفی در جهان در تولید برنج مصرف می‌شود. در برخی پژوهش‌های گذشته، آب مصرفی ارقام مختلف برنج در طول یک فصل کشت برنج حدود ٦۷۷ تا ۱۵۰۰ میلی‌متر گزارش شده است (۳، ٤ و ۵). به دلیل پایین بودن راندمان مصرف آب در اراضی شالیزاری، بخش قابل‌توجهی از آب مصرفی به طرق مختلف مانند نفوذ عمقی تلف می‌شود. میزان نفوذ عمقی خاک‌های شالیزار از حدود یک تا بیش از پنج میلی‌متر در روز برای اراضی دارای وضعیت زهکشی ضعیف تا خوب گزارش شده است (٦، ۷، ۸ و ۹). به‌غیراز هزینه‌های مرتبط با تلفات آب، ممکن است مقداری از عناصر غذایی نیز به همراه آن از منطقه ریشه گیاه خارج شود. یکی از عناصر غذایی پرمصرف در سیستم کشت برنج، نیتروژن است که میزان کارایی مصرف آن در اراضی شالیزاری عموماً کم است.

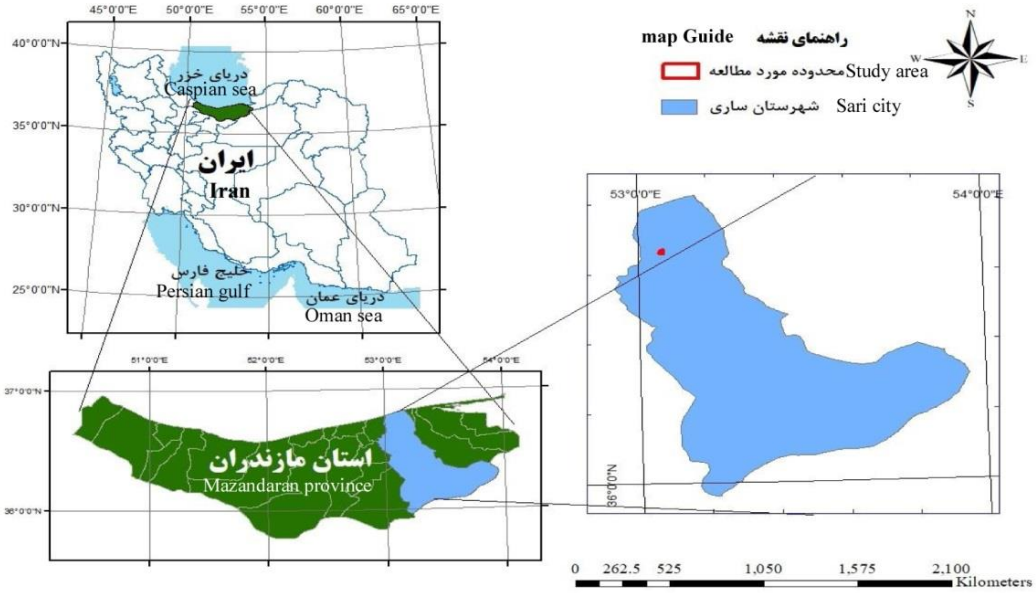
امکان گسترش سطح زیرکشت برنج در آینده‌ای نزدیک به دلیل عواملی هم‌چون کم‌آبی، نیاز به تغییر کاربری اراضی و هزینه بالای تهیه زمین‌های کشاورزی محدود است که در پی آن، میزان اضافی برنج موردنیاز باید با افزایش تولید حاصل شود (۲). ازاین‌رو تولید این مقدار برنج با تکیه بر منابع داخلی، بستگی زیادی به توسعه راهبردهایی برای بهینه‌سازی کاربرد منابع موجود و افزایش عملکرد در واحد سطح دارد. با توجه به محدودیت منابع آب در ایران و شرایط خاص جغرافیایی کشور، استفاده از مدیریت‌ها و شیوه‌های نوین آبیاری با مصرف کم‌تر آب امری ضروری خواهد بود (۱۰). با اعمال مدیریت صحیح آب، خاک و گیاه می‌توان ضمن افزایش تولید و کاهش تلفات آب و عناصر غذایی، دستیابی به شرایط کشاورزی پایدار را آسان کرد. در سال‌های اخیر روش‌های مختلف مدیریت آب مانند زهکشی میان‌فصل، خشک و مرطوب شدن متناوب و حفظ مزرعه در وضعیت اشباع با هدف ارتقای بهره‌وری آب و مصرف نیتروژن در شالیزارها به‌کار گرفته شد. لی و همکاران (۱۹۹۳) در بررسی مدیریت رطوبت خاک در مرحله پر شدن دانه بر رشد و کیفیت برنج به این نتیجه دست یافتند که دور آبیاری ۵ تا ۷ روز اثر معنی‌داری بر عملکرد دانه داشت (۱۱). تقی‌زاده و همکاران (۲۰۰۸) در بررسی تأثیر آبیاری و مقادیر کود نیتروژن بر عملکرد برنج به این نتیجه رسیدند که آبیاری متناوب برنج به‌صورت ۱۰ روز یک بار با مصرف کم‌تر کود نیتروژن تا ٦۰ کیلوگرم در هکتار بدون کاهش معنی‌دار عملکرد، در مصرف آب و کود نیتروژن صرفه‌جویی به عمل آورد (۱۲). نتایج بررسی اثرات دور آبیاری و کود نیتروژن بر عملکرد دانه برنج نشان داد که آبیاری با دور ۸ روز، ضمن حفظ عملکرد در حد غرقاب دائم، باعث کاهش ۱۸ درصدی مصرف آب گردید (۱۳). آقاجانی و نوابیان

(۲۰۱۲) با بررسی تأثیر آبیاری متناوب بر بهره‌وری مصرف آب در شالیزار نشان دادند که با افزایش دور آبیاری به ۷ روز، میزان بهره‌وری آب با توجه به افزایش عملکرد و کاهش حجم آب ورودی به مزرعه افزایش یافت (۱٤). در همین راستا، تأثیر دوره‌های تر و خشک و مدیریت آبیاری برنج در اراضی پست و کم ارتفاع هند بررسی شد (۱۵). نتایج نشان داد که با حفظ عملکرد برنج (بیش از هفت تن در هکتار)، می‌توان ۳۵-۲٦/٦ درصد در مصرف آب صرفه‌جویی کرد.

ارائه راهکارهای مناسب برای مدیریت بهینه سامانه‌های کشاورزی با هدف رفع عوامل محدودکننده، نیازمند آزمایش‌های زیاد و هزینه‌بر در مناطق مختلف است. ازاین‌رو، راهی برای کاهش تعداد، زمان و هزینه این آزمایش‌ها لازم و ضروری است (۱٦). امروزه ارزیابی گزینه‌های مختلف تولید و تعمیم نتایج به مناطق دیگر با شرایط و اقلیم‌های متفاوت، با استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی امکان‌پذیر است. مدل DSSAT یکی از معروف‌ترین و پرکاربردترین مدل‌ها در سیستم‌های کشاورزی است که تاکنون با موفقیت برای گیاهان مختلف زراعی در سراسر جهان مورداستفاده شده است (۱۷). توانایی و دقت این مدل در شبیه‌سازی رشد گیاه، ارزیابی میزان آب مصرفی و تلفات نیترات به اثبات رسیده است (۱۸). پژوهشی در شناسایی بهترین مدیریت کود و آبیاری برای سیستم هوازی برنج- ذرت در مناطق نیمه‌خشک استوایی با استفاده از مدل DSSAT نشان داد که این مدل می‌تواند ابزاری مفید برای ارزیابی مدیریت‌های مختلف باهدف حفظ بازده و صرفه‌جویی در آب در سیستم برنج- ذرت در مناطق نیمه‌خشک استوایی باشد (۱۹). ارزیابی مدل DSSAT در مدیریت‌های مختلف آبیاری و کودی در شرایط آب و هوایی نیمه مدیترانه‌ای نشان داد که این مدل از توانایی مطلوبی برای پیش‌بینی عملکرد محصول و مقدار زیست‌توده در تیمارهای آبیاری و کودی برخوردار می‌باشد (۱۸). علی‌رغم انجام پژوهش‌های مختلف درزمینه ارزیابی قابلیت مدل DSSAT، مرور منابع موجود نشان می‌دهد که تاکنون در هیچ پژوهشی اثر تلفیقی مدیریت آبیاری و کود نیتروژن بر عملکرد و کارایی مصرف آب و نیتروژن برنج در استان مازندران بررسی نشده است. بنابراین، در این پژوهش، اثر سناریوهای محتمل مدیریت آب و کود نیتروژن در کشت برنج بر موارد مذکور با استفاده از مدل واسنجی و صحت‌سنجی شده DSSAT بررسی می‌شود.

## مواد و روش‌ها

داده‌های مزرعه‌ای مورد نیاز این پژوهش از حدود یک هکتار از اراضی شالیزاری تجهیز و نوسازی‌شده‌ی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری واقع در کیلومتر ۹ جاده ساری- دریا در استان مازندران با عرض و طول جغرافیایی منطقه به ترتیب ۳٦/۳۹ درجه شمالی و ۵۳/۰٤ درجه شرقی و ارتفاع از سطح دریا ۱۵- متر در طول دو فصل کشت برنج در سال‌های زراعی ۱۳۹۰ و ۱۳۹۱ تهیه شد (شکل ۱). طبق آمار هواشناسی ۱۸ ساله از ۱۳۸۱، منطقه مطالعه با متوسط بارندگی سالانه حدود ٦۵۷ میلی‌متر و متوسط دمای ۱۷/۷ درجه سانتی‌گراد دارای اقلیم مرطوب است.




**شکل ۱- موقعیت منطقه مطالعه در کشور و استان مازندران.**

**Figure 1. Location of the study area in country and Mazandaran province.**

بافت لایه‌های مختلف خاک تا عمق ۹۰ سانتی‌متری عموماً سیلتی رسی با درصد شن بین ٤/٢ تا ٦/٣، درصد سیلت بین ٤٣/٢ تا ٤٥ و درصد رس بین ٤٧/٨ تا ٥٢/٧ است. هدایت هیدرولیکی خاک در لایه‌های مختلف در محدوده ٢/٥ تا ٧/٣٢ سانتی‌متر در ساعت بود. برخی از خصوصیات خاک منطقه مطالعه در جدول ۱ ارائه شد. رقم دیلمانی که یک رقم زودرس و کم محصول است در اراضی موردمطالعه کشت شد. نشاکاری در روزهای ۳۰ تیر ۱۳۹۰ و ۲۸ اردیبهشت ۱۳۹۱ به‌صورت دستی و با تراکم حدود ١٦ بوته در مترمربع انجام شد. به‌جز در زمان‌های زهکشی میان‌فصل (به مدت یک هفته از ۲۵ روز پس از نشاکاری) و حدود دو هفته قبل از برداشت، مزرعه تحت آبیاری غرقاب بود.

**جدول ۱- مشخصات خاک مزرعه مطالعه.**

**Table 1. Soil characteristics of the study field.**

| pH | رس Clay (%) | سیلت Silt (%) | شن Sand (%) | کربن آلی Organic carbon (%) | نیتروژن کل Total nitrogen (%) | هدایت هیدرولیکی Hydraulic conductivity (cm $hr^{-1}$) | جرم مخصوص ظاهری Bulk density (gr $cm^{-3}$) | ضخامت لایه Layer thickness (cm) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 8 | 47.8 | 45 | 6.3 | 1.47 | 0.1 | 7.32 | 1.4 | 0-30 |
| 8.1 | 52.7 | 43.2 | 4.2 | 1.51 | 0.08 | 2.5 | 1.34 | 30-60 |
| 7.95 | 49.2 | 44.5 | 6.3 | 1.47 | 0.08 | 6.25 | 1.34 | 60-90 |

در این پژوهش از زیر مدل CERES-RICE در بسته نرم‌افزاری DSSAT V4.7.5 استفاده شد. حداقل داده‌های ورودی موردنیاز برای این مدل شامل اطلاعات موقعیت مکانی، اطلاعات هواشناسی، داده‌های خاک، داده‌های مدیریت مزرعه، کود، آب مصرفی و رقم گیاهی است. مدل CERES-RICE قادر است با استفاده از این اطلاعات، رشد و نمو فنولوژیکی، توزیع و تجمیع زیست‌توده، شاخص سطح برگ، رشد ریشه، ساقه، برگ و دانه را از زمان کاشت تا برداشت به‌صورت روزانه شبیه‌سازی کند (۱۶ و ۲۰). داده‌های هواشناسی موردنیاز مدل شامل ساعات آفتابی، بیشینه و کمینه دمای هوا و بارندگی است. این داده‌ها در فایل آب و هوایی مدل یا همان Weatherman مورداستفاده قرار گرفت. هم‌چنین، داده‌های ساعت آفتابی توسط این نرم‌افزار با استفاده از فرمول آنگستروم به اطلاعات تشعشع خورشیدی تبدیل شد (۲۱). داده‌های خاک شامل درصد رس و سیلت و شن و میزان کربن آلی است. علاوه بر این، درصد فسفر و نیتروژن و پتاسیم نیز به مدل معرفی شوند. درصد اجزای خاک برای تخمین ظرفیت نگهداری آب خاک توسط مدل مورداستفاده قرار گرفت. هم‌چنین، داده‌های مدیریتی گیاه شامل نام و نوع گونه، زمان کاشت، عمق و روش کاشت، فاصله و جهت کاشت، تراکم کشت، پارامترهای مدیریت آب آبیاری شامل روش و میزان آبیاری، میزان و روش کاربرد کود و نوع کود مصرفی و زمان برداشت به مدل معرفی شد. نوع گونه در واقع با استفاده از ترکیبی از ضرایب ژنتیکی که در فایل ژنوتیپ برای هر گیاهی وجود دارد ساخته می‌شود. ضرایب ژنتیکی هرگونه نیز با استفاده از داده‌های واقعی فنولوژیکی (تاریخ پنجه‌دهی، تاریخ خوشه‌دهی و غیره) و رشدی گیاه (سطح برگ و بقایای گیاهی و عملکرد) در سال اول و در زمان واسنجی مدل برآورد شد. عملکرد کل زیست‌توده در زمان برداشت، حداکثر شاخص سطح برگ، تاریخ خوشه‌دهی و تاریخ رسیدگی فیزیولوژیکی به‌عنوان شاخص‌های نهایی برای ساخت فایل A مدل مورداستفاده قرار گرفتند. هم‌چنین، عملکرد کل زیست‌توده طی دوره رشد، شاخص سطح برگ طی دوره رشد به‌صورت سری زمانی در فایل T مدل وارد شد. لازم به ذکر است که داده‌های اندازه‌گیری شده موجود در فایل‌های A و T به‌منظور واسنجی و ارزیابی مدل استفاده شدند. در این پژوهش، از ضرایب مدل واسنجی و صحت‌سنجی‌شده در گزارش علی‌نژاد و همکاران (۲۰۱۷) استفاده شد (۲۲).

برای ارزیابی اثرات مدیریت آبیاری، از آبیاری غرقاب دائم ($I_1$)، آبیاری متناوب با دور ۵ روز ($I_2$) و آبیاری متناوب با دور ۸ روز ($I_3$) استفاده شد. تیمارهای آبیاری متناوب در فاصله ۲۰ تا ۵۰ روز بعد از نشاکاری اعمال شدند. در فصول کشت ۱۳۹۰ و ۱۳۹۱، ۹۰ کیلوگرم در هکتار اوره در مزرعه استفاده شد. بر این اساس، مدیریت کودی در مدل در قالب شش تیمار انجام شد که عبارت‌اند از: $N_1$ (۵۰ درصد زمان کاشت، ۲۵ درصد زمان پنجه‌دهی و ۲۵ درصد در زمان خوشه‌دهی)، $N_2$ (۲۵ درصد زمان کاشت، ۵۰ درصد زمان پنجه‌دهی و ۲۵ درصد زمان خوشه‌دهی)، $N_3$ (۲۵ درصد زمان کاشت، ۵۰ درصد زمان پنجه‌دهی و ۲۵ درصد زمان خوشه‌دهی)، $N_4$ (کوددهی در زمان خوشه‌دهی)، $N_5$ (کوددهی در زمان پنجه‌دهی) و $N_6$ (کوددهی در زمان کاشت). از ترکیب تیمارهای آبیاری و کودی در مجموع ۱۸ تیمار حاصل شد که عبارت‌اند از: $I_1N_1$، $I_1N_2$، $I_1N_3$، $I_1N_4$، $I_1N_5$، $I_1N_6$، $I_2N_1$، $I_2N_2$، $I_2N_3$، $I_2N_4$، $I_2N_5$، $I_2N_6$، $I_3N_1$، $I_3N_2$، $I_3N_3$، $I_3N_4$، $I_3N_5$ و $I_3N_6$.

محاسبه شاخص‌های مدیریتی برای تحلیل اثر سناریوهای مختلف انجام گرفت که عبارت‌اند از: شاخص‌های کارایی مصرف آب (WUE)، کارایی اقتصادی مصرف آب (EWP)، کارایی فیزیولوژیکی مصرف نیتروژن برای تولید دانه (NUEg)، شاخص برداشت (HI) و شاخص برداشت نیتروژن (NHI).

کارایی مصرف آب (WUE) برحسب کیلوگرم بر مترمکعب به‌صورت مقدار عملکرد دانه تولیدشده بر واحد آب مصرفی (تبخیر- تعرق) به شرح زیر محاسبه شد (۲۳):

$$WUE = \frac{Y}{ET} \qquad (۱)$$

که در آن، Y عملکرد دانه محصول (کیلوگرم بر هکتار) و ET تبخیروتعرق تجمعی است که توسط مدل DSSAT و با استفاده از معادله پریستلی - تیلور (۲٤) تعیین شد. برای محاسبه بهره‌وری اقتصادی آب مصرفی، کارایی اقتصادی مصرف آب (EWP) بر حسب واحد قیمت بر مترمکعب طبق رابطه زیر محاسبه شد (۲۵):

$$EWP = WUE \times UPc \qquad (۲)$$

که در آن، UPc قیمت واحد تولیدشده (ریال برای هر کیلوگرم) است. UPc بر اساس قیمت‌گذاری ملی برای بذر شلتوک ۱۲×۱۰$^{٤}$ (ریال برای هر کیلوگرم) درنظر گرفته شد. قیمت برنج خریداری‌شده از کشاورز برای بذرشلتوک ۱۲×۱۰$^{٤}$ (ریال برای هر کیلوگرم) بود. قیمت برنج بسته به میزان کیفیت آن و نیز مکان جغرافیایی تولید آن تا حدودی متفاوت است، به‌نحوی که مثلاً قیمت برنج شهرستان‌های شمالی کشور به‌مراتب بالاتر از سایر شهرستان‌های کشور است. این امر بیش‌تر ناشی از مطلوب‌تر بودن شرایط اکولوژیکی تولید برنج است. با توجه قیمت برنج، شاخص کارایی اقتصادی مصرف آب به دست آمد.

کارایی فیزیولوژیکی مصرف نیتروژن برای تولید دانه (NUEg) که به‌صورت نسبت عملکرد دانه به نیتروژن جذب‌شده توسط گیاه در زمان برداشت تعریف می‌شود (۱۹)، به‌صورت زیر محاسبه شد:

$$NUE = \frac{Y}{N\ uptake} \qquad (۳)$$

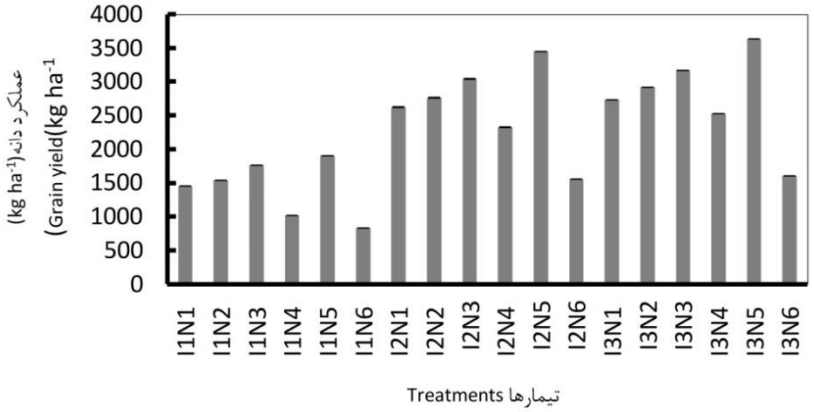
که در آن، Y عملکرد دانه محصول (کیلوگرم بر هکتار) و N uptake نیتروژن جذب‌شده توسط گیاه (کیلوگرم بر هکتار) است که با استفاده از مدل برای سناریوهای مختلف تعیین شد.

شاخص برداشت (HI) یکی دیگر از شاخص‌های مدیریتی است که از نسبت عملکرد دانه (Y- کیلوگرم بر هکتار) بر وزن زیست‌توده در زمان برداشت (Top Weight- کیلوگرم بر هکتار) به‌دست آمد. هم‌چنین، شاخص برداشت نیتروژن (NHI) به‌صورت نسبت نیتروژن دانه (کیلوگرم بر هکتار) بر نیتروژن جذب‌شده توسط گیاه (کیلوگرم بر هکتار) محاسبه شد.

## نتایج و بحث

شکل ۲ میزان عملکرد دانه در تیمارهای مختلف را نشان می‌دهد. کم‌ترین عملکرد (۸۳۲ کیلوگرم در هکتار) در تیمار $I_1N_6$ و بیش‌ترین مقدار آن (۳٦٤۰ کیلوگرم در هکتار) در تیمار $I_3N_5$ حاصل شد. تیمارهای آبیاری متناوب سبب افزایش عملکرد برنج در مقایسه با آبیاری غرقاب شدند. کاوسی و یزدانی (۲۰۲۰) میزان عملکرد دانه برنج را در آبیاری متناوب با دور ۵ روز بیش‌تر از غرقاب و علت را تعداد دانه‌های پر بیش‌تر یا تعداد دانه‌های پوک کم‌تر در

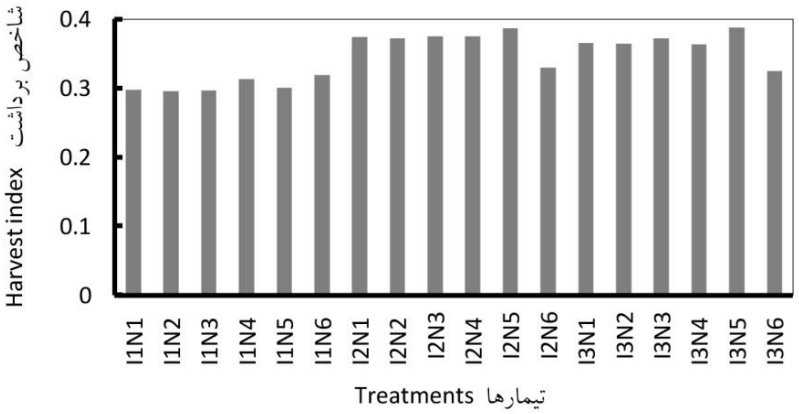
خوشه بیان کردند (۲۶). نتایج پژوهشی دیگر بیانگر آن است که عملکرد دانه برنج در رژیم آبیاری متناوب با تر و خشک نمودن دوره‌ای بیش‌تر از آبیاری غرقاب می‌باشد (۲۷). کاهش رشد رویشی زائد، افزایش رشد ریشه و شاخساره و کاهش پنجه‌های غیرمثمر و بهبود فتوسنتز برگ در آبیاری متناوب، برخی از دلایل افزایش عملکرد در این مدیریت در مقایسه با آبیاری غرقابی می‌باشند (۲۸ و ۲۹). کوددهی در زمان پنجه‌دهی برنج نسبت به زمان کاشت و خوشه‌دهی آن، سبب افزایش عملکرد برنج شد. کود نیتروژنه در مرحله تولید پنجه گیاه سبب افزایش تعداد خوشه شده و در مرحله ظهور سنبله و خوشه تا تکمیل نمو طولی آن موجب افزایش تعداد دانه در خوشه و افزایش وزن هزاردانه و در نتیجه افزایش عملکرد خواهد شد (۳۰). مشابه بودن روند تغییرات عملکرد تیمارهای $I_1N_1$ تا $I_1N_6$ با $I_2N_1$ تا $I_2N_6$ و $I_3N_1$ تا $I_3N_6$ تأثیر مشابه زمان کوددهی در هر سه تیمار مدیریتی آبیاری را نشان می‌دهد. کم‌ترین میزان عملکرد با اعمال مدیریت کوددهی، مستقل از مدیریت آبیاری، به تیمارهایی اختصاص داشت که کود نیتروژن در زمان کاشت مصرف شد ($I_1N_6$، $I_2N_6$ و $I_3N_6$). با توجه به عدم استقرار گیاه و نبود شرایط جذب، بخش عمده کود مصرفی در این مرحله، با راه‌های مختلف از دسترس گیاه خارج شده و افزون بر خسارت‌های اقتصادی، سبب تخریب محیط‌زیست خواهد شد. به‌عبارت‌دیگر، توجه به تطابق زمان کوددهی با قابلیت جذب گیاه اهمیت قابل‌توجهی در بهبود بهره‌وری کود مصرفی دارد. داوودی و همکاران (۲۰۱٤) گزارش کردند که کوددهی در انتهای دوره پنجه‌دهی تا زمان خوشه‌دهی دارای بالاترین راندمان مصرف است (۳۱). هم‌چنین وانگ و همکاران (۲۰۱٦) بیان کردند تلفیق رژیم آبیاری متناوب با تر و خشک نمودن دوره‌ای با مدیریت بهینه کوددهی می‌تواند با ممانعت از تولید پنجه‌های غیر مثمر و با سرعت بخشیدن به پیری گیاه و انتقال مجدد کربوهیدرات‌ها و ترکیبات ازت، از اثرات مخرب رژیم کوددهی بیش‌ازحد در رشد برنج بکاهد (۳۲). تاکور و همکاران (۲۰۱٤) بیان کردند مصرف نیتروژن می‌تواند توسعه ریشه‌های برنج را از طریق افزایش ریشه‌های افقی در شرایط تنش آبی افزایش داده و باعث افزایش عملکرد دانه برنج شود که این تحلیلی برای بالابودن عملکرد در کوددهی در زمان پنجه‌دهی و پایین‌بودن عملکرد در شرایط کوددهی در زمان کاشت است (٤).




**شکل ۲- میزان عملکرد دانه برنج تحت تیمارهای مدیریت آبیاری و کود.**

**Figure 2. Rice grain yield under irrigation and fertilizer management treatments.**

تأثیر تیمارهای مختلف مدیریت آبیاری و کود بر شاخص برداشت (HI) در شکل ۳ ارائه شد. هر دو مدیریت آبیاری و نیتروژن، تأثیر قابل‌توجهی بر شاخص برداشت داشتند. کم‌ترین شاخص برداشت (۰/۳۰) در تیمار $I_1N_2$ و بیش‌ترین مقدار آن (۰/۳۹) در تیمار $I_3N_5$ حاصل شد. تیمارهای آبیاری متناوب سبب افزایش شاخص برداشت در مقایسه با آبیاری غرقاب شدند. افزایش قابل‌توجه شاخص برداشت به‌واسطه آبیاری متناوب در برخی از پژوهش‌های گذشته نیز گزارش شد (۳۳ و ۳٤). کوددهی در زمان پنجه‌دهی نسبت به زمان کاشت و خوشه‌دهی، سبب افزایش شاخص برداشت در مقایسه با سایر تیمارهای کودی شد. کم‌ترین میزان شاخص برداشت با اعمال مدیریت کوددهی، مستقل از مدیریت آبیاری به تیمارهایی اختصاص داشت که کوددهی آن‌ها در زمان کاشت انجام شد ($I_1N_6$، $I_2N_6$ و $I_3N_6$). به‌طورکلی، مقایسه شاخص برداشت در تیمارهای مختلف نشان‌دهنده آن است که گیاه برنج در زمان پنجه‌دهی، شرایط مطلوبی برای جذب نیتروژن دارد و کوددهی در این مرحله، با تقویت اندام‌زایشی، بهبود شاخص برداشت را در پی خواهد داشت.

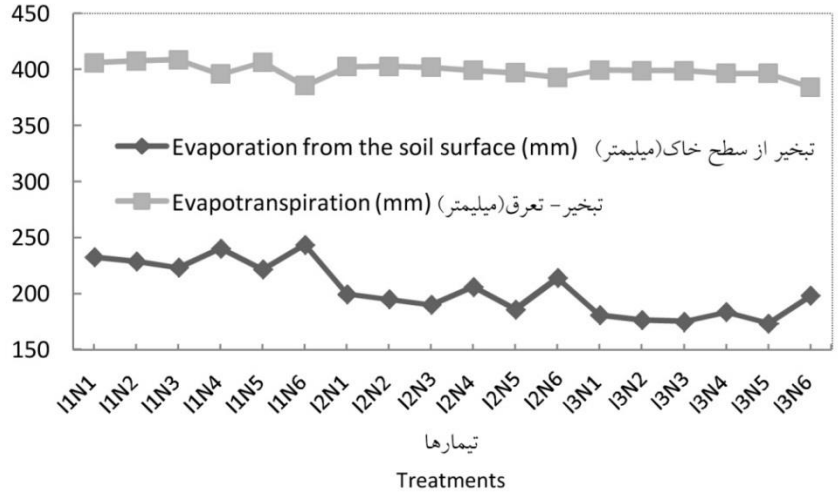



**شکل ۳- شاخص برداشت تحت تیمارهای مدیریتی آبیاری و کود.**

**Figure 3. Harvest index under irrigation and fertilizer management treatments.**

شکل ٤ میزان تبخیر-تعرق و تبخیر از سطح خاک در تیمارهای مختلف را نشان می‌دهد. به‌طورکلی، کم‌ترین میزان تبخیر-تعرق در تیمارهای $I_3$ و بیش‌ترین میزان آن در تیمارهای $I_1$ مشاهده شد. متوسط تبخیر-تعرق در شرایط غرقاب ٤۰۱/۸ میلی‌متر و در دورهای آبیاری ۵ و ۸ روز به ترتیب ۳۹۹/٤ و ۳۹۵/۷ میلی‌متر بود. تغییرات میزان تبخیر از سطح خاک، مشاهده روند تبخیر-تعرق بود. با ملاحظه تیمارهای مختلف کودی، تبخیر در مدیریت $I_1$ به ترتیب ۱٦/۸ و ۲۷/۸ درصد بیش‌تر از مقدار آن در مدیریت‌های $I_2$ و $I_3$ بود. این در حالی است که آبیاری متناوب سبب افزایش تعرق در مقایسه با غرقاب دائم شد. متوسط تعرق در تیمارهای $I_3$ (۲۱٤/٤ میلی‌متر) و $I_2$ (۲۰۱ میلی‌متر) به ترتیب حدود ۲۰/۷ و ۱۵/٤ درصد بیش‌تر از مقدار در تیمارهای $I_1$ (۱۷۰ میلی‌متر) بود. به‌عبارت‌دیگر، خشک و مرطوب شدن متناوب مزرعه برنج با کاهش تلفات تبخیر، مصرف مفید آب یا تعرق را در مقایسه غرقاب دائم افزایش می‌دهد. ازنظر مدیریت کود، کم‌ترین مقدار تبخیر در هر سه مدیریت آبیاری مربوط به تیمارهای

$N_5$ و بیش‌ترین مقدار تعرق مربوط به تیمارهای $N_3$ و $N_5$ بود. باملاحظه هر سه مدیریت آبیاری، متوسط تبخیر-تعرق در تیمارهای $N_1$، $N_2$، $N_3$، $N_4$، $N_5$ و $N_6$ به ترتیب ٤٠٢/٦، ٤٠٣، ٤٠٣/٢، ٣٩٧/٢، ٤٠٠ و ٣٨٧/٦ میلی‌متر بود که بیانگر نبود اختلاف قابل‌توجه بین تیمارهای کودی است. اختلاف این مؤلفه بیلان آب بین تیمارهای کودی دارای کم‌ترین ($N_6$) و بیش‌ترین ($N_3$) تبخیر-تعرق حدود ۱۵/۷ میلی‌متر بود درحالی‌که اختلاف تبخیر در تیمارهای متناظر دارای کم‌ترین ($N_5$) و بیش‌ترین ($N_6$) تبخیر، حدود ۲۵ میلی‌متر و کم‌ترین ($N_6$) و بیش‌ترین ($N_5$) تعرق، حدود ۳۸/۱ میلی‌متر بود. مقایسه این مقادیر به‌وضوح نشان‌دهنده اهمیت مدیریت کود در ارتقای مصرف مفید آب در مزارع برنج است. به‌طورکلی کوددهی تقسیطی در زمان‌های پنجه‌دهی و خوشه‌دهی سبب بهبود تعرق شد. محدوده متوسط تبخیر-تعرق روزانه در تیمارهای مختلف از ٤/٦٥ تا ٤/٩٣ میلی‌متر متغیر بود و میزان متوسط تبخیر-تعرق در همه تیمارها ٤/٨١ میلی‌متر در روز بود. در پژوهش غلامی و همکاران (۲۰۲۱)، میزان متوسط تبخیر-تعرق اراضی شالیزاری ٤/٩٨ میلی‌متر در روز گزارش شد که تقریباً با مقادیر مشاهده‌شده در این پژوهش مطابقت دارد (۳۵). متوسط تبخیر روزانه از سطح خاک در تیمارهای $I_1N_1$، $I_1N_2$، $I_1N_3$، $I_1N_4$، $I_1N_5$، $I_1N_6$، $I_2N_1$، $I_2N_2$، $I_2N_3$، $I_2N_4$، $I_2N_5$، $I_2N_6$، $I_3N_1$، $I_3N_2$، $I_3N_3$، $I_3N_4$، $I_3N_5$ و $I_3N_6$ به ترتیب ۲/۸، ۲/۷٦، ۲/٦۹، ۲/۹، ۲/٦۷، ۲/۹٤، ۲/٤، ۲/۳٥، ۲/۲۹، ۲/٤۸، ۲/۲٤، ۲/٥۸، ۲/۱۸، ۲/۱۲، ۲/۱۱، ۲/۲۱، ۲/۰۹ و ۲/۳۹ میلی‌متر بود. این مقادیر قابل‌مقایسه با محدوده گزارش‌شده توسط درزی و همکاران (۲۰۱۸) در یک پژوهش چهارساله (۲/۱ تا ۳/۱ میلی‌متر در روز) از یک مزرعه شالیزاری تحت کشت رقم هاشمی بود (۵).




**شکل ٤- تبخیر-تعرق و تبخیر از سطح خاک در تیمارهای مدیریت آبیاری و کود.**

**Figure 4. Evapotranspiration and evaporation from the soil surface in irrigation and fertilizer management treatments.**

مقادیر شاخص‌های کارایی مصرف آب (WUE) و کارایی اقتصادی مصرف آب (EWP) در تیمارهای مختلف در جدول ۲ ارائه شد. کم‌ترین میزان کارایی مصرف آب (۰/۲۳کیلوگرم بر مترمکعب) در تیمار $I_1N_6$ و بیش‌ترین مقدار آن (۰/۹۹۷ کیلوگرم بر مترمکعب) در تیمار $I_3N_5$ حاصل شد. بیش‌ترین شاخص کارایی مصرف آب در شرایط کم‌آبیاری رخ داده است. اختر و همکاران (۲۰۱٤) گزارش کردند که

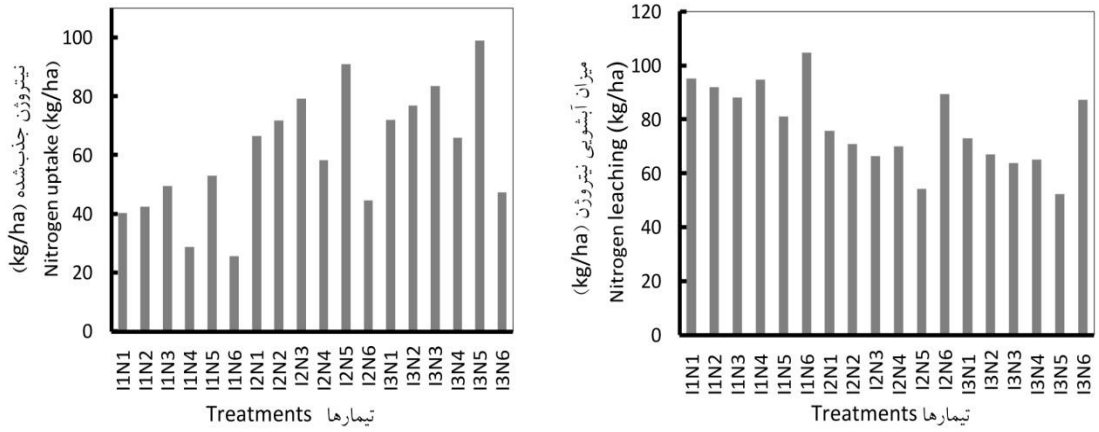
روش‌های کم‌آبیاری و آبیاری در ناحیه ریشه در مقایسه با آبیاری کامل، به ترتیب سبب افزایش کارایی مصرف آب به میزان ۳۵ و ۱۵ درصد شدند (۳۶). بر این اساس، می‌توان در مناطقی که حصول کارایی مصرف آب بیش‌تر دارای اهمیت است، با کاهش زمان یا مقدار آبیاری در مصرف آب صرفه‌جویی نمود (۳۷). افزایش کارایی مصرف آب به معنای افزایش میزان تولید گیاه به ازای واحد آب مصرفی است که این میزان تولید می‌تواند به دلیل مصرف بهینه نهاده‌ها و زمان استفاده از آن‌ها ایجادشده باشد (۳۸). در پژوهش فوق مناسب‌ترین زمان مصرف کود نیتروژنه برای بالا بردن شاخص کارایی مصرف آب، در زمان پنجه‌زنی برنج و نامناسب‌ترین زمان کوددهی در زمان کاشت حاصل شد. توزیع ریشه عامل مهمی در بالا رفتن کارایی مصرف آب است (۳۹). توده ریشه معمولاً با شاخص‌های عملکردی ازجمله طول، حجم و سطح ریشه‌های پرحاشیه، ریشه‌های جانبی درشت و ریشه‌های جانبی ریز ارتباط نزدیکی دارد و برای کشت هوازی، رشد ریشه برای بهبود محصول برنج مهم است (۲٤). اندام اقتصادی اکثر گیاهان زراعی، اندام‌های رویشی، دانه، ریشه و یا کل گل است. برنج گیاهی است که دانه آن به‌عنوان بخش اقتصادی مطرح است. کم‌ترین میزان EWP (۲/۷×۱۰$^{٤}$ ریال بر مترمکعب) در تیمار $I_1N_6$ و بیش‌ترین مقدار آن (۱۲×۱۰$^{٤}$ ریال بر مترمکعب) در تیمار $I_3N_5$ حاصل شد. دلیل بالابود این شاخص در تیمارهای مدیریتی کم‌آبیاری را می‌توان به عملکرد بیش‌تر برنج در این تیمارها مرتبط دانست. این مهم نشان می‌دهد که مدیریت مناسب آبیاری نقشی مهمی در دستیابی هم‌زمان به افزایش تولید برنج و صرفه‌جویی در مصرف آب دارد (۲۸).

**جدول ۲- کارایی مصرف آب (WUE) و کارایی اقتصادی مصرف آب (EWP) در تیمارهای مدیریت آبیاری و کود.**

**Table 2. Water use efficiency (WUE) and economic water productivity (EWP) in irrigation and fertilizer management treatments.**

| EWP (۱۰$^{٤}$ ریال بر مترمکعب)<br>EWP ($10^4$ Rls $m^{-3}$) | WUE (کیلوگرم بر مترمکعب)<br>WUE (kg $m^{-3}$) | تیمارهای مدیریتی<br>Management treatments |
|---|---|---|
| 4.6 | 0.383 | $I_1N_1$ |
| 4.8 | 0.403 | $I_1N_2$ |
| 5.6 | 0.464 | $I_1N_3$ |
| 3.2 | 0.271 | $I_1N_4$ |
| 6.1 | 0.504 | $I_1N_5$ |
| 2.7 | 0.225 | $I_1N_6$ |
| 8.5 | 0.707 | $I_2N_1$ |
| 9.0 | 0.746 | $I_2N_2$ |
| 9.9 | 0.825 | $I_2N_3$ |
| 7.5 | 0.628 | $I_2N_4$ |
| 11.4 | 0.948 | $I_2N_5$ |
| 5.1 | 0.425 | $I_2N_6$ |
| 8.9 | 0.743 | $I_3N_1$ |
| 9.5 | 0.796 | $I_3N_2$ |
| 10.4 | 0.865 | $I_3N_3$ |
| 8.3 | 0.690 | $I_3N_4$ |
| 12.0 | 0.997 | $I_3N_5$ |
| 5.3 | 0.445 | $I_3N_6$ |

شکل ۵ میزان نیتروژن جذب‌شده توسط گیاه و میزان آبشویی نیترات در زمان برداشت را در تیمارهای مختلف نشان می‌دهد. جذب نیتروژن توسط گیاه به‌عنوان بزرگ‌ترین مخزن در چرخه نیتروژن در اکوسیستم‌های کشاورزی است (۴۰). تیمار $I_1N_6$ کم‌ترین جذب و بیش‌ترین تلفات نیترات (به ترتیب ۲۵/۶ و ۱۰۴/۷ کیلوگرم بر هکتار) و تیمار $I_3N_5$ بیش‌ترین جذب و کم‌ترین تلفات نیترات (به ترتیب ۹۹ و ۵۲/۴۷ کیلوگرم بر هکتار) را دارا بودند. درواقع، هرکدام از تیمارها که دارای جذب کم‌تری باشد، تلفات نیترات بیش‌تری خواهد داشت. تیمارهای غرقاب و کوددهی در زمان کاشت، به دلیل بالا بودن تبخیر از سطح خاک و شکل نگرفتن اندام‌های رویشی گیاه، جذب حداقلی نیتروژن را در پی داشتند.



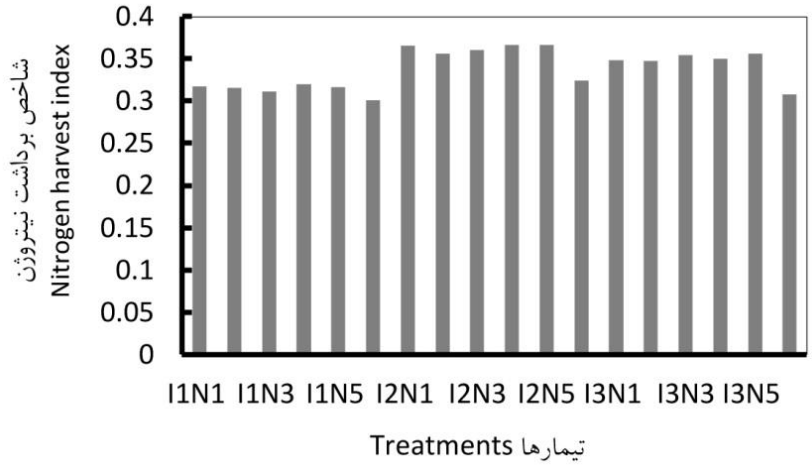

**شکل ۵- نیتروژن جذب‌شده و آبشویی نیتروژن در زمان برداشت در تیمارهای مدیریت آبیاری و کود.**

**Figure 5. Nitrogen uptake and nitrogen leaching at harvest in irrigation and fertilizer management treatments.**

در شرایط آبیاری با دور ۸ روز و کوددهی در زمان پنجه‌دهی، با توجه به بهبود شرایط جذب، کارایی استفاده از نیتروژن و انتقال آن به دانه‌ها افزایش پیدا می‌کند (۴۱) و تبخیر از سطح خاک به حداقل مقدار خود و جذب نیتروژن توسط گیاه به مقدار حداکثر خود می‌رسد که نتیجه آن، کاهش آبشویی نیترات است. بنابراین، آبیاری با تناوب ۸ روز و تقسیط کود به‌صورت ۲۵ درصد در زمان کاشت، ۲۵ درصد در زمان پنجه‌دهی و ۵۰ درصد در زمان خوشه‌دهی، به جهت فراهم نمودن جذب حداکثری کود نیتروژن و داشتن حداقل تلفات نیترات، مناسب‌ترین شرایط را ازنظر آبیاری-کودی فراهم نمود.

شکل ۶ شاخص برداشت نیتروژن (NHI) را نشان می‌دهد. کم‌ترین مقدار NHI مربوط به تیمار $I_1N_6$ (۰/۳) و بیش‌ترین مقدار آن مربوط به تیمار $I_2N_5$ (۰/۳۶۷) بود. ازآن‌جاکه NHI در غلات، اغلب به‌عنوان کارایی انتقال مجدد نیتروژن از قسمت‌های رویشی گیاه به دانه اندازه‌گیری می‌شود، بالا بودن آن نشان‌دهنده افزایش انتقال نیتروژن به دانه است (۴۲). مقادیر NHI مشاهده‌شده در این پژوهش (۳۷/۷-۳۰/۰۷ درصد)، قابل‌مقایسه با مقادیر گزارش‌شده برای ارقام مختلف برنج، بین ۳۳/۹ تا ۶۵ درصد (ژو و همکاران، ۲۰۱۶)، ۵۰/۲ تا ۶۸/۷ درصد (جیان و همکاران، ۲۰۱۴)، ۰/۶۷۴ تا ۰/۹۱۷ درصد (یی و همکاران، ۲۰۰۷) می‌باشد (۴۳، ۴۴ و ۴۵).

نتایجی دیگر نشان داد که افزایش مصرف نیتروژن سبب کاهش NHI شد که دلیل آن، جذب نیتروژن اضافی توسط ساقه بود (٤٤). در پژوهش حاضر، در تیمار $I_1N_6$ به علت غرقاب بودن و کودهی در زمان کاشت، کارایی مصرف و شاخص برداشت نیتروژن کاهش یافت. به‌طورکلی، هر واحد افزایش NHI سبب شد عملکرد دانه به مقدار قابل‌توجهی افزایش یابد.




**شکل ٦- شاخص برداشت نیتروژن در تیمارهای مدیریتی آبیاری و کودی مختلف.**

**Figure 6. Nitrogen harvest index in different irrigation and fertilizer management treatments.**

جدول ۳ کارایی فیزیولوژیکی مصرف نیتروژن برای تولید دانه و تنش نیتروژن در تیمارهای مختلف را نشان می‌دهد. در هر مدیریت آبیاری، بیش‌ترین کارایی مصرف نیتروژن در تیمار کودی $N_5$ حاصل شد و پس‌ازآن به ترتیب تیمارهای کودی $N_3$، $N_2$، $N_1$، $N_4$ و $N_6$ قرار داشتند. به‌عبارت‌دیگر، کوددهی در زمان کاشت و پنجه‌دهی به ترتیب کم‌ترین و بیش‌ترین NUEg را حاصل نمودند. این نتایج بیانگر آن است که مصرف کامل کود اوره در زمان کشت سبب می‌شود که تنش نیتروژن قابل‌توجهی به گیاه برنج وارد شود. علاوه بر این، تیمارهای تقسیط کودی که مشتمل بر مصرف بخشی از نیاز کودی در دوره کشت بودند نیز تنش نیتروژن زیادی ایجاد کردند. با توجه به تیمارهای موجود، مصرف تقسیطی کود اوره در زمان‌های پنجه‌دهی و خوشه‌دهی می‌تواند میزان کارایی مصرف آن را در مقایسه با سایر شرایط بهبود دهد. تغییر مدیریت آبیاری از غرقاب دائم به آبیاری متناوب با دور ۵ روز سبب کاهش ٣٤/١ تا ٦٤/٢ درصدی تنش نیتروژن و افزایش ٧٧/٨ تا ١٣١/٧ درصدی کارایی مصرف آن در تیمارهای مختلف کودی شد. افزایش دور آبیاری به ۸ روز سبب کاهش ٣٣/١ تا ٦٩/٨ درصدی تنش نیتروژن و افزایش ٨٦/٤ تا ١٥٤/٦ درصدی کارایی مصرف این ماده غذایی در مقایسه با غرقاب دائم شد. بر این اساس، تغییر آبیاری برنج از وضعیت غرقابی به سیستم آبیاری متناوب می‌تواند سبب کاهش اتلاف کودهای نیتروژنی و اثرات منفی آن بر محیط‌زیست شود. درزی نفت‌چالی و مختصی (۲۰۲۲) نشان دادند که بهبود تهویه خاک سبب ارتقای جذب مواد غذایی و افزایش عملکرد برنج می‌شود (٤٦). اثرات مثبت تر و خشک شدن متناوب خاک بر کارایی مصرف نیتروژن در پژوهش‌های دیگر نیز به اثبات رسید (٤٧ و ٤٨). هدف از

روش‌های مختلف عرضه کود نیتروژن، دستیابی به NUEg بالا و به حداکثر رساندن سود است (۴۹). نتایج وانگ و همکاران (۲۰۱۶) نشان داد که عملکرد دانه، WUE و NUE در برنج نه‌تنها توسط رژیم‌های آبیاری بلکه با تعامل آن‌ها با میزان N نیز تعیین می‌شود (۳۲). هم‌چنین از دلایل افزایش کارایی مصرف نیتروژن می‌توان به استفاده مؤثرتر از منابع نیتروژن در زمان حداکثر نیاز گیاه و کاهش زمان آبشویی اشاره کرد.

**جدول ۳- کارایی فیزیولوژیکی مصرف نیتروژن برای تولید دانه (NUEg) و تنش نیتروژن در تیمارهای مدیریت آبیاری و کود.**

**Table 3. Physiological use efficiency of nitrogen for grain production (NUEg) and nitrogen stress in irrigation and fertilizer management treatments.**

| NUEg | میانگین تنش نیتروژن<br>Average nitrogen stress | تیمارهای مدیریتی<br>Management treatments |
|---|---|---|
| 0.383 | 0.221 | $I_1N_1$ |
| 0.403 | 0.217 | $I_1N_2$ |
| 0.464 | 0.188 | $I_1N_3$ |
| 0.271 | 0.273 | $I_1N_4$ |
| 0.504 | 0.162 | $I_1N_5$ |
| 0.225 | 0.299 | $I_1N_6$ |
| 0.707 | 0.141 | $I_2N_1$ |
| 0.746 | 0.131 | $I_2N_2$ |
| 0.825 | 0.105 | $I_2N_3$ |
| 0.628 | 0.163 | $I_2N_4$ |
| 0.948 | 0.058 | $I_2N_5$ |
| 0.425 | 0.197 | $I_2N_6$ |
| 0.743 | 0.141 | $I_3N_1$ |
| 0.796 | 0.128 | $I_3N_2$ |
| 0.865 | 0.102 | $I_3N_3$ |
| 0.690 | 0.154 | $I_3N_4$ |
| 0.997 | 0.049 | $I_3N_5$ |
| 0.445 | 0.200 | $I_3N_6$ |

## نتیجه‌گیری کلی

این پژوهش باهدف بررسی اثرات تلفیق دور آبیاری و تقسیط کود نیتروژن بر عملکرد، بهره‌وری مصرف آب، کارایی مصرف نیتروژن و آبشویی نیترات در استان مازندران با بهره‌گیری از قابلیت مدل CERES-RICE انجام شد. براساس نتایج و با توجه به واکنش عملکرد دانه برنج، شاخص برداشت، بهره‌وری آب، کارایی اقتصادی مصرف آب، کارایی مصرف نیتروژن، نیتروژن جذب‌شده، آبشویی نیترات و شاخص برداشت نیتروژن به مدیریت‌های مختلف، آبیاری با تناوب ۸ روز بهترین نتایج را حاصل نمود. ازنظر مدیریت کود، کوددهی در زمان‌های پنجه‌دهی و خوشه‌دهی سبب بهبود قابل‌توجه شاخص‌های موردبررسی شدند. براساس نتایج، تقسیط کود به‌صورت ۲۵ درصد در زمان کاشت، ۲۵ درصد در زمان پنجه‌دهی و ۵۰ درصد در زمان خوشه‌دهی، شرایط مطلوبی را در میان تیمارهای کوددهی فراهم نمود. به‌طورکلی، نتایج نشان داد که تلفیق آبیاری با

تناوب ۸ روز (در دوره ۲۰ تا ۵۰ روز پس از نشاکاری) و کوددهی در زمان پنجه‌دهی دارای بهترین عملکرد بوده و می‌توان از آن به‌عنوان بهترین گزینه در مدیریت کشتزارهای برنج در منطقه موردمطالعه استفاده کرد که از مزایای آن، کاهش هزینه تولید، افزایش درآمد کشاورزان و کاهش اثرات زیست‌محیطی خواهد بود.

## تقدیر و تشکر

از دانشگاه بیرجند به دلیل حمایت مالی، و از دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری نیز به خاطر در اختیار قرار دادن زمین برای انجام تحقیقات مزرعه‌ای، کمال قدردانی به عمل می‌آید.

## داده‌ها و اطلاعات

داده‌های هواشناسی از اداره کل هواشناسی استان مازندران و داده‌های مزرعه‌ای در طول دو فصل کشت برنج در سال‌های ۱۳۹۰ و ۱۳۹۱ از مزرعه دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری تهیه شد.

## تعارض منافع

در این مقاله تعارض منافعی وجود ندارد و این مسئله مورد تأیید همه نویسندگان است.

## مشارکت نویسندگان

سمیرا ضیایی‌فر در تهیه داده‌ها، انجام محاسبات، نگارش و بازبینی مقاله؛ حسین خزیمه‌نژاد در نگارش و بازبینی مقاله؛ حسن علی‌نژاد در انجام شبیه‌سازی‌های مدل، عبداله درزی نفتچالی در نگارش و بازبینی مقاله مشارکت داشتند.

## اصول اخلاقی

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این اثر عملی رعایت نموده اند و این موضوع مورد تأیید همه آن‌ها می‌باشد.

## حمایت مالی

این پژوهش با حمایت مالی دانشگاه بیرجند انجام شد.

## منابع

1.FAO. 2014. FAO STATISTICAL YEARBOOK.2014.
2.Ministry of Jahad Agriculture. 2010. Agricultural statistics of the crop year 2017-2018. Volume One, Crops. 87p.
3.Guerra, L.C., Bhuiyan, S.I., Tuong, T.P., and Tuong, R. 1998. Producing More Rice withLess Water. SWIM Paper 5. International Water Management Institute, Colombo, Sri Lanka.
4.Thakur, A.K., Mohanty, R.K., Patil, D.U., and Kumar, A. 2014. Impact of water management on yield and water productivity with system of rice intensification (SRI) and conventional transplanting system in rice. Paddy Water Environ. 12: 413-424.
5.Darzi-Naftchali, A., Karandish, F., and Simunek, J. 2018. Numerical modeling of soil water dynamics in subsurface drained paddies with the midseason drainage or alternate wetting and drying management. Agric. Water Manag. 197: 67-78.
6.Bouman, B.A.M., and Tuong, T.P. 2001. Field water management to save water and increase its productivity in irrigated lowland rice. Agricultural Water Management. 49: 11-30.
7.Chen, S.K., and Liu, C.W. 2012. Analysis of water movement in paddy rice fields (I) experimental studies. Journal of Hydrology. 260: 206-215.
8.Pathak, B.K., Kazama, F., and Lida, T. 2004. Monitoring of nitrogen leaching from a tropical paddy field in Thailand. Agricultural Engineering International: The CIGR Journal of Scientific Research and Development. VI (December), Manuscript LW 04 015.

9. Darzi-Naftchali, A., Mirlatifi, S.M., Shahnazari, A., Ejlali, F., and Mahdian, M.H. 2013. Effect of subsurface drainage on water balance and water table in poorly drained paddy fields. Agric. Water Manage. 130: 61-68.
10. Liaghat, A., Pourgholam Amiji, M., and Mashhouri Nejad, P. 2018. The Effect of Surface and Subsurface Irrigation with Saline Water and Mulch on Corn Yield, Water Productivity and Solute Distribution in the Soil. Journal of Water and Soil. 32: 4. 661-674. (In Persian)
11. Li, Zh., Leighton, H.G., Masuda, K., and Takashima, T. 1993a. Estimation of SW Flux Absorbed at the Surface from TOA Reflected Flux. J. Climat. 6: 2. 317-330.
12. Taghizadeh, M., Esfahani, M., Davangar, N., and Madani, H. 2008. The effect of irrigation cycle and different amounts of nitrogen on yield and yield components of Tarom Hashemi rice in Rasht. Journal of New Agricultural Findings. 4: 2. 353-364. (In Persian)
13. Ashouri, M., Sadeghi, S.M., and Amiri, E. 2009. Investigation of the effects of irrigation cycle and nitrogen fertilizer on rice grain yield. Journal of Biological Sciences. 4: 3. 59-66. (In Persian)
14. Aghajani, M., and Navabyan, M. 2012. Comparison of some optimal indicators of water productivity in intermittent irrigation of Rasht paddy lands. Journal of Water and Soil (Agricultural Sciences and Industries). 5: 26. 1277-1288. (In Persian)
15. Mote, K., Rao, V.P., Ramulu, V., Kumar, K.A., and Devi, M.U. 2017. Standardization of alternate wetting and drying (AWD) method of water management in low land rice (*Oryza sativa* (L.)). International Journal of Plant Production. 11: 4. 515-532.
16. Godwin, D.C., and Singh, U. 1998. Nitrogen balance and crop response to nitrogen in upland and lowland cropping systems. In Understanding options for agricultural production. Springer. pp. 55-78.
17. Soltani, A., and Hoogenboom, G. 2007. Assessing crop management options with crop simulation models based on generated weather data. Field Crops Research. 103: 3. 198-207.
18. Amiri, E., Rezaei, M., Bannayan, M., and Soufizadeh, S. 2013. Calibration and Evaluation of CERES Rice Model under Different Nitrogen- and Water-Management Options in Semi-Mediterranean Climate Condition. Communications in Soil Science and Plant Analysis. 44: 12.
19. Jing, Q., Van Keulen, H., Hengsdijk, H., Cao, W., Bindraban, P.S., Dai, T., and Jiang, D. 2009 .Quantifying N response and N use efficiency in rice-wheat (RW) cropping systems under different water management. J. Agric. Sci. 147: 303-312.
20. Ritchie, J.T., Porter, C.H., Judge, J., Jones, J.W., and Suleiman, A.A. 2009. Extension of an existing model for soil water evaporation and redistribution under high water content conditions. Soil Sci. Soc. Am. J. 73: 792-801.
21. Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., and Smith, M. 1998. Crop Evapotranspiration-Guidelines for Computing Crop Water Requirements-Fao Irrigation and Drainage Paper 56. FAO. 300p.
22. Alinejad, H., Darzi-Naftchali, A., and Saberali, S.F. 2017. Performance Assessment of CERES-Rice Model for Predicting Nitrogen Balance Components During Rice Growing Season in Subsurface- Drained Paddy Fields. Iranian Journal of Irrigation and Drainage. 11: 2. 263-273. (In Persian)
23. Hatfield, J.L., and Dold, C. 2019. Water-use efficiency: advances and challenges in a changing climate. Front Plant Sci. https://doi.org/ 10.3389/ fpls.2019.00103.
24. Liu, X., Xu, C., Zhong, X., Li, Y., Yuan, X., and Cao, J. 2017. Comparison of 16 models for reference crop evapotranspiration against weighing lysimeter measurement. Agric Water Manag. 184: 145-155.
25. Karandish, F., Mousavi, S.S., and Tabari, H. 2017. Climate change impact on precipitation and cardinal temperatures in different climatic zones in Iran: analyzing the probable effects on cereal water-use efficiency. Stoch. Env. Res. Risk Assess. 31: 8. 2121-2146.

26. Kavoosi, M., and Yazdany, M.R. 2020. Effect of irrigation interval and nitrogen fertilizer rate on grain yield and yield components of rice (Oryza sativa L.) cv. Hashemi. Journal of Iranian Society of Crops and Plant Breeding Sciences. 22: 2. 168-182. (In Persian)
27. Cao, X.C., Wu, L.L., Lu, R.H., Zhu, L.F., Zhang, J.H., and Jin, Q.Y. 2020. Irrigation and fertilization management to optimize rice yield, water productivity and nitrogen recovery efficiency. Irrigation Science. 39: 235-249.
28. Yang, J., and Zhang, J. 2010. Crop management techniques to enhance harvest index in rice. Journal of Experimental Botany. 61: 12. 3177-3189.
29. De Vries, M., Rodenburg, J., V. Bado, B., Sow, A., A. Leffelaar, P., and Giller, E. 2010. Rice production with less irrigation water is possible in a Sahelian environment. Field Crops Research. 116: 154-164.
30. Carrers, R.C., Tome, R.G., Sendrea, J., Ballestors, R., Vallente, E.F., Quesada, A., Niera, M., and Leganes, F. 1996. Effect of nitrogen rates on rice growth and biological nitrogen fixation. Journal of Agricultural Science. Camb. 127: 295-302.
31. Davodi, M., Davangar, N., Tehrani, M., Moshiri, F., and Amiri larijani, B. 2014. Integrated soil fertility management and rice nutrition guidelines. Comprehensive program of soil fertility and plant nutrition. pp. 2014-2025. (In Persian)
32. Wang, Z., Zhang, W., Beebout, S., Zhang, H., Liu, L., Yang, J., and Zhang, J. 2016. Grain yield, water and nitrogen use efficiencies of rice as influenced by irrigation regimes and their interaction with nitrogen rates. Field Crop Res. 193: 54-69.
33. Yang, F., Xu, X., Wang, W., Ma, J., Wei, D., He, P., Pampolino, M.F., and Johnston, A.M. 2017. Estimating nutrient uptake requirements for soybean using QUEFTS model in China. PLOS ONE. 12(5): e0177509. http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone. 0177509.
34. Zhang, J., Tong, T., Potcho, P M., Huang, S., Ma, L., and Tang, X. 2021. Nitrogen Effects on Yield, Quality and Physiological Characteristics of Giant Rice. Agronomy. 10: 1816.
35. Gholami Sefidkouhi, M.A., Bagheri Khalili, Z., and Ghalenovi, A. 2021. Investigation of Rice Actual Evapotranspiration and Crop Coefficients for Shiroudi and Hashemi Cultivars in Sari. Journal of Water Research in Agriculture. 34: 4.505-516. (In Persian)
36. Akhtar, S.S., Andersen, M.N., and Liu, F. 2014. Biochar enhances yield and quality of tomato under reduced irrigation. Agricultural Water Management. 138: 37-44.
37. Asadi, R., Nasiri, M., and Mohammadyan, N. 2008. Optimal management of water consumption in paddy fields (low water conditions). Permanent Age Publications. 12p. (In Persian)
38. Yaghobi, B., and Rajabyan, M. 2010. A review of direct rice cultivation with emphasis on weed management. Publications of the National Rice Research Institute. Journal No. 37. 52 p. (In Persian)
39. Chu, G.,Wang, Z.Q., Zhang, H., Liu, L.J., Yang, J.C., and Zhang, J.H. 2015. Alternate wetting and moderate drying increases rice yield and reduces methane emission in paddy field with wheat straw residue incorporation. Food Energy Secur. 4: 238-254.
40. Negm, L.M., Youssef, M.A., Skaggs, R.W., Chescheir, G.M., and Kladivko, E.J. 2014a. DRAINMOD-DSSAT Simulation of the Hydrology, Nitrogen Dynamics, and Plant Growth of a Drained Corn Field in Indiana. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 140. 04014026.
41. Alijani Zafarani, M., Naeimi, M., Biabani, A., Rahemi, A., and Gholizadeh, A. 2019. The effect of nitrogen fertilizer installment under various light and temperature conditions on yield and efficiency of nitrogen consumption in durum wheat. Journal of Applied Research in Plant Ecophysiology. 6: 2. 135-147. (In Persian)

42. Zhu, G., Peng, S., Huang, J., Cui, K., Nie, L., and Wang, F. 2016. Genetic Improvements in Rice Yield and Concomitant Increases in Radiation- and Nitrogen-Use Efficiency in Middle Reaches of Yangtze River. Scientific reports. 6. 21049. https://doi.org/ 10.1038/srep21049.
43. Muurinen, S., Kleemola, J., and Peltonen-Sainio, P. 2007. Accumulation and translocation of nitrogen in spring cereal cultivars differing in nitrogen use efficiency. Agronomy Journal. 99: 441-449.
44. Jian, Z.P., Wang, F., Li, Z.Z., Chen, Y.T., Ma, X.C., Nie, L.X., Cui, K.H., Peng, S.B., Lin, Y.J., Song, H.Z., Li, Y., and Huang, J.L. 2014. Grain yield and nitrogen use efficiency responses to N application in Bt (Cry1Ab/Ac) transgenic two-line hybrid rice. Field Crops Research. 155: 184-191.
45. Ye, Q., Zhang, H., Wei, H., et al. 2007. Effects of nitrogen fertilizer on nitrogen use efficiency and yield of rice under different soil conditions. Frontiers of Agriculture in China. 1: 1. 30-36.
46. Darzi-Naftchali, A., and Mokhtassi-Bidgoli, A. 2022. Saving environment through improving nutrient use efficiency under intensive use of agrochemicals in paddy fields. Sci. Total Environ. 822: 153487.
47. Pan, J., Liu, Y., Zhong, X., et al. 2017. Grain yield, water productivity and nitrogen use efficiency of rice under different water management and fertilizer-N inputs in South China. Agricultural Water Management. 184: 191-200.
48. Djaman, K., Mel, V.C., Diop, L., et al. 2018. Effects of alternate wetting and drying irrigation regime and nitrogen fertilizer on yield and nitrogen use efficiency of irrigated rice in the Sahel. Water 10, 711. https://doi.org/10.3390/ w10060711.
49. Alou, I.N., Laan, M.V.D., Annandale, J.G., and Steyn, J.M. 2020. Water and Nitrogen (N) Use Efficiency of Upland Rice (*Oryza sativa* L.× *Oryza glaberrim*a Steud.) under Varying N Application Rates. Nitrogen. 1: 151-166.