J. Soil Plant Interact. 2026; 17(2): 59–75. https://doi.org/10.47176/jspi.17.2.20823

Journal of Soil and Plant Interactions

Journal homepage: https://jspi.iut.ac.ir/

ISSN: 2783-5014 EISSN: 2783-5286

Research Article

Evaluation of Yield and Nitrogen Use Efficiency by Managing Nitrogen and Phosphorus Application at Farm Scale for Rice Ratoon (*Oryza sativa* L.)

Saheb Soodaee Mashaee[1], Mohammad Mohammadian[2]* and Morteza Nasiri[2]

1- Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Iran
2- Rice Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Amol, Iran
* Corresponding author, Email: mohammadian953@yahoo.com

(Received: 22 February 2026; Revised: 22 April 2026; Accepted: 5 May 2026)

Abstract

Background and Objective: Nitrogen is the most important external input for crop production, and efficient nitrogen management is essential for improving long-term sustainability in modern agriculture. This study aimed to develop an effective approach for optimizing fertilization and improving the efficiency of nitrogen fertilizer use in rice.

Methods: The present study was conducted as a factorial (2×3×4) randomized complete blocks design with 24 treatments and three replications in the research farm of the Deputy of the National Rice Research Institute in Mazandaran during two cropping years. The treatments included four nitrogen levels (i.e., 0, 46, 69, and 92 kg N ha^{-1} applied as urea) and three phosphorus levels (i.e., 0, 23, and 46 kg P_2O5 ha^{-1} applied as triple superphosphate). At the harvest stage, grain and straw yield, nitrogen and phosphorus uptake, and nitrogen use efficiency (NUE) indices were measured and computed using established equations.

Results: The results indicated statistically significant effects of treatments on the measured traits and certain NUE indices at the 1% probability level. Specifically, the N_{92} treatment yielded grain and straw amounts of 864.2 and 1263.4 kg ha^{-1}, respectively, representing increases of 88.23 and 43.02% relative to the control (i.e., N_0), which corresponded to 98.8 and 160% higher nitrogen uptake in grain and straw, respectively, compared to N_0. Relative nitrogen productivity declined with increasing nitrogen rates in ratoon crops but rose with higher phosphorus application across different nitrogen levels. Apparent nitrogen recovery efficiency increased up to the N_{69} treatment and declined at the highest nitrogen rate (i.e., N_{92}).

Conclusion: Nitrogen and phosphorus interactions increased grain yield and NUE, which was accompanied by increased nitrogen uptake. Therefore, balanced application of nitrogen and phosphorus is recommended to enhance yield and NUE in ratoon rice systems. Increasing the NUE of rice is urgently needed for sustainable agricultural development.

Keywords: Ratoon rice, Nitrogen and phosphorus nutrition, Nitrogen efficiency, Fertilization.

How to Cite: Soodaee Mashaee, S., Mohammadian, M., Nasiri, M., 2026. Evaluation of yield and nitrogen use efficiency by managing nitrogen and phosphorus application at farm scale for rice ratoon (*Oryza sativa* L.). J. Soil Plant Interact. 17(2), 59–75 (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.47176/jspi.17.2.20823

Copyright © 2026 Isfahan University of Technology, Published by IUT Press. This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.

روابط خاک و گیاه ۱۴۰۵؛ ۱۷(۲): ۷۵-۵۹، https://doi.org/10.47176/jspi.17.2.20823

روابط خاک و گیاه

صفحه خانگی فصلنامه: https://jspi.iut.ac.ir/

شاپا: ۲۷۸۳-۵۰۱۴ شاپا الکترونیکی: ۲۷۸۳-۵۲۸۶

مقاله پژوهشی

ارزیابی عملکرد و کارایی مصرف نیتروژن با مدیریت مصرف نیتروژن و فسفر در مقیاس مزرعه برای رتون برنج (*Oryza sativa* L.)

صاحب سودائی مشائی[۱]، محمد محمدیان[۲*] و مرتضی نصیری[۲]

۱- گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، ایران

۲- موسسه تحقیقات برنج کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، آمل، ایران

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: mohammadian953@yahoo.com

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۲/۳؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۲/۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۲/۱۵)

چکیده

پیشینه پژوهش و هدف: نیتروژن مهم‌ترین نهاده خارجی برای هر سیستم تولید محصول است و مدیریت کارآمد نیتروژن برای بهبود پایداری درازمدت در سیستم‌های مدرن تولید محصولات کشاورزی ضروری است. این پژوهش با هدف دستیابی به رویکردی مؤثر در بهینه‌سازی کوددهی و بهبود کارایی مصرف کود نیتروژن رتون برنج انجام شد.

روش‌ها: پژوهش حاضر به‌صورت فاکتوریل (۲×۳×۴) در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با ۲۴ تیمار و سه تکرار در مزرعه پژوهشی معاونت مؤسسه تحقیقات برنج کشور در مازندران در دو سال زراعی اجرا شد. تیمارها شامل چهار سطح نیتروژن (صفر، ۴۶، ۶۹ و ۹۲ کیلوگرم نیتروژن در هکتار از منبع اوره) و سه سطح فسفر (صفر، ۲۳ و ۴۶ کیلوگرم فسفر P_2O_5 در هکتار از منبع سوپرفسفات تریپل) بود. در مرحله برداشت عملکرد دانه و کاه، جذب نیتروژن و فسفر اندازه‌گیری شده و با روابط شناخته‌شده، شاخص‌های کارایی مصرف نیتروژن (NUE) محاسبه شد.

نتایج: نتایج نشان داد که اثر تیمارها بر صفات اندازه‌گیری‌شده و برخی شاخص‌های کارایی نیتروژن محاسبه‌شده در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. تیمار نیتروژن ۹۲ (N_{92}) با مقادیر عملکرد دانه و کاه به‌ترتیب ۸۶۴/۲ و ۱۲۶۳/۴ کیلوگرم در هکتار نسبت به تیمار شاهد (N_0) به‌ترتیب ۸۸/۲۳ و ۴۳/۰۲ درصد افزایش نشان داد که میزان جذب نیتروژن در دانه و کاه هم نسبت به تیمار شاهد (N_0) به‌ترتیب ۹۸/۸ و ۱۶۰ درصد افزایش داشت. بهره‌وری نسبی نیتروژن با افزایش مصرف نیتروژن در رتون کاهش یافت ولی با افزایش مصرف فسفر در سطوح مختلف نیتروژن افزایش نشان داد. کارایی بازیافت ظاهری نیتروژن تا تیمار نیتروژن ۶۹ (N_{69}) افزایش یافته و با مصرف بیشتر نیتروژن (در تیمار نیتروژن ۹۲) کاهش یافت.

نتیجه‌گیری کلی: برهمکنش‌های نیتروژن و فسفر باعث افزایش عملکرد دانه و NUE شد که با افزایش جذب نیتروژن همراه بود. بنابراین، کاربرد متوازن نیتروژن و فسفر برای افزایش عملکرد و کارایی مصرف نیتروژن در سیستم‌های برنج رتون پیشنهاد می‌شود. افزایش NUE برنج برای توسعه کشاورزی پایدار به شدت مورد نیاز است.

واژه‌های کلیدی: برنج رتون، تغذیه نیتروژن و فسفر، کارایی نیتروژن، کوددهی.

حق انتشار این مستند، متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است. ۱۴۰۵ ©.

این مقاله تحت گواهی زیر منتشر شده و هر نوع استفاده غیرتجاری از آن مشروط بر استناد صحیح به مقاله و با رعایت شرایط مندرج در آدرس زیر مجاز است:

Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

مقدمه

خاک‌های شالیزاری که تقریباً ۹ درصد از مساحت زمین‌های زراعی جهان را تشکیل می‌دهند، اکوسیستم‌های کشاورزی حیاتی هستند که تولید جهانی برنج و امنیت غذایی بیش از ۳/۵ میلیارد نفر را حفظ می‌کنند (Liu et al., 2021). با افزایش سریع جمعیت جهانی که باعث افزایش تقاضای غذا می‌شود، پیش‌بینی می‌شود که نیاز به محصولات کشاورزی تا سال ۲۰۵۰ دو برابر شود (Zou et al., 2022). اگر قرار باشد تقاضای رو به افزایش جمعیت برآورده شود، افزایش تولید برنج ضروری است. با این‌حال، منابع طبیعی زمین قابل کشت محدود است؛ بنابراین، بخش زیادی از این افزایش باید از راه کشت مجدد و بهبود عملکرد در هکتار حاصل شود. تولید محصول دوم برنج در یک فصل کشت به‌عنوان راتونینگ شناخته می‌شود. محصول رتون با جوانه‌زدن مجدد پنجه‌های برنج از قسمت جوانه‌های گردنی ساقه‌های به‌جامانده پس از برداشت کشت اول برنج توسعه می‌یابد (Wang et al., 2020). رتون دارای دوره رشد کوتاهی بوده و رسیدن آن‌ها تنها در ۳۵ تا ۶۵ درصد زمان لازم برای تولید محصول اصلی صورت می‌گیرد. بر اساس بررسی‌ها و گزارش‌های موجود در کشورهای مختلف، عملکرد رتون در دامنه ۰/۶۸ تا ۳/۵ تن در هکتار برآورد شده است (Zhang et al., 2023; Bahar and De Datta, 1977). عملکرد برنج رتون در مرز شمالی کشور بین ۱ تا ۳ تن در هکتار متغیر بوده که به‌دلیل تفاوت در مدیریت کودی و آبیاری مزرعه و مدت زمان فصل رشد است (Firouzi et al., 2018).

نیتروژن یک عنصر غذایی معدنی اولیه مورد نیاز برای رشد گیاه است و به‌طور گسترده در تولید محصولات کشاورزی استفاده می‌شود (Du et al., 2022). مصرف جهانی کود نیتروژن از ۱۱ تراگرم در سال ۱۹۶۰ به ۱۱۰ تراگرم در سال ۲۰۱۵ افزایش یافته که بیش از نیمی از آن برای تولید غلات استفاده شده است (FAOStat, 2021). الگوهای نامناسب کوددهی و استفاده بیش از حد از کود نیتروژن منجر به هدررفت قابل توجه نیتروژن از راه تصعید آمونیاک و آبشویی به لایه‌های زیرین خاک شده است (Peng et al., 2010). این بدان مفهوم است که کارایی مصرف نیتروژن به حدود ۳۵ درصد رسیده است (Sun et al., 2015; Cao et al., 2013)؛ بنابراین، هزینه‌های تولید و خطرات زیست‌محیطی افزایش می‌یابد (Somaweera et al., 2016). بهبود کارایی مصرف نیتروژن برای کاهش هزینه‌های اقتصادی و آثار زیست‌محیطی همراه با حفظ عملکرد محصول بسیار مهم است. دانشمندان پژوهش‌های زیادی در مورد اصلاح ارقام با کارایی نیتروژن زیاد، بهینه‌سازی راهبرد کاربرد کود نیتروژن و انجام فناوری‌های کشاورزی دقیق انجام داده‌اند (Chu et al., 2019). Godfrey et al. (2010) گزارش دادند که با بهینه‌سازی مدیریت کود و محصول و فراهم‌کردن شرایط محیطی مناسب، کارایی بازیابی نیتروژن می‌تواند تا ۷۰ درصد افزایش یابد. کاربرد متوازن کود، مهم‌ترین جزء فناوری‌های مدرن تولید محصولات کشاورزی است (Zheng et al., 2017). گزارش شده است که آثار برهمکنش نیتروژن و فسفر می‌تواند بر رشد گیاه، کارایی مصرف نیتروژن (NUE) و عملکرد دانه تأثیر بگذارد (Duncan et al., 2018; Du et al., 2022). برخی اقدامات مؤثر برای کاهش میزان مصرف نیتروژن و افزایش کارایی مصرف نیتروژن پیشنهاد شده است، مانند استفاده از نیتروژن در چند مرحله رشد (تقسیطی)، تنظیم میزان نیتروژن بر اساس قرائت کلروفیل برگ (Hu et al., 2007)، استفاده از کود نیتروژن با رهایش کنترل‌شده، استفاده از مهارکننده‌های اوره‌آز، کاشت گونه‌های برنج با کارایی زیاد و کاربردهای ترکیبی کودهای آلی و معدنی (Liu et al., 2016). کوددهی نیتروژن می‌تواند بر ویژگیهای خاک و فعالیت‌های جامعه میکروبی ریزوسفر تأثیر بگذارد که به نوبه خود آثار قابل‌توجهی بر تولید برنج دارند (Ding et al., 2019).

فسفر یک عنصر غذایی حیاتی برای رشد گیاه است که نقش کلیدی در فرآیندهای فیزیولوژیک و بیوشیمیایی متعددی ایفا می‌کند. با این‌حال، اکثر منابع فسفر کاربردی از نظر فراهمی محدود و عمدتاً نامحلول هستند، زیرا عمدتاً از هوازدگی مواد معدنی، کودها، مواد آلی در حال تجزیه و بقایای گیاهی سرچشمه می‌گیرند (Luo et al., 2026; Vaccari, 2009). با وجود اینکه برخی از خاک‌ها دارای محتوای فسفر کل زیادی هستند، بخش

زیادی از این فسفر برای گیاهان غیرقابل‌دسترس باقی می‌ماند (Syers et al., 2008). استفاده کارآمد و منطقی از کود فسفره برای حمایت از رشد محصول و تضمین امنیت غذایی ضروری است (Mogollon et al., 2021). کوددهی فسفر بر جذب و استفاده از نیتروژن توسط محصول تأثیر می‌گذارد و از طرفی، مصرف نیتروژن توسط محصول تحت تأثیر وضعیت فسفر یا عناصر دیگر مانند پتاسیم خاک قرار دارند. کودهای فسفره می‌توانند مورفولوژی ریشه، مانند طول ریشه، زیست‌توده ریشه و تعداد ریشه را تغییر دهند و به‌طور بالقوه بر جذب و توزیع مجدد نیتروژن تأثیر بگذارند (Deng et al., 2018; Fageria et al., 2014). Metho et al. (1997) گزارش کردند که عملکرد و کارایی مصرف نیتروژن گندم پس از استفاده همزمان از کود نیتروژن، فسفر و پتاسیم، از مجموع مقادیر حاصل از افزودن هر عنصر غذایی به‌صورت جداگانه فراتر رفت.

کاربرد بیش از اندازه نیتروژن میزان پرشدن دانه را کاهش می‌دهد، و پوکی دانه‌های تحتانی خوشه و تأخیر در زمان پرشدن دانه نیز موجب کاهش عملکرد می‌شود. احتمالاً ورودی نیتروژن زیاد باعث افزایش غلظت نیتروژن در بافت گیاهی می‌شود و ممکن است سبب تشدید متابولیسم نیتروژن شده و منجر به افزایش مصرف کربوهیدرات و کاهش انتقال کربوهیدرات برای پرشدن دانه شود (Zhang et al., 2021). Du et al. (2022) نشان دادند که برهمکنش‌های نیتروژن، فسفر و پتاسیم به‌دلیل افزایش کارایی زراعی مصرف نیتروژن (AE_N)، عملکرد دانه را افزایش می‌دهد. کاربرد همزمان N، P و K، کارایی جذب و بازیابی نیتروژن را بهبود بخشید که از کاهش NUE فیزیولوژیک و درونی فراتر رفت و در نتیجه AE_N را بهبود بخشید. افزایش طول و زیست‌توده ریشه، جذب نیتروژن به‌ازای واحد طول ریشه به زیست‌توده ریشه، فعالیت اکسیداسیون ریشه، کل سطح جذب ریشه‌ها و سطح جذب فعال ریشه‌ها در مرحله طویل‌شدن، جذب نیتروژن را از راه برهمکنش‌های N، P و K بهبود بخشید. جذب کل نیتروژن بیشتر از برهمکنش‌های N، P و K به‌دلیل بهبود ویژگی‌های ریشه بود که عملکرد برنج و کارایی مصرف نیتروژن را افزایش داد (Du et al., 2022). کارایی بازیافت کود نیتروژن با شیوه مدیریت کشاورزان در آزمایش‌های مزارع شالیزاری آنها، ۱۸ درصد است (Wang et al., 2001). گزارش شده که کارایی بازیافت کود نیتروژن کشاورزان در چهار استان چین، ۲۰ تا ۳۰ درصد است (Peng et al., 2006). همچنین دانشمندان گزارش کردند که کارایی زراعی مصرف نیتروژن در فصل خشک در مزارع فیلیپین، ۱۵ تا ۱۸ کیلوگرم در کیلوگرم نیتروژن است (Cassman et al., 2002). از آنجایی که کارایی مصرف نیتروژن گیاه یک ویژگی پیچیده است که تحت تأثیر عوامل ژنتیکی و همچنین نشانه‌های محیطی قرار دارد، درک بهتری از برهمکنش‌های بین اجزای کلیدی کارایی مصرف نیتروژن و شیوه‌های مدیریت کشاورزی برای دستیابی به برنج با کارایی نیتروژن بهینه مورد نیاز است.

به‌دلیل نبود خاک‌ورزی در تولید محصول رتون، مصرف کود تماماً در سطح خاک صورت گرفته و همین امر کارایی مصرف کم کودها به ویژه نیتروژن را درپی دارد. از طرفی، پس از برداشت محصول اول برنج، سطح عناصر غذایی خاک در کمترین مقدار ممکن در طول سال قرار دارد. بنابراین مصرف عناصر غذایی نیتروژن، فسفر و پتاسیم به‌صورت پایه اهمیت زیادی دارد. متأسفانه بیشتر کشاورزان در تولید رتون از مقادیر بسیار زیاد و بیش از حد نیاز کود نیتروژن استفاده می‌کنند بدون اینکه از سایر کودها به‌ویژه کودهای فسفر و یا پتاسیم استفاده کنند. این مسئله دلایل کارایی کم مصرف کود نیتروژن پرورش رتون است. این پژوهش با هدف بررسی و مقایسه انواع کارایی مصرف نیتروژن در پرورش رتون با تغذیه مقادیر مختلف نیتروژن و فسفر در دو سال زراعی انجام شد.

مواد و روش‌ها

کاشت برنج و شرایط رشد

پژوهش حاضر در مزرعه پژوهشی مؤسسه تحقیقات برنج کشور معاونت مازندران واقع در آمل با طول جغرافیایی ۵۲ درجه و ۲۷ دقیقه شرقی و با عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۲۸ دقیقه شمالی

جدول ۱. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده برای آزمایش

Table 1. Physical and chemical properties of the soil used in the experiment

K_{ava}	P_{ava}	CCE (%)	OC (%)	EC_e (dS m^{-1})	SP (%)	pH	بافت خاک Soil texture
mg kg^{-1}							
224	8.25	29	2.51	0.99	68	6.7	Clay loam

SP: درصد اشباع (Saturation percentage)، EC_e: رسانایی الکتریکی عصاره اشباع (Electrical conductivity of saturation extract)، OC: کربن آلی (Organic carbon)، CCE: کربنات کلسیم معادل (Calcium carbonate equivalent)، P_{ava}: فسفر قابل جذب (Available phosphorus)، K_{ava}: پتاسیم قابل جذب (Available potassium).

و ارتفاع ۳۰ متر از سطح دریا در سال زراعی ۱۴۰۰ و ۱۴۰۱ انجام شد. رقم برنج مورد بررسی رقم طارم هاشمی بود که بذر آن از مؤسسه تحقیقات برنج کشور–معاونت مازندران تهیه شد. این رقم از ارقام بومی با کیفیت مطلوب بوده و میانگین عملکرد دانه آن حدود ۳۸۵۰ کیلوگرم در هکتار، شلتوک‌های این رقم دارای ریشک بوده و میانگین ارتفاع بوته ۱۴۰ سانتی‌متر است (Hosseinpour et al., 2021). عملیات آماده‌سازی زمین در اوایل بهار و نشاکاری در هر دو سال در نیمه اردیبهشت انجام شد. در همه کرت‌ها، تمامی کودهای شیمیایی مورد نیاز در کشت اول به‌صورت یکنواخت و براساس نتایج تجزیه خاک مصرف شد (Emami, 1996). براین اساس، ۵۰ کیلوگرم کود اوره با ۱۰۰ کیلوگرم کود سوپرفسفات تریپل و ۵۰ کیلوگرم در هکتار کود سولفات پتاسیم پیش از کشت به‌صورت پایه مصرف شد. در مرحله دوم ۵۰ کیلوگرم کود اوره و ۵۰ کیلوگرم در هکتار کود سولفات پتاسیم ۲۵ روز پس از نشاکاری به‌صورت سرک مصرف شد. در نهایت ۲۰ کیلوگرم در هکتار کود اوره ۴۵ روز پس از نشاکاری به‌عنوان سرک سوم مصرف شد. بر اساس توصیه مؤسسه تحقیقات برنج کشور، برای مبارزه با آفت کرم ساقه‌خوار در مرحله زایشی از آفت‌کش دیازینون گرانوله ۱۰ درصد به‌میزان ۲۵ کیلوگرم درهکتار و برای کنترل بیماری سوختگی غلاف از قارچ‌کش تیلت به نسبت دو در هزار استفاده شد. همچنین علف‌های هرز با دو روش وجین دستی در دو مرحله ۲۰ و ۳۵ روز پس از نشاکاری و مبارزه شیمیایی با علف‌کش کلین‌وید به‌میزان ۲/۵ لیتر در هکتار کنترل شدند. برداشت محصول اصلی در ارتفاع ۴۰ سانتی‌متر انجام شد. پس از برداشت محصول اصلی، از هر تکرار یک نمونه مرکب از لایه رویی خاک تهیه شده و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک اندازه‌گیری شد. نتایج ویژگی‌های خاک مکان آزمایش در جدول (۱) ارائه شده است.

کربن آلی خاک در حد مطلوب بوده، رسانایی الکتریکی خاک مورد استفاده برابر ۰/۹۹ دسی‌زیمنس بر متر است؛ بنابراین خاک مورد استفاده محدویت شوری نداشته و واکنش آن در محدوده خنثی تا کمی اسیدی است. بافت خاک لوم رسی بوده و دارای فسفر قابل جذب نسبتاً کم است. مقدار پتاسیم قابل جذب خاک، زیاد بوده و محدودیتی برای رشد گیاه ایجاد نخواهد کرد. سایر عملیات زراعی مانند مبارزه با علف‌های هرز، آفات و بیماری‌ها به‌طور یکنواخت در کلیه کرت‌های آزمایشی در کشت رتون هم انجام گرفت.

طرح آزمایشی

نشاکاری به تعداد سه کپه و با فاصله ۲۰ × ۲۰ سانتی‌مترمربع در کرت‌ها به اندازه ۱۲ مترمربع در اواخر اردیبهشت ماه سال ۱۴۰۰ و ۱۴۰۱ نشا شدند (Mohammadian et al., 2019). برای جلوگیری از نشت آب همراه با کود بین کرت‌های اصلی تیمارهای کودی، مرز قرار گرفته و دو طرف مرز به‌طور کامل تا اعماق حدود ۱۵ سانتی‌متر زیر سطح خاک با نایلون پوشانده شد. آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی، عامل اول شامل مصرف نیتروژن در چهار سطح صفر (N_0)، ۴۶ (N_{46})، ۶۹ (N_{69}) و ۹۲ (N_{92}) کیلوگرم نیتروژن در هکتار از منبع اوره و عامل دوم مصرف فسفر در سه سطح صفر (P_0)، ۲۳ (P_{23}) و ۴۶ (P_{46}) کیلوگرم فسفر P_2O_5 در هکتار از منبع

سوپرفسفات تریپل در سه تکرار اجرا شد. پس از برداشت کشت اصلی، نسبت به آبیاری کرت‌ها برای پرورش رتون اقدام شد و به همراه آبیاری دوم تمامی مقدار کود فسفاته و ۷۰ درصد کود اوره (سرک اول) استفاده شد. باقی‌مانده کود اوره دو هفته پس از آن (سرک دوم) مصرف شد.

نمونه‌برداری و اندازه‌گیری‌ها

برای اندازه‌گیری صفات عملکرد دانه و کاه، نمونه ۱۲ بوته‌ای در مرحله رسیدگی فیزیولوژیک تهیه شد. برای تعیین عملکرد دانه، پنج متر مربع از هر کرت برداشت شده و میزان تولید با رطوبت ۱۴ درصد محاسبه شد (IRRI, 2013). نمونه‌های ساقه و برگ (کاه) در دمای ۷۰ درجه سلسیوس تا رسیدن به وزن ثابت در آون خشک شده و سپس وزن شدند. غلظت نیتروژن دانه و کاه با استفاده از هضم و روش کجلدال، و غلظت فسفر به روش رنگ‌سنجی (وانادات–مولیبدات) و با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری شد (Nelson and Sommers, 1980). وزن خشک دانه، کاه و غلظت نیتروژن برای محاسبه جذب نیتروژن گیاه و کارایی بازیابی نیتروژن استفاده شد. از زیست‌توده، غلظت نیتروژن و فسفر در بافت‌ها برای محاسبه جذب کل نیتروژن و فسفر، کارایی زراعی کود نیتروژن (AE_N)، کارایی بازیافت نیتروژن (RE_N)، کارایی فیزیولوژیک نیتروژن (PE_N)، کارایی درونی نیتروژن (IE_N) و عامل بهره‌وری نسبی نیتروژن (RPF_N) استفاده شد که با روابط ۱ تا ۵ محاسبه شدند (Wei et al., 2018). کل جذب نیتروژن در میلی‌گرم گیاه با حاصلضرب غلظت نیتروژن در زیست‌توده شاخساره گیاه محاسبه شد:

$$AE_N= (GY_{+N} –GY_{0N})/FN \quad (۱)$$

$$RE_N= (UN_{+N}-UN_{0N})/FN \quad (۲)$$

$$PE_N= (GY_{+N}-GY_{0N})/(UN_{+N}-UN_{0N}) \quad (۳)$$

$$IE_N= GY/UN \quad (۴)$$

$$RPF_N= GY_{+N}/FN \quad (۵)$$

که در این روابط، GY_{+N} عملکرد شلتوک در تیمار با مصرف نیتروژن (کیلوگرم در هکتار)، GY_{0N} عملکرد شلتوک در تیمار بدون مصرف کود، UN_{+N} و UN_{0N} به‌ترتیب میزان جذب کل نیتروژن زیست‌توده شاخساره در مرحله رسیدگی فیزیولوژیک در کرت‌هایی که کود نیتروژن دریافت کردند و کرت بدون مصرف نیتروژن برحسب کیلوگرم در هکتار، FN مقدار کود نیتروژن مصرف شده (کیلوگرم در هکتار) است. در کارایی درونی، GY عملکرد شلتوک در هر تیمار برحسب کیلوگرم در هکتار و UN جذب کل نیتروژن (کیلوگرم در هکتار) در هر تیمار است (Dobermann and Fairhurst, 2000).

تجزیه و تحلیل آماری

برای بررسی آثار تیمارهای کوددهی بر رشد گیاه و کارایی مصرف نیتروژن، محاسبات با استفاده از نرم‌افزار Excel 2019 (Microsoft, Redmond, WA, USA) انجام شد. ابتدا پیش‌شرط‌های تجزیه واریانس شامل همگن‌بودن واریانس خطا و توزیع نرمال باقی‌مانده‌ها بررسی شده و در صورت لزوم، تبدیل داده‌ها با روش‌های معمول انجام گرفت. تجزیه واریانس داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS (ver. 23.0) و در پایان مقایسه میانگین تیمارها با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد.

نتایج و بحث

عملکرد دانه و کاه

نتایج تجزیه واریانس نشان داد (جدول ۲) که اثر اصلی تیمار نیتروژن، فسفر و اثر سال و اثر برهمکنش نیتروژن × فسفر بر عملکرد دانه و کاه رتون در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. همچنین اثر برهمکنش سال × فسفر و سال × نیتروژن × فسفر بر عملکرد دانه تنها در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. مقایسه میانگین عملکرد دانه و کاه نشان داد (جدول ۳) که تیمار N_{92} با عملکرد دانه و کاه به‌ترتیب برابر ۸۶۴/۲ و ۱۲۶۳/۴ کیلوگرم در هکتار بیشترین و تیمار شاهد (N_0) با مقادیر ۴۵۹/۱ و ۸۸۳/۳ کیلوگرم در هکتار، کمترین عملکرد دانه و کاه حاصل شد.

جدول ۲. تجزیه واریانس اثر مقدار کاربرد نیتروژن (N) و فسفر (P) بر عملکرد و جذب نیتروژن و فسفر در کاه و دانه رتون برنج (رقم هاشمی) در دو سال زراعی.

Table 2. Variance analysis of the effect of nitrogen (N) and phosphorus (P) application rates on yield and nitrogen and phosphorus uptake in straw and grain of rice ratoon (Hashemi cultivar) in two crop years.

منابع تغییر Sources of variation	درجه آزادی df	Mean squares (میانگین مربعات)							
		GY	SY	SNU	GNU	TNU	SPU	GPU	TPU
بلوک Block	2	2351.2	63050	0.713	0.215	0.408	0.018	0.103	0.203
نیتروژن N	3	526795**	500609**	138.0**	163.3**	600.0**	4.30**	58.86**	94.71**
فسفر P	2	70677**	21034**	9.02**	19.53**	54.93**	0.233**	1.53**	2.92**
سال Year	1	586264**	675606**	295.6**	314.7**	1220**	0.00001	0.00001	0.00001
N × P	6	3341**	555395**	0.946**	1.04**	2.68**	0.146**	0.415**	0.659**
N × Year	3	847.4	1338	5.51**	0.349	8.48**	0.00001	0.00001	0.00001
P × Year	2	24549**	379.5	5.55**	7.59**	25.80**	0.00001	0.00001	0.00001
N × P × Year	6	3188.1**	720.4	1.31**	0.880**	3.71**	0.00001	0.00001	0.00001
خطا Erorr	44	537.2	1875.6	0.359	0.249	0.686	0.011	0.043	0.074
ضریب تغییرات (CV)		3.38	4.19	8.03	4.52	4.47	7.73	3.38	3.62

GY: Grain Yield (عملکرد دانه)، SY: Straw Yield (عملکرد کاه)، SNU: Straw Nitrogen Uptake (جذب نیتروژن کاه)، GNU: Grain Nitrogen Uptake (جذب نیتروژن دانه)، TNU: Total Nitrogen Uptake (جذب نیتروژن کل)، SPU: Straw Phosphorus Uptake (جذب فسفر کاه)، GPU: Grain Phosphorus Uptake (جذب فسفر دانه)، TPU: Total Phosphorus Uptake (جذب فسفر کل).

ns، * و ** به‌ترتیب بیانگر نبود اثر معنی‌دار، و آثار معنی‌دار در سطوح احتمال ۵ و ۱ درصد است.

ns, * and ** denote non-significantt effect, and significant effects at the 5 and 1% probability levels, respectively.

جدول ۳. مقایسه میانگین اثر مقدار کاربرد نیتروژن (N) و فسفر (P) بر عملکرد و جذب نیتروژن و فسفر در کاه و دانه رتون برنج (رقم هاشمی) در دو سال زراعی.

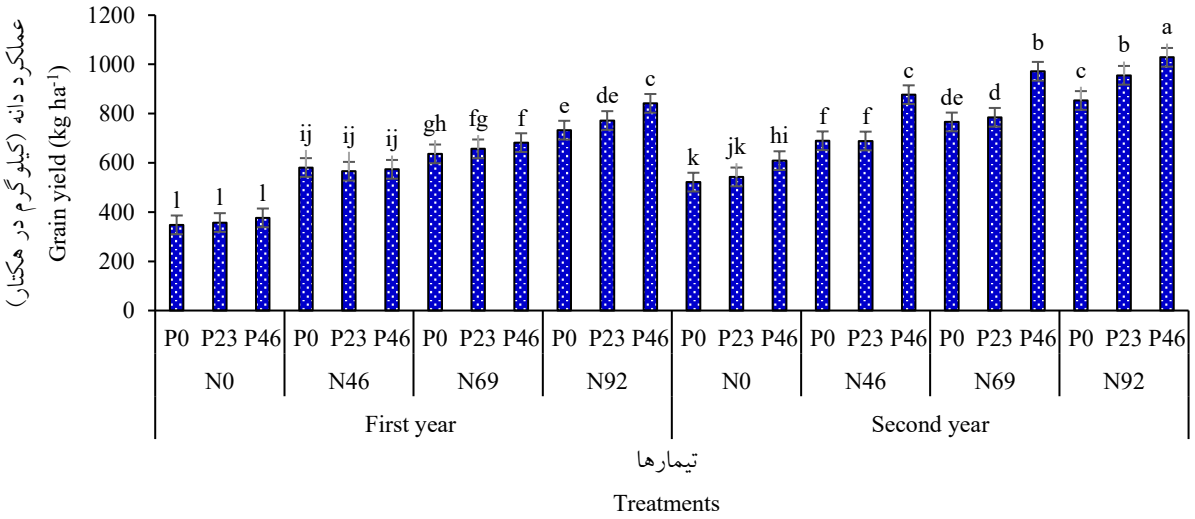
Table 3. Mean comparisons for the effect of nitrogen (N) and phosphorus (P) application rates on yield and nitrogen and phosphorus uptake in straw and grain of rice ratoon (Hashemi cultivar) in two crop years.

تیمارها Treatments		GY	SY	SNU	GNU	TNU	SPU	GPU	TPU
		($kg\ ha^{-1}$)							
N	0	459.1d	881.3d	4.07d	7.13d	11.21d	0.671d	3.83d	4.51d
	46	662.6c	947.9c	6.77c	10.45c	17.22c	1.41c	6.04c	7.45c
	69	749.8b	1041.9b	8.37b	12.36b	10.74b	1.54b	6.89b	8.41b
	92	864.2a	1263.4a	10.65a	14.18a	24.83a	1.82a	8.13a	9.95a
P	0	741.2c	1001.0b	6.97b	10.38b	17.35c	1.25c	5.99c	7.25c
	23	665.6b	1044.9a	7.27b	10.67b	17.94b	1.36b	6.17b	7.54b
	46	744.9a	1056.8a	8.15a	12.07a	20.22a	1.45a	6.49a	7.94a

GY: Grain Yield (عملکرد دانه)، SY: Straw Yield (عملکرد کاه)، SNU: Straw Nitrogen Uptake (جذب نیتروژن کاه)، GNU: Grain Nitrogen Uptake (جذب نیتروژن دانه)، TNU: Total Nitrogen Uptake (جذب نیتروژن کل)، SPU: Straw Phosphorus Uptake (جذب فسفر کاه)، GPU: Grain Phosphorus Uptake (جذب فسفر دانه)، TPU: Total Phosphorus Uptake (جذب فسفر کل).

در هر ستون و در هر گروه، میانگین‌هایی که دارای حروف مشترک هستند بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنی‌دار ندارند.

In each column and each group, numbers with similar letters are not significantly different (Duncan, $p < 0.05$).



شکل ۱. مقایسه میانگین اثر برهمکنش سال × نیتروژن × فسفر بر عملکرد دانه در محصول رتون برنج (رقم هاشمی) در شرایط مزرعه. ستون‌هایی که دارای حروف مشترک هستند بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنی‌دار ندارند.

Fig. 1. Mean comparisons for the interaction effect of year × nitrogen × phosphorus on grain yield in rice ratoon (Hashemi cultivar) crop under field conditions. Bars with similar letters are not significantly different (Duncan, $p < 0.05$).

تیمار فسفر P_{46} با ۷۴۴/۹ و ۱۰۵۶/۸ کیلوگرم در هکتار بیشترین عملکرد دانه و کاه رتون را داشت. مقایسه میانگین اثر برهمکنش سال × نیتروژن × فسفر نشان داد که در سال دوم و تیمارهای نیتروژن N_{92} و فسفر P_{46}، بیشترین عملکرد دانه مشاهده شد که نسبت به تیمار شاهد نیتروژن (N_0) و فسفر (P_0) در همان سال ۹۷/۳۱ درصد افزایش نشان داد (شکل ۱). این نتایج اهمیت مصرف کودهای نیتروژن و فسفر در افزایش عملکرد رتون را نشان می‌دهد. پژوهش‌های دیگر هم گزارش دادند که آثار برهمکنش کودهای نیتروژنه و فسفره می‌تواند بر رشد گیاه و عملکرد دانه برنج تأثیر بگذارد (Duncan et al., 2018; Du et al., 2022; Liu et al., 2016; Metho et al., 1997).

در میان شیوه‌های مدیریت محصول رتون، کود نیتروژن به‌ویژه برای رشد و توسعه محصول بسیار مهم است. افزایش جذب نیتروژن، به‌ویژه در شرایط مصرف زیاد کود نیتروژن، می‌تواند منجر به افزایش زیست‌توده و پتانسیل تولید سیستم شود. با این وجود، نیتروژن مصرفی تأثیر ماندگاری بر رشد و عملکرد برنج رتون دارد (Lin, 2019). کاربرد مناسب نیتروژن می‌تواند سرعت باززایی را بهبود بخشیده و تعداد خوشه‌های مؤثر برنج رتون را افزایش دهد (Qi et al., 2024). اما کاربرد بیش از حد نیتروژن می‌تواند مانع از فتوسنتز و توانایی جذب نیتروژن شده و منجر به هدرروی نیتروژن به محیط زیست (مانند انتشار اکسید نیتروژن و آبشویی نیترات) شود (Bilotto et al., 2021). پژوهش‌های مختلف نشان دادند که عملکرد بیشتر رتون در درجه اول تابعی از تعداد خوشه‌های مؤثر است که به‌طور مثبت با تعداد پنجه‌های ساقه باقی‌مانده کشت اول و میزان باززایی مرتبط است (Wang et al., 2020; Zhang et al., 2023). همچنین وضعیت مورفولوژیک و محتوای عناصر غذایی بیشتر کاه باقی‌مانده از کشت اول مانند سطح نیتروژن و کربوهیدرات‌های غیرساختاری، می‌تواند رشد پنجه‌های باززایی‌شده را بهبود بخشیده و تعداد، طول و وزن تازه جوانه باززایی‌شده را در رتون افزایش دهد (Qi et al., 2024; Zhang et al., 2023). در پژوهشی مشخص شد که کاربرد کود نیتروژن در تمام سطوح مصرفی منجر به افزایش عملکرد شلتوک در مقایسه با شاهد شد اگرچه بیشترین عملکرد دانه با مصرف نیتروژن در مقادیر ۵۰ و ۷۵ کیلوگرم در هکتار به‌دست آمد. مصرف زیاد کود نیتروژن می‌تواند سبب افزایش رشد قسمت‌های رویشی شده، بروز خوابیدگی را در گیاه برنج

افزایش داده و در نتیجه عملکرد را کاهش دهد (Sheikh-Nazari et al., 2022). کود فسفر با افزایش تعداد خوشه، تعداد دانه در هر خوشه و سرعت تشکیل دانه، اجزای عملکرد برنج را بهبود می‌بخشد (Wei et al., 2018). در پژوهش Luo et al. (2026) مشاهده شد کاربرد فسفر به‌طور قابل‌توجهی عملکرد دانه برنج را ۴/۹ تا ۱۷/۷ درصد افزایش داد. نکته قابل‌توجه این است که افزایش عملکرد در درجه اول به‌دلیل افزایش ۱۱/۳ تا ۲۶/۸ درصدی تعداد خوشه بود که نشان‌دهنده بهبود پنجه‌زنی است.

جذب نیتروژن و فسفر در دانه و کاه

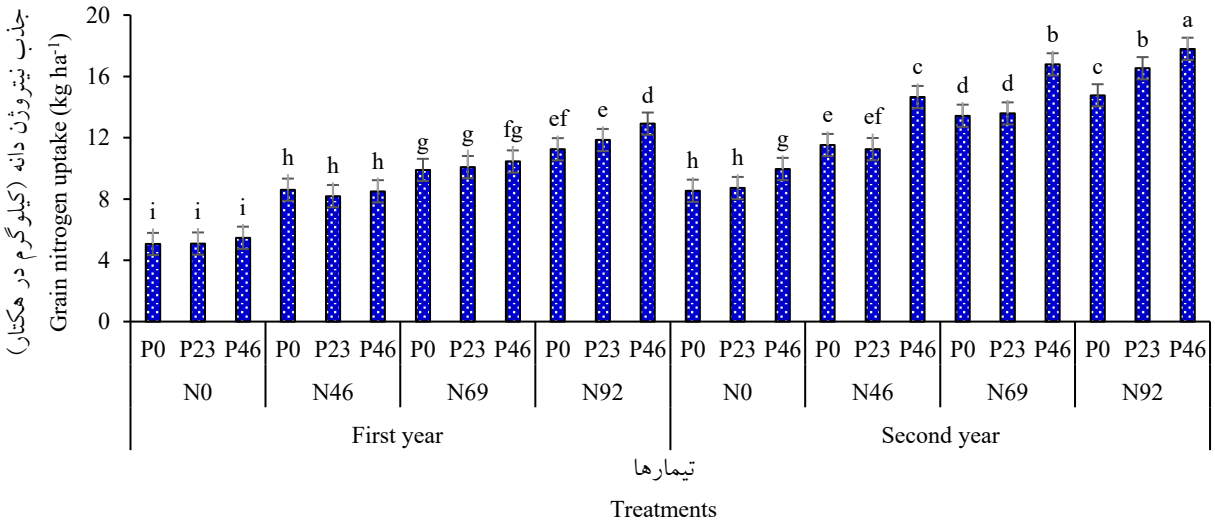
نتایج تجزیه واریانس (جدول ۲) نشان داد که اثر اصلی تیمارهای نیتروژن و فسفر، اثر سال، و آثار برهمکنش نیتروژن × فسفر، سال × فسفر و سال × نیتروژن × فسفر بر میزان جذب نیتروژن در دانه و کاه رتون در سطح احتمال یک درصد معنی‌داری بود. اثر اصلی تیمارهای نیتروژن و فسفر و اثر برهمکنش نیتروژن × فسفر تنها بر میزان جذب فسفر دانه و کاه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. مقایسه میانگین اثر تیمار نیتروژن بر میزان جذب نیتروژن در دانه و کاه نشان داد که تیمار N_{92} بیشترین میزان جذب نیتروژن در دانه و کاه داشت و نسبت به تیمار شاهد (N_0) به‌ترتیب ۹۸/۸ و ۱۶۰ درصد افزایش یافت. جذب فسفر هم در این تیمار بیشترین مقدار بود که میزان فسفر در دانه و کاه نسبت به تیمار شاهد به‌ترتیب ۱/۱۲ و ۱/۷۱ برابر افزایش داشت. در تیمار فسفر بیشترین میزان جذب نیتروژن و فسفر دانه و کاه در تیمار P_{46} رخ داد به‌طوری‌که جذب فسفر در این تیمار نسبت به تیمار شاهد در دانه و کاه به‌ترتیب ۸/۳ و ۱۶/۰ درصد افزایش یافت. مقایسه میانگین اثر برهمکنش سال × نیتروژن × فسفر بر میزان جذب نیتروژن در دانه و کاه (شکل‌های ۲ و ۳) نشان می‌دهد که تیمار نیتروژن ۹۲ (N_{92}) و فسفر ۴۶ کیلوگرم در هکتار (P_{46}) در سال دوم آزمایش بیشترین میزان جذب نیتروژن در دانه و کاه را داشتند.

تجمع عناصر غذایی ساقه و برگ در مرحله خوشه‌دهی معمولاً به بیشترین مقدار می‌رسد. پس از برداشت برنج فصل اول، تجمع نیتروژن، فسفر و پتاسیم در کلش‌ها روند کاهشی داشته و تجمع عناصر در ساقه و برگ برنج رتون ابتدا افزایش یافته و سپس کاهش می‌یابد. از مرحله خوشه‌دهی تا مرحله رسیدگی، برای انتقال نیتروژن، تمایل به برگ بیشتر از ساقه و بیشتر از ریشه، برای انتقال فسفر، تمایل به ساقه بیشتر از ریشه و بیشتر از برگ، و برای انتقال پتاسیم، تمایل به ریشه بیشتر از برگ و بیشتر از ساقه است (Wang et al., 2018). میزان جذب نیتروژن در طول مرحله جوانه‌زنی تا آبستنی برنج زیاد بوده و تأمین کافی نیتروژن در این مرحله حیاتی، نقش کلیدی در بهبود عملکرد برنج ایفا می‌کند (Liu et al., 2016). تجمع و انتقال نیتروژن پیش از گل‌دهی در بهبود عملکرد دانه بسیار مهم است، زیرا بیشتر نیتروژن دانه از کاه یا ساقه به دانه منتقل می‌شود. تقریباً ۷۰ درصد از نیتروژن جذب‌شده توسط کاه به دانه منتقل می‌شود که در نتیجه آن، محتوای نیتروژن دانه در طول رسیدن گیاه در سطح مشخصی حفظ می‌شود (Yang et al., 2011).

تأثیر مصرف کود نیتروژن و فسفر بر کارایی نیتروژن در رتون

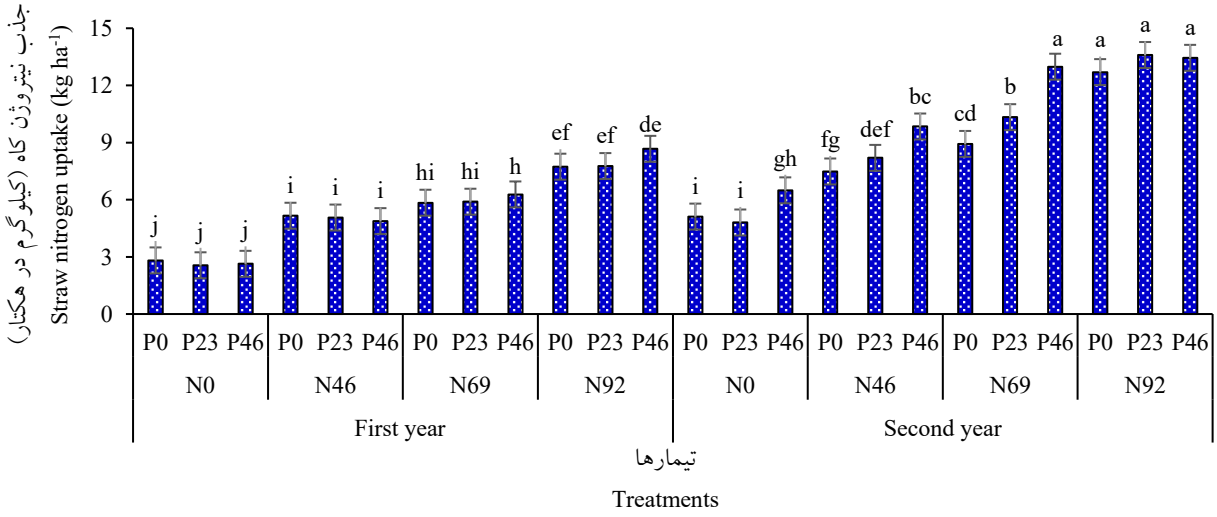
بر اساس نتایج تجزیه واریانس مربوط به کارایی‌های نیتروژن (جدول ۴)، اثر ساده نیتروژن و فسفر، اثر برهمکنش نیتروژن × فسفر، اثر سال × نیتروژن و اثر برهمکنش سال × نیتروژن × فسفر بر بهره‌وری نسبی نیتروژن (RPF_N)، کارایی زراعی نیتروژن (AE_N) و کارایی بازیافت نیتروژن (RE_N) در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. اثر ساده نیتروژن و سال بر کارایی فیزیولوژیک (PE_N) و کارایی درونی نیتروژن (IE_N) در سطح یک درصد معنی‌دار بود. همان طور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، کارایی بازیافت نیتروژن تحت تأثیر اثر سال قرار نگرفت. همچنین کارایی فیزیولوژیک و کارایی درون نیتروژن تحت تأثیر برهمکنش سال × نیتروژن × فسفر قرار نگرفتند. اثر ساده فسفر و اثر برهمکنش نیتروژن × فسفر نیز بر کارایی درونی نیتروژن مشاهده نشد (جدول ۴).

مقایسه میانگین داده‌ها (شکل ۴) نشان داد میزان بهره‌وری نسبی نیتروژن در سال دوم بیشتر از سال اول بود. در هر دو سال،



شکل ۲. مقایسه میانگین اثر برهمکنش سال × نیتروژن × فسفر بر جذب نیتروژن دانه در محصول رتون برنج (رقم هاشمی) در شرایط مزرعه.
ستون‌هایی که دارای حروف مشترک هستند بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنی‌دار ندارند.

Fig. 2. Mean comparisons for the interaction effect of year × nitrogen × phosphorus on grain nitrogen uptake in rice ratoon (Hashemi cultivar) crop under field conditions. Bars with similar letters are not significantly different (Duncan, $p < 0.05$).



شکل ۳. مقایسه میانگین اثر برهمکنش سال × نیتروژن × فسفر بر جذب نیتروژن کاه در محصول رتون برنج (رقم هاشمی) در شرایط مزرعه.
ستون‌هایی که دارای حروف مشترک هستند بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنی‌دار ندارند.

Fig. 3. Mean comparisons for the interaction effect of year × nitrogen × phosphorus on straw nitrogen uptake in rice (Hashemi cultivar) crop under field conditions. Bars with similar letters are not significantly different (Duncan, $p < 0.05$).

تیمار نیتروژن ۴۶ (N_{46}) نسبت به سطوح دیگر نیتروژن و در سال دوم تیمار فسفر ۴۶ (P_{46}) نسبت به سطوح دیگر فسفر میزان بهره‌وری نسبی نیتروژن بیشتری داشتند. نتایج نشان داد که با افزایش مصرف فسفر در سطوح مختلف نیتروژن مصرف‌شده در هر دو سال، میزان بهره‌وری نسبی نیتروژن افزایش یافته است. نتایج نشان داد که با افزایش سطح نیتروژن (سطوح N_{69} و N_{92}) به‌عبارتی مصرف بیشتر نیتروژن، بهره‌وری نسبی نیتروژن را در محصول رتون برنج کاهش داد. بهره‌وری نسبی نیتروژن،

جدول ۴. تجزیه واریانس اثر مقدار کاربرد نیتروژن (N) و فسفر (P) بر شاخص‌های کارایی مصرف نیتروژن در کشت رتون برنج (رقم هاشمی) در دو سال زراعی.

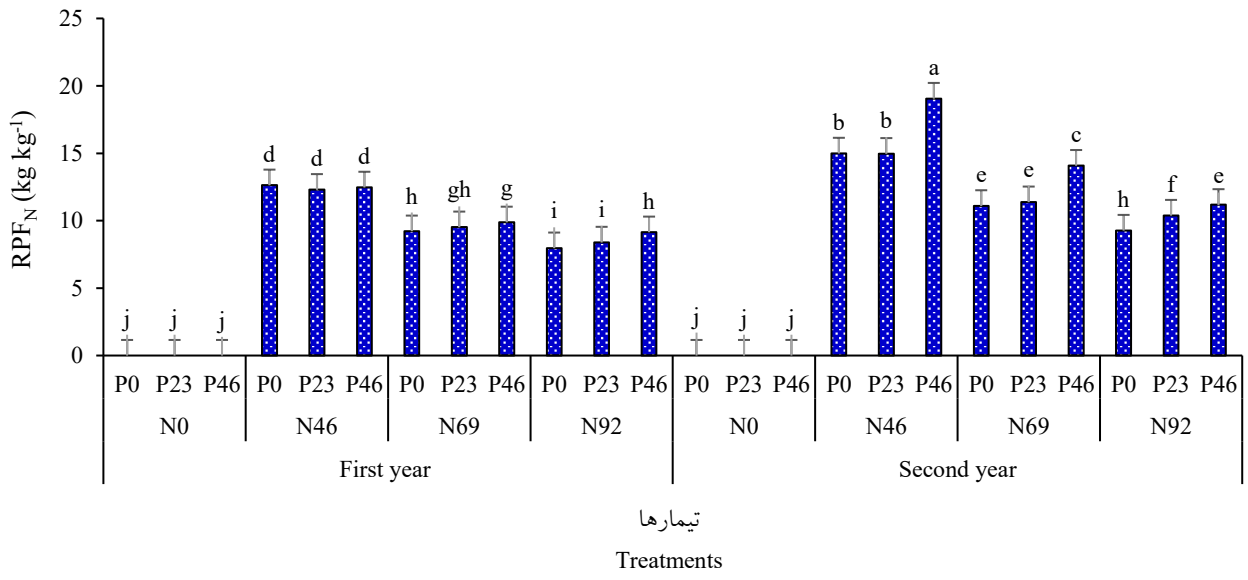
Table 4. Variance analysis of the effect of nitrogen (N) and phosphorus (P) application rates on nitrogen use efficiency indices in rice ratoon (Hashemi cultivar) cultivation in two crop years.

میانگین مربعات (Mean squares)					درجه آزادی	منابع تغییر
IE_N	PE_N	RE_N	AE_N	RPF_N	df	Sources of variation
10.92	22.50	0.002	0.733	0.188	2	بلوک Block
152.4**	4463.6**	0.069**	66.82**	680.3**	3	نیتروژن N
2.09	18.36**	0.011**	11.56**	12.21**	2	فسفر P
928.0**	755.1**	0.00001	8.83**	77.46**	1	سال Year
2.85	10.98**	0.002**	1.83**	1.84**	6	N × P
0.498	96.75**	0.001**	1.31**	11.92**	3	N × Year
2.68	10.50*	0.005**	6.32**	5.85**	2	P × Year
2.21	5.79	0.002**	2.01**	1.82**	6	N × P × Year
1.76	3.01	0.00001	0.143	0.082	44	Erorr
3.45	7.41	10.98	13.12	3.31	ضریب تغییرات (CV)	

RPF_N: Relative Nitrogen Productivity Factor (عامل بهره‌وری نسبی نیتروژن)، AE_N: Agronomic Efficiency of Nitrogen (کارایی زراعی نیتروژن)، RE_N: Nitrogen Recovery Efficiency (کارایی بازیافت نیتروژن)، PE_N: Physiological Efficiency (کارایی فیزیولوژیک)، IE_N: Internal Nitrogen Efficiency (کارایی درونی نیتروژن).

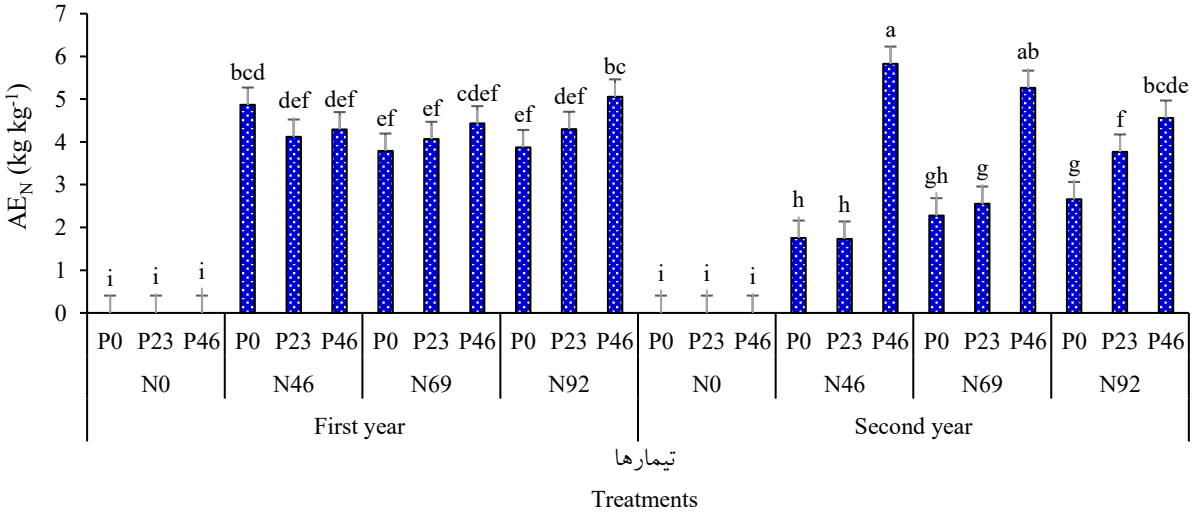
ns، * و ** به‌ترتیب بیانگر نبود اثر معنی‌دار، و آثار معنی‌دار در سطوح احتمال ۵ و ۱ درصد است.

ns, * and ** denote non-significantt effect, and significant effects at the 5 and 1% probability levels, respectively.



شکل ۴. مقایسه میانگین اثر برهمکنش سال × نیتروژن × فسفر بر عامل بهره‌وری نسبی نیتروژن (RPF_N) در محصول رتون برنج (رقم هاشمی). ستون‌هایی که دارای حروف مشترک هستند بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنی‌دار ندارند.

Fig. 4. Mean comparisons for the interaction effect of year × nitrogen × phosphorus on the relative nitrogen productivity factor (RPF_N) in rice ratoon (Hashemi cultivar) crop. Bars with similar letters are not significantly different (Duncan, $p < 0.05$).



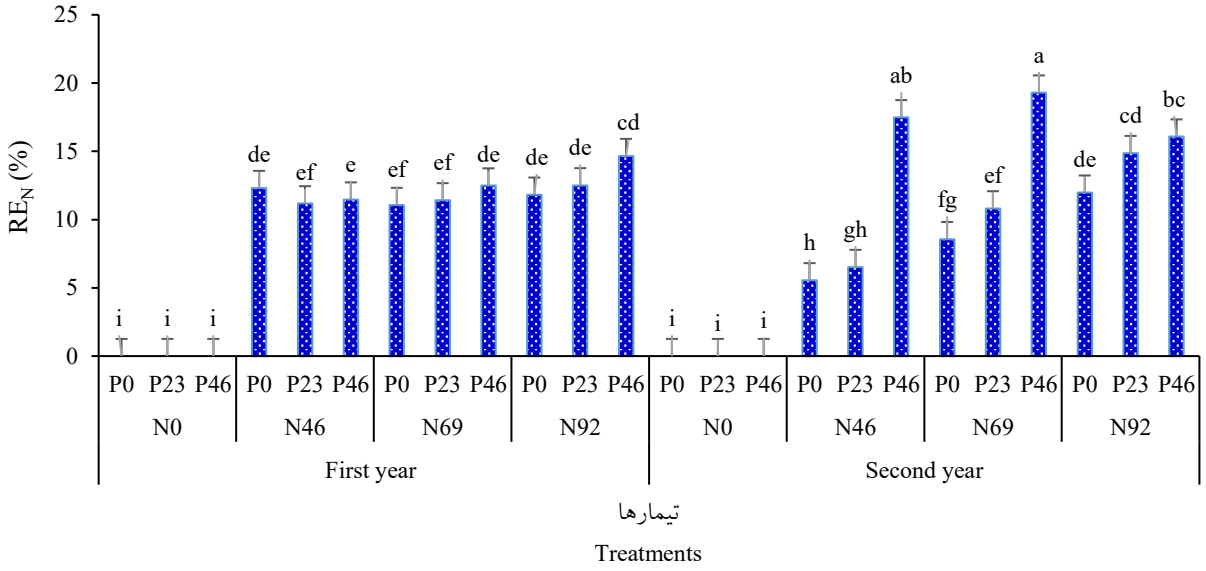
شکل ۵. مقایسه میانگین اثر برهمکنش سال × نیتروژن × فسفر بر کارایی زراعی کود نیتروژن (AE_N) در محصول رتون برنج (رقم هاشمی). ستون‌هایی که دارای حروف مشترک هستند بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنی‌دار ندارند.

Fig. 5. Mean comparisons for the interaction effect of year × nitrogen × phosphorus on the agronomic efficiency of nitrogen fertilizer (AE_N) in rice ratoon (Hashemi cultivar) crop. Bars with similar letters are not significantly different (Duncan, $p < 0.05$).

ساده‌ترین معیار برای بیان کارایی مصرف نیتروژن است که افزایش عملکرد محصول به‌ازای هر واحد نیتروژن کاربردی را توصیف می‌کند. بهره‌وری نسبی نیتروژن را می‌توان با افزایش میزان جذب نیتروژن و استفاده از منابع نیتروژن خاک و افزایش کارایی زراعی نیتروژن مصرف‌شده افزایش داد (Mohammadian et al., 2019). در مزارع برنج، میزان بهره‌وری نسبی نیتروژن بین ۴۰ تا ۵۰ کیلوگرم دانه در کیلوگرم کود نیتروژن مصرفی گزارش شده است اما می‌تواند از ۱۵ تا ۱۰۰ کیلوگرم در کیلوگرم نوسان داشته باشد. با مدیریت مناسب زراعی و مصرف عناصر غذایی، مقدار عامل بهروری نسبی نیتروژن باید بیشتر از ۵۰ کیلوگرم در کیلوگرم نیتروژن مصرفی باشد (Dobermann and Fairhurst, 2000).

مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که کارایی زراعی کود نیتروژن در سال دوم بیشتر از سال اول بود (شکل ۵). در سال دوم کارایی زراعی در تیمار N_{46} و سطح فسفر P_{46} بیشتر از بقیه تیمارها بود و در سال دوم در تیمار N_{92} و سطح فسفر P_{46} بیشتر از بقیه تیمارها بود. افزایش نسبی کارایی زراعی کود نیتروژن با افزایش مصرف فسفر مشاهده شد ولی با افزایش مصرف نیتروژن در سال دوم در تیمار N_{46}، کاهش میزان کارایی زراعی کود نیتروژن در رتون مشاهده شد. کارایی زراعی نیتروژن (AE_N)، رایج‌ترین شاخص مورد استفاده توسط پژوهشگران کشاورزی است؛ این شاخص بیانگر افزایش واحد در عملکرد اقتصادی به‌ازای هر واحد کود نیتروژن اعمال‌شده است. کاهش کارایی زراعی نیتروژن با افزایش مقدار کود نیتروژن توسط Tayefe et al. (2011) گزارش شد. در پژوهشی گزارش شد که عملکرد برنج حدود ۵ تا ۱۰ کیلوگرم برای هر کیلوگرم کود نیتروژن مصرف‌شده با شیوه‌های مدیریت کودی کشاورزان افزایش می‌یابد (Peng et al., 2010). کارایی زراعی نیتروژن در فصل خشک در مزارع کشاورزان در فیلیپین، ۱۵ تا ۱۸ کیلوگرم در کیلوگرم نیتروژن گزارش شد (Cassman et al., 2002).

مقایسه میانگین داده‌ها (شکل ۶) نشان داد که میزان کارایی بازیافت نیتروژن در سال اول آزمایش، در تیمارهای N_{92} و P_{46} بیشتر بود. در سال دوم با افزایش نیتروژن تا مقدار ۶۹ کیلوگرم نیتروژن در هکتار (N_{69})، کارایی بازیافت افزایش یافت که با افزایش مصرف فسفر، بر میزان این روند افزوده شد. در تیمار N_{92}، کارایی بازیافت نیتروژن کاهش یافت. کارایی بازیافت



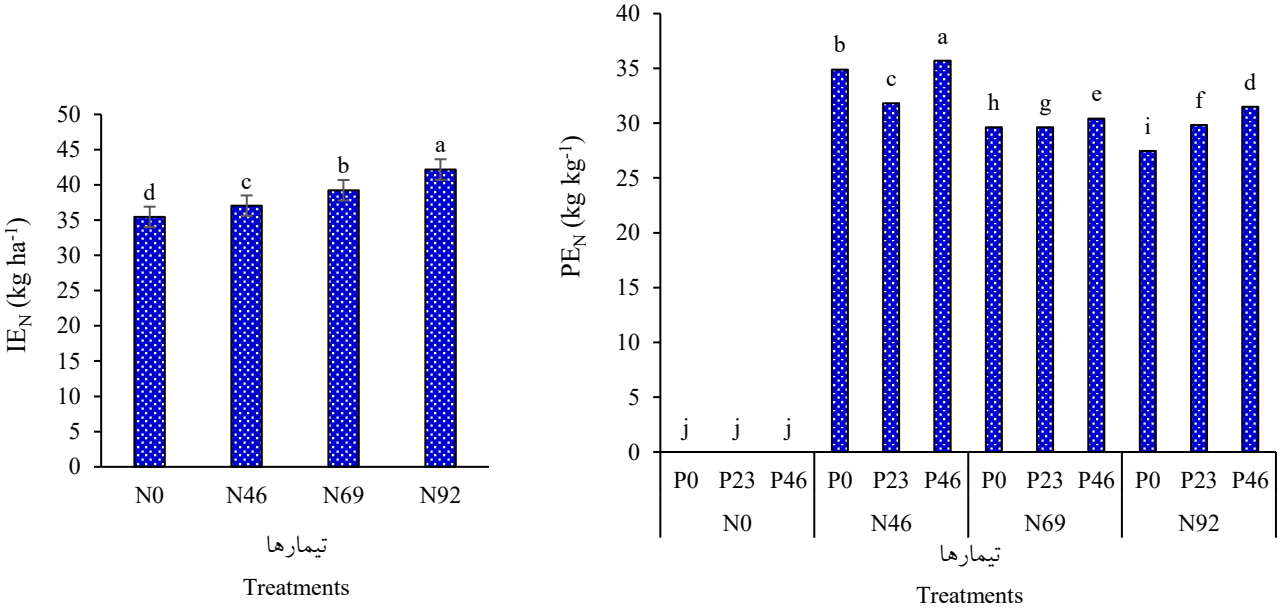
شکل ۶. مقایسه میانگین اثر برهمکنش سال × نیتروژن × فسفر بر کارایی بازیافت نیتروژن (RE_N) در محصول رتون برنج (رقم هاشمی). ستون‌هایی که دارای حروف مشترک هستند بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنی‌دار ندارند.

Fig. 6. Mean comparisons for the interaction effect of year × nitrogen × phosphorus on nitrogen recovery efficiency (RE_N) in rice ratoon (Hashemi cultivar) crop. Bars with similar letters are not significantly different (Duncan, $p < 0.05$).

نیتروژن را می‌توان با تفاوت در جذب نیتروژن (زیتوده هوایی محصول) در تیمار کودی و شاهد نسبت به مقدار نیتروژن اعمال‌شده توصیف کرد. با افزایش مصرف کودهای نیتروژنی، هدررفت و آبشویی و امکان خروج آن از منطقه جذب ریشه‌ها بیشتر خواهد شد (Rabiei et al., 2022). کارایی بازیافت نیتروژن در مدیریت مرسوم منطقه، به‌ندرت بیش از ۵۰ درصد است. کارایی بازیافت کود نیتروژن با شیوه مدیریت کشاورزان در آزمایش‌های مزارع شالیزاری آن‌ها، ۱۸ درصد گزارش شد (Wang et al., 2001). همچنین کارایی بازیافت کود نیتروژن کشاورزان در چهار استان چین، ۲۰ تا ۳۰ درصد گزارش شد (Peng et al., 2006).

مقایسه میانگین اثر برهمکنش نیتروژن × فسفر بر کارایی فیزیولوژیک نیتروژن (شکل ۷) نشان داد که با مصرف ۴۶ کیلوگرم نیتروژن در هکتار (N_{46}) و سطح فسفر P_{46}، بیشترین کارایی فیزیولوژیک نیتروژن در رتون ثبت شد. کارایی فیزیولوژیک (PE_N)، به‌عنوان افزایش عملکرد در رابطه با افزایش جذب نیتروژن در زیتوده شاخساره محصول تعریف می‌شود؛ به عبارت دیگر این شاخص بیانگر تبدیل مقدار مشخصی از عنصر غذایی کودی جذب‌شده به عملکرد اقتصادی است. کارایی فیزیولوژیک، به ویژگی‌های ژنوتیپی مانند شاخص برداشت و کارایی مصرف درونی عنصر غذایی بستگی دارد که خود تحت تأثیر مدیریت زراعی و مدیریت تغذیه‌ای نیز قرار می‌گیرد (Mohammadian et al., 2019). کارایی فیزیولوژیک کود نیتروژن بسته به دیررس یا متوسطرس بودن رقم برنج بین ۳۵ تا ۹۴ می‌تواند متغیر باشد، اما کارایی فیزیولوژیک در برخی از ارقام تحت تأثیر مقادیر نیتروژن قرار نمی‌گیرد (Rabiei et al., 2022).

کارایی درونی نیتروژن به‌طور معنی دار تنها تحت تأثیر مصرف نیتروژن قرار گرفت. نتایج مقایسه میانگین (شکل ۷) نشان داد که بیشترین کارایی درونی نیتروژن مربوط به تیمار N_{92} بود که نسبت به تیمار شاهد (N_0) ۱۸/۹۸ درصد افزایش داشت. کارایی استفاده درونی نیتروژن (IE_N)، یک معیار ساده از کارایی مصرف نیتروژن بر اساس عملکرد محصول و جذب نیتروژن است. کارایی استفاده درونی نیتروژن به شرایط آب‌وهوایی، رقم محصول، شاخص برداشت، برهمکنش با سایر عناصر غذایی و عوامل دیگر مؤثر بر گل‌دهی و پرشدن دانه گیاه بستگی دارد. در



شکل ۷. مقایسه میانگین اثر ساده نیتروژن بر کارایی درونی نیتروژن (IE_N) و اثر برهمکنش نیتروژن × فسفر بر کارایی فیزیولوژیک نیتروژن (PE_N) در محصول رتون برنج (رقم هاشمی). ستون‌هایی که دارای حروف مشترک هستند بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنی‌دار ندارند.

Fig. 7. Mean comparisons for the simple effect of nitrogen on internal nitrogen efficiency (IE_N) and the interaction effect of nitrogen × phosphorus on physiological nitrogen efficiency (PE_N) in rice ratoon (Hashemi cultivar) yield. Bars with similar letters are not significantly different (Duncan, $p < 0.05$).

مزارع کشاورزان، شاخص کارایی درونی نیتروژن در دامنه ۵۰ تا ۶۰ کیلوگرم بر کیلوگرم گزارش شده است (Dobermann and Fairhurst, 2000). متغیرهای اقلیمی مانند دمای محیط، شدت نور خورشیدی، میزان بارندگی و رطوبت نسبی از عوامل بیرونی مهم و مؤثر بر سلامت محصول و همچنین تقاضای آن برای نیتروژن هستند. چگونگی تأثیر متغیرهای ذکرشده و برهمکنش آن‌ها بر عملکرد هر محصول یا توالی کشت، تا حد زیادی به شرایط آب و هوایی کشاورزی منطقه‌ای که محصول در آن کشت می‌شود، بستگی دارد (Yadav et al., 2017).

روش کشت رتون دارای کارایی اقتصادی بیشتر بوده و کیفیت برنج بهتری را با مزایای صرفه‌جویی چندگانه مانند صرفه‌جویی در منابع بذر، نیروی کار و آب همراه با کاهش ۳۰ تا ۵۰ درصدی در مصرف کود و کاهش ۴۰ درصدی در استفاده از آفت‌کش‌ها به همراه خواهد داشت. در نهایت، همه این جنبه‌های مفید می‌توانند منجر به کاهش هزینه‌ها، افزایش کارایی و در نتیجه افزایش درآمد خالص کشاورز شوند. بنابراین، توسعه و گسترش فناوری راتونینگ برنج به مناطق مناسب کاشت در کشور، اهمیت مثبتی برای تضمین افزایش مداوم تولید غلات و افزایش بهره‌وری اقتصادی کشت محصولات غذایی برای افزایش درآمد کشاورز دارد (Lin, 2019).

نتیجه‌گیری

مدیریت کارآمد نیتروژن در سیستم‌های مدرن تولید محصولات کشاورزی برای بهبود پایداری درازمدت ضروری است. مدیریت تلفیقی نیتروژن و کوددهی متوازن نه تنها عملکرد رتون برنج، بلکه کارایی مصرف نیتروژن سیستم تولید را نیز بهبود می‌بخشد. نتایج پژوهش حاضر نشان داد برهمکنش نیتروژن و فسفر باعث افزایش عملکرد دانه و کارایی مصرف نیتروژن شد که با افزایش جذب نیتروژن همراه بود. نتایج نشان داد که با افزایش مصرف نیتروژن و فسفر، میزان عملکرد دانه و کاه، جذب نیتروژن و فسفر

در دانه و کاه در محصول رتون برنج افزایش یافت ولی کارایی بهره‌وری نسبی نیتروژن و کارایی زراعی نیتروژن با مصرف بیش از ۴۶ کیلوگرم نیتروژن در هکتار کاهش یافت که با افزایش مقدار کوددهی فسفر، افزایشی بوده است. در دو سال آزمایش، پاسخ گیاه به مدیریت مصرف کود و کارایی مصرف نیتروژن تفاوت معنی‌دار داشت که شاید به تغییرات محیطی و موارد مدیریتی در کشت اول برنج مربوط باشد. پیشنهاد می‌شود مقادیر مختلف کاربرد کودهای نیتروژن و فسفر با روش‌ها و زمان‌های مختلف مصرف، تحت شرایط مختلف اقلیمی و خاکی آزمایش شوند تا بهره‌وری سیستم‌های تولید رتون برنج بهینه شود.

تشکر و سپاسگزاری

این مقاله به‌عنوان بخشی از طرح تحقیقاتی به شماره مصوب ۹۷۰۲۸۷ با حمایت موسسه تحقیقات برنج کشور- معاونت مازندران منتشر شده است. نویسندگان از همه شرکت‌کنندگان در اجرای این پژوهش تشکر می‌کنند.

تضاد منافع

نویسندگان مقاله اذعان دارند هیچ‌گونه تضاد منافعی با شخص، شرکت یا سازمانی برای این پژوهش ندارند.

منابع مورد استفاده

References

1. Bahar, F.A., De Datta S.K., 1977. Prospects of increasing tropical rice production through ratooning. Agron. J. 69, 53–540. https://doi.org/10.2134/agronj1977.00021962006900040003x.
2. Bilotto, F., Harrison, M.T., Migliorati, M.D.A. Christie, K.M., Rowlings, D.W., Grace, P.R., Smith, A.P., Rawnsley, R.P., Thorburn, P.J., Eckard, R.J., 2021. Can seasonal soil N mineralisation trends be leveraged to enhance pasture growth? Sci. Total Environ. 772, 145031. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145031.
3. Cao, Y.S., Tian, Y.H., Yin, B., Zhu, Z.L., 2013. Assessment of ammonia volatilization from paddy fields under crop management practices aimed to increase grain yield and N efficiency. Field Crop Res. 147, 23–31.
4. Cassman, K.G., Dobermann, A.R., Walters, D.T., 2002. Agroecosystems, nitrogen-use efficiency and nitrogen management. AMBIO: J. Human Environ. 31(2), 132–140. https://doi.org/10.1579/0044-7447-31.2.132.
5. Chu, G., Chen, S., Xu, C., Wang, D., Zhang, X., 2019. Agronomic and physiological performance of indica/japonica hybrid rice cultivar under low nitrogen conditions. Field Crop Res. 243, 1–10. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.107625.
6. Deng, Y., Teng, W., Tong, Y., Chen, X., Zou, C., 2018. Phosphorus efficiency mechanisms of two wheat cultivars as affected by a range of phosphorus levels in the field. Front. Plant Sci. 9, 1–12. https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01614.
7. Ding, L.J., Cui, H.L., Nie, S.A., Long, X.E., Duan, G.L., Zhu, Y.G., 2019. Microbiomes inhabiting rice roots and rhizosphere. FEMS Microbiol. Ecol. 95(5). https://doi.org/10.1093/femsec/fiz040.
8. Dobermann, A., Fairhurst, T., 2000. Rice: Nutrient disorders and nutrient management. IRRI (International Rice Research Institute) & PPI & PPIC (Public Policy Institute of California), Makati City & Singapore.
9. Du, M., Zhang, W., Gao, J., Liu, M., Zhou, Y., He, D., Zhao, Y., Liu, S., 2022. Improvement of root characteristics due to nitrogen, phosphorus, and potassium interactions increases rice (*Oryza sativa* L.) yield and nitrogen use efficiency. Agronomy 12(1), 23. https://doi.org/10.3390/agronomy12010023.
10. Duncan, E.G., O'Sullivan, C.A., Roper, M.M., Palta, J., Whisson, K., Peoples, M.B., 2018. Yield and nitrogen use efficiency of wheat increased with root length and biomass due to nitrogen, phosphorus, and potassium interactions. J. Plant Nutr. Soil Sci. 181, 364–373. https://doi.org/10.1002/jpln.201700376.
11. Emami, A., 1996. Plant Analysis Methods, Soil and Water Research Organization. Publication 982. 1, 128.
12. Fageria, N.K., Moreira, A., Moraes, L.A.C., Moraes, M.F., 2014. Root growth, nutrient uptake, and nutrient-use efficiency by roots of tropical legume cover crops as influenced by phosphorus fertilization. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 45, 555–569. https://doi.org/10.1080/00103624.2013.861908.
13. FAOStat. Available online: https://www.fao.org/faostat/en/ (accessed on 8 November 2021).
14. Firouzi, S., Nikkhah, A., Aminpanah, H., 2018. Rice single cropping or ratooning agro-system: which one is more environment-friendly? Environ. Sci. Pollut. Res. 25, 32246–32256. https://doi.org/10.1007/s11356-018-3076-x.
15. Godfrey, D., Hawkesford, M.J., Powers, S.J., Millar, S., Shewry, P.R., 2010. Effects of crop nutrition on wheat grain composition and end use quality. J. Agric. Food Chem. 58, 3012–3021. https://doi.org/10.1021/jf9040645.
16. Hosseinpour, S., Moghadam, H., Pirdashti, H., 2021. Evaluation of yield and yield components of rice cv. 'Tarom Hashemi' in system of rice intensification (SRI) and conventional systems. J. Agric. Sci. Sustain. Produc. 31(3), 329–340. https://doi.org/10.22034/saps.2021.36888.2376. (In Persian with English abstract)

17. Hu, R.F., Cao, J.M., Huang, J.K., Peng, S.B., Huang, J.L., Zhong, X.H., 2007. Farmer participatory testing of standard and modified site-specific nitrogen management for irrigated rice in China. Agric. Syst. 94 (2), 331–40.
18. IRRI, 2013. Standard Evaluation System (SES) for Rice. 5th Edition, Manila, Philippines.
19. Lin, W.X., 2019. Developmental status and problems of rice ratooning. J. Integrat. Agric. 18(1), 246–247. https://doi.org/10.1016/S2095-3119(19)62568-2.
20. Liu, X., Wang, H., Zhou, J., Hu, F., Zhu, D., Chen, Z., Liu, Y., 2016. Effect of N fertilization pattern on rice yield, n use efficiency and fertilizer–n fate in the Yangtze river basin, China. PLOS ONE 11(11), e0166002. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0166002.
21. Liu, Y.L., Ge, T.D., van Groenigen, K.J., Yang, Y.H., Wang, P., Cheng, K., Zhu, Z.-K., Wang, J.K., Li, Y., Guggenberger, G., 2021. Rice paddy soils are a quantitatively important carbon store according to a global synthesis. Commun. Earth Environ. 2, 154. https://doi.org/10.1038/s43247-021-00229-0.
22. Luo, L., Li, N., Sha, W., Li, Z., Chai, R., Zhang, L., Zhang, C., Siddiqued, K.H.M., 2026. Novel phosphorus fertilizers enhance rice yield, efficiency, and environmental sustainability by optimizing soil phosphorus pools in paddy fields. Soil Tillage Res. 255, 106833. https://doi.org/10.1016/j.still.2025.106833.
23. Metho, L.A., Hammes, P.S., de Beer, J.M., Groeneveld, H.T., 1997. Interaction between cultivar and soil fertility on grain yield, yield components and grain nitrogen content of wheat. South Afr. J. Plant Soil. 14, 158–164. https://doi.org/10.1080/02571862.1997.10635101.
24. Mogollon, J.M., Bouwman, A.F., Beusen, A.H.W., Lassaletta, L., van Grinsven, H.J.M., Westhoek, H., 2021. More efficient P use can avoid cropland expansion. Nat. Food. 2, 509–518. https://doi.org/10.1038/s43016-021-00303-y.
25. Mohammadian, M., Astaraie, A., Lakzian, A., Emami, H., Kavoos, M., 2019. Effect of nitrogen fertilizer source on grain yield and nitrogen use efficiency in rice (*Oryza sativa*) cv. Shiroudi. Iranian J. Crop Sci. 21(1), 82–95. https://doi.org/10.29252/abj.21.1.82. (In Persian with English abstract)
26. Nelson, D.W., Sommers, L.E., 1980. Total nitrogen analysis of soil and plant tissues. J. AOAC Int. 63, 770–778. https://doi.org/10.1093/jaoac/63.4.770.
27. Peng S., Buresh, R.J. Huang, J., Yang, J., Zou, Y., Zhong, X., Wang, G., Zhang, F., 2006. Strategies for overcoming low agronomic nitrogen use efficiency in irrigated rice systems in China. Field Crops Res. 96(1), 37–47. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2005.05.004.
28. Peng, S.B., Buresh, R.J., Huang, J.L., Zhong, X.H., Zou, Y.B., Yang, J.C., 2010. Improving nitrogen fertilization in rice by site-specific N management. A review. Agron. Sustain. Dev. 30(3), 649–56.
29. Qi, D., Chen, Y., Harrison, M., Liu, K., He, H., Ji, C., Du, K., Wang, J., Sun, Y., Yu, G., Liu, Y., Zhao, Y., Zhang, J., Zhao, Q., Peng, T., 2024. Mowing and nitrogen management guidelines for superior rice ratoon yields. Field Crops Res. 308, 109302. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2024.109302.
30. Rabiei, Z., Mohammadian Roshan, N., Sadeghi, S.M., Amiri, A., Druids, H.R., 2022. Effect of irrigation frequency and nitrogen and potassium fertilizers on yield, yield components and traits of Gilaneh variety rice. Iran. Agric. Res. 20(2), 217–228. https://doi.org/10.22067/jcesc.2022.72996.1098. (In Persian with English abstract)
31. Sheikh-Nazari S., Niknejad, Y., Fallah, H., Bararitari, D., 2022. The effect of nitrogen application along with biochar and zinc nanoparticles on quantitative and qualitative characteristics of rice (Oryza sativa L.). Iran. Agric. Res. 20(3), 349–361. https://doi.org/10.22067/jcesc.2022.75649.1150. (In Persian with English abstract)
32. Somaweera, K.A.T.N., Suriyagoda, L.D.B., Sirisena, D.N., De Costa, W.A.J.M., 2016. Accumulation and partitioning of biomass, nitrogen, phosphorus and potassium among different tissues during the life cycle of rice grown under different water management regimes. Plant Soil. 401, 169–183. https://doi.org/10.1007/s11104-015-2541-2.
33. Sun, H., Zhang, H., Powlson, D., Min, J., Shi, W., 2015. Rice production, nitrous oxide emission and ammonia volatilization as impacted by the nitrification inhibitor 2-chloro-6-(trichloromethyl)-pyridine. Field Crops Res. 173, 1–7. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2014.12.012.
34. Syers, J., Johnston, A., Curtin, D., 2008. Efficiency of soil and fertilizer P use. Reconciling changing concepts of soil P behaviour with agronomic information. FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin 18. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
35. Vaccari, D.A., 2009. P: a looming crisis. Sci. Am. 300, 42–47.
36. Wang, G., Dobermann, A., Witt, C., Sun Q. and Fu, R., 2001. Performance of site-specific nutrient management for irrigated rice in southeast China. Agron. J. 93, 869–878. https://doi.org/10.2134/agronj2001.934869x.
37. Wang, S., Mo, J., Wang, Y., You, Q., Ren, T., Cong, R., Li, X., 2018. Dry matter accumulation and N, P, K absorption and utilization in rice-ratoon rice system. Chinese J. Rice Sci. 32(1), 67–77. https://doi.org/10.16819/j.1001-7216.2018.7027.
38. Wang, W., He, A., Jiang, G., Sun, H., Jiang, M., Man, J., Nie, L., 2020. Ratoon rice technology: A green and resource-efficient way for rice production. Adv. Agron. 159, 135–167. https://doi.org/10.1016/bs.agron.2019.07.006.
39. Wei, H., Hu, L., Zhu, Y., Xu, D., Zheng, L., Chen, Z., Hu, Y., Cui, P., Guo, B., Dai, Q., 2018. Different characteristics of nutrient absorption and utilization between inbred japonica super rice and inter-sub-specific hybrid super rice. Field

Crops Res. 218, 88–96. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.01.012.
40. Yadav, M.R., Kumar, R., Parihar, C.M., Yadav, R.K., Jat, S.L., Ram, H., Jat, M.L., 2017. Strategies for improving nitrogen use efficiency: A review. Agric. Rev. 38(1). https://doi.org/10.18805/ag.v0iOF.7306.
41. Yang, M., Wei, D., Wang, Q., Wang, K., Cui, K.H., Huang, J.L., 2011. Dry matter and nitrogen partitioning in rice genotypes varying in different nitrogen harvest index. Philipp. J. Crop Sci. 36(3), 1–9.
42. Zhang, H., Zhao, Q., Wang, Z., Wang, L., Li, X., Fan, Z., Zhang, Y., Li, J., Gao, X., Shi, J., Chen, F., 2021. Effects of nitrogen fertilizer on photosynthetic characteristics, biomass, and yield of wheat under different shading conditions. Agronomy 11(10), 1989. https://doi.org/10.3390/agronomy11101989.
43. Zhang, W., Duan, X., Yao, X., Liu, Q., Xiao, R., Zhang, X., Luo, X., Tang, Y., Yao, Y., Li, J., 2023. Progress and challenges of rice ratooning technology in Chongqing municipality, China. Crop Environ. 2, 137–146. https://doi.org/10.1016/j.crope.2023.05.003.
44. Zheng, W., Liu, Z., Zhang, M., Shi, Y., Zhu, Q., Sun, Y., Zhou, H., Li, C., Yang, Y., Geng, J., 2017. Improving crop yields, nitrogen use efficiencies, and profits by using mixtures of coated controlled-released and uncoated urea in a wheat-maize system. Field Crops Res. 205, 106–115. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.02.009.
45. Zou, T., Zhang, X., Davidson, E.A., 2022. Global trends of cropland P use and sustainability challenges. Nature 611, 81–87. https://doi.org/10.1038/s41586-022-05220-z.
46. Tayefe, M., Gerayzade, A., Amiri, E., Nasrollah-Zadeh, A., 2011. Effect of nitrogen fertilizer on nitrogen uptake, nitrogen use efficiency of rice. IPCBEE, Vol. 24. IACSIT Press, Singapoore.