



The Effect of Different Planting Systems on Seedling Growth, Quantitative Characteristics and Quality of Rice (*Oryza sativa* L.) in the Nursery and Field Conditions

Omid Monemi Amiri¹, Soroor Khorramdel^{2*}, Alireza Koocheki³ and Norman Uphoff⁴

1- Department of Agrotechnology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

2- Cornell University, University of California, Berkeley

(*- Corresponding author's Email: khorrandel@um.ac.ir)

Received: 16-03-2025
Revised: 08-07-2025
Accepted: 12-07-2025
Available Online: 26-11-2025

How to cite this article:

Monemi Amiri, O., Khorramdel, S., Koocheki, A., & Uphoff, N. (2025). The effect of different planting systems on seedling growth, quantitative characteristics and quality of rice (*Oryza sativa* L.) in the nursery and field conditions. *Journal of Agroecology*, 17(3), 403-419. (In Persian with English abstract)
<https://doi.org/10.22067/agry.2025.92684.1237>

Introduction

Rice (*Oryza sativa* L.) is recognized as one of the earliest cultivated crops, providing essential nutrients for human growth and health. One of the major challenges today is the severe limitation of arable land available for rice production. This issue is particularly critical in countries with arid and semi-arid climates and limited water resources, such as Iran, where rice cultivation requires substantial amounts of water. Ecological intensification is an approach that optimally utilizes natural resources to enhance productivity while minimizing negative environmental impacts. The present study aimed to investigate the effects of various cultivation systems on the quantitative and qualitative characteristics of rice (Tarom Hashemi cultivar).

Materials and Methods

This study was conducted through two separate experiments based on a randomized complete block design with four replications, under nursery and field conditions in the city of Babol, Iran, during the 2022 and 2023 growing seasons. The experimental treatments included three cultivation systems: the System of Rice Intensification (SRI), an intermediate system, and a traditional system. In the nursery, seed densities for the ecological intensification, intermediate, and traditional systems were set at 100, 200, and 300 g.m⁻², respectively. In field conditions, treatments included transplanting ages of seedlings (20, 30, and 40 days), planting densities (25, 30 and 20 plants.m⁻²), irrigation regimes (water deficit as alternative water, saturated irrigation at the soil level, and permanent waterlogging in 10 cm above the soil), and the number of seedlings (1, 4, and 8 seedlings per hill). The traits under investigation included seedling length, stem diameter, and root diameter at the time of transplanting from the nursery to the field. Evaluated quantitative traits included growth characteristics (panicle length), yield components (percentage of unfertile grains and number of productive tillers), biological yield, paddy yield, harvest index, and quality traits (amylose content and gel consistency temperature).



Authors retain the copyright. This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

 <https://doi.org/10.22067/agry.2025.92684.1237>

Results and Discussion

The results from the nursery experiment indicated that the main effect of planting systems on stem length, stem diameter, and root diameter of seedlings was significant. Except for root length, the interaction between year and planting systems was not significant for the other traits in the nursery. In the ecological intensification system, stem diameter, stem length, and root diameter measured 24.5 cm, 4.1 mm, and 0.52 cm, respectively. In both years, the longest root length observed was 13 cm in the ecological intensification system. In contrast, the lowest values for these traits were recorded in the traditional system. The examination of quantitative traits of rice in field conditions revealed significant interaction effects between year and planting systems on the number of fertile tillers. The highest number of fertile tillers was recorded for SRI. The effect of planting systems was significant on both biological yield and paddy yield. The maximum biological yield (2.9 kg/ha) and paddy yield (0.83 kg/ha) were associated with SRI. The highest amylose content and gel consistency temperature were found in the ecological intensification system (with 22.7% and 3.7, respectively), while the traditional system exhibited the lowest values (with 21.5% and 3.0, respectively). Correlation coefficients between paddy yield with panicle length ($r = 0.98^{**}$), number of fertile tillers ($r = 0.99^{**}$), and biological yield ($r = 0.97^{**}$) were all positive and statistically significant at the 1% probability level.

Conclusion

Overall, the results of this study demonstrate that the ecological intensification system outperformed the other management systems and can be considered an effective approach in ecological management. This contributes to sustainable production, food security, and improvements in environmental characteristics.

Keywords: Amylose content, Fertile tillers, Gel consistency temperature, System of rice intensification

مقاله پژوهشی

جلد ۱۷، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۴، ص ۴۱۹-۴۰۳

تأثیر نظام‌های مختلف کشت بر رشد گیاهچه و ویژگی‌های کمی و کیفی برنج (*Oryza sativa* L.) در شرایط خزانه و مزرعه

امید منعمی امیری^۱، سرور خرم دل^{۱*}، علیرضا کوچکی^۱ و نورمن آپ هاف^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۲۱

چکیده

برنج (*Oryza sativa* L.) به‌عنوان یکی از محصولات راهبردی کشاورزی، به‌طور چشمگیری تحت تأثیر نظام‌های مختلف کشت قرار می‌گیرد و نقش حیاتی در تأمین امنیت غذایی در جهان دارد. این پژوهش با هدف بررسی اثر نظام‌های مختلف رایج و فشرده‌سازی اکولوژیک بر رشد گیاهچه، عملکرد دانه و خصوصیات کیفی برنج (رقم طارم هاشمی) طی دو آزمایش جداگانه در شرایط خزانه و مزرعه در مزرعه شخصی واقع در شهرستان بابل در دو سال زراعی ۱۴۰۰ و ۱۴۰۱ در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با چهار تکرار انجام شد. تیمارهای آزمایش در خزانه شامل سه مقدار مصرف بذر (۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ گرم در مترمربع به‌ترتیب برای نظام‌های فشرده‌سازی اکولوژیک، حدواسط و رایج) بود. در مزرعه، تیمارهای سه نظام مدیریتی شامل فشرده‌سازی اکولوژیک (یک گیاهچه در هر کپه، کم‌آبیاری به‌صورت متناوب، تراکم ۱۱ بوته در مترمربع و سن گیاهچه ۲۰ روزه)، رایج یا سنتی (هشت گیاهچه در هر کپه، آبیاری به‌صورت ۱۰ سانتی‌متر بالاتر از سطح خاک، تراکم ۲۵ بوته در مترمربع و سن گیاهچه ۴۰ روزه) و حدواسط (چهار گیاهچه در هر کپه، آبیاری به‌صورت اشباع در سطح خاک، تراکم ۱۶ بوته در مترمربع و سن گیاهچه ۳۰ روزه) بودند. نتایج آزمایش در بخش خزانه نشان داد که اثر اصلی نظام‌های کاشت بر طول و قطر طوقه و نیز قطر ریشه گیاهچه معنی‌دار بود. البته به‌غیر از عمق نفوذ ریشه، اثر متقابل سال و نظام‌های کشت بر سایر صفات غیرمعنی‌دار بود، به‌طوری‌که طول و قطر طوقه گیاهچه و قطر ریشه در نظام فشرده‌سازی اکولوژیک به‌ترتیب برابر با ۲۴/۵ سانتی-متر، ۴/۱ میلی‌متر و ۰/۵۲ میلی‌متر بودند که برتر از سایر نظام‌ها تعیین شد. در هر دو سال، بیشترین عمق نفوذ ریشه به نظام فشرده‌سازی اکولوژیک اختصاص داشت. در مقابل، کمترین مقادیر این صفات برای نظام رایج مشاهده شد. بررسی صفات کمی در شرایط مزرعه نشان داد که اثر متقابل سال و نظام‌های کشت بر تعداد پنجه بارور معنی‌دار بود، به‌طوری‌که بیشترین پنجه بارور (۲۹/۵ پنجه در بوته) برای نظام فشرده‌سازی اکولوژیک مشاهده شد. اثر نظام‌های کشت بر عملکرد زیستی و عملکرد دانه معنی‌دار بود، به‌طوری‌که بیشترین عملکرد زیستی (۲۹۰۰۰ کیلوگرم در هکتار) و عملکرد دانه (۸۳۰۰ کیلوگرم در هکتار) برای نظام فشرده‌سازی اکولوژیک مشاهده شد. همچنین بیشترین درصد آمیلوز و نمره ژلاتینه شدن در نظام فشرده‌سازی اکولوژیک (به‌ترتیب با ۲۲/۷ درصد و ۳/۷) مشاهده شد و کمترین میزان برای نظام رایج (به‌ترتیب با ۲۱/۵ درصد و ۳/۰) به دست آمد. به‌طور کلی، نتایج این آزمایش نشان داد که نظام فشرده‌سازی اکولوژیک در مقایسه با سایر نظام‌های مدیریتی، عملکرد دانه بیشتری داشت و به‌عنوان نوعی رویکرد کارآمد می‌تواند در مدیریت اکولوژیک تولید برنج مدنظر قرار گرفته که بر این اساس، به تولید پایدار، امنیت غذایی و بهبود ویژگی‌های زیست‌محیطی نیز کمک می‌کند.

واژه‌های کلیدی: تعداد پنجه بارور، درصد آمیلوز، سیستم فشرده‌سازی اکولوژیک، نمره ژلاتینه شدن

۱- گروه اگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۲- دانشگاه کروئل، دانشگاه کالیفرنیا، برکلی

(Email: khorramdel@um.ac.ir)

(*) نویسنده مسئول:

<https://doi.org/10.22067/agry.2025.92684.1237>

مقدمه

برنج (*Oryza sativa* L.) به‌عنوان یکی از نخستین گیاهان زراعی شناخته‌شده، عناصر غذایی ضروری را برای رشد و سلامت انسان فراهم می‌آورد. این گیاه با تأمین انرژی، ویتامین‌ها و مواد معدنی ضروری، نقش مهمی در تغذیه میلیاردها نفر در سراسر جهان ایفا می‌نماید (Rodríguez Coca et al., 2023). برنج به‌ویژه در تأمین امنیت غذایی نقش حیاتی دارد و به‌عنوان غذای اصلی نزدیک به نیمی از جمعیت جهان مطرح بوده و اهمیت زیادی در معیشت مردم ایفا می‌کند (Wakasa, 2024). از نظر گستردگی سطح زیرکشت، برنج پس از گندم (*Triticum aestivum* L.) در رتبه دوم، در مقایسه بین غلات قرار داشته و سهم عمده‌ای در تغذیه جهانی، به‌ویژه در ایران بر عهده دارد (Modarresi, 2023). مطابق آخرین آمار سازمان خواروبار و کشاورزی، سالانه حدود ۵۱۰ میلیون تن برنج سفید در ۱۶۷ میلیون هکتار سطح زیرکشت در دنیا تولید می‌شود (FAO, 2023). براساس آخرین آمار وزارت جهاد کشاورزی در ایران، استان‌های گیلان با ۲۲۰ هزار هکتار، مازندران با ۲۱۴ هزار هکتار، گلستان با ۱۰۰ هزار هکتار و خوزستان با ۱۸۰ هزار هکتار شالیزار به‌عنوان قطب‌های اصلی تولید برنج در کشور شناخته می‌شوند (Agricultural Statistics, 2023).

یکی از مشکلات عمده‌ای که امروزه در تولید برنج و سایر محصولات کشاورزی مطرح می‌باشد، محدودیت‌های شدید مربوط به سطح زیرکشت بوده که به‌ویژه با توجه به نیاز بالای این گیاه به آب، این محدودیت‌ها در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک چون ایران تشدید می‌شود (Prasad et al., 2017). در این کشورها، کاهش منابع آب شیرین و بحران‌های مرتبط با آن، تولید برنج را با چالش‌های جدی مواجه کرده و نیاز به مدیریت بهینه منابع زمین و آب را دوچندان می‌کند (Mansour Ghanaei-Pashaki et al., 2022). در قاره آسیا، بیش از ۸۰ درصد منابع آب شیرین در بخش کشاورزی مصرف می‌شود و نیمی از این مقدار به تولید برنج اختصاص می‌یابد (Arouna et al., 2023) که این موضوع نشان‌دهنده وابستگی شدید تولید این محصول به منابع آب است.

نظام فشرده‌سازی اکولوژیک رویکردی است که آثار منفی بر محیط زیست را به حداقل می‌رساند (Mahdavi Damghani et al., 2019). این نظام با کاهش نیاز به زمین، آب و سایر منابع طبیعی

منجر به تولید بیشتر و پایدارتر از طریق کشت دقیق می‌شود. در همین راستا، نظام فشرده‌سازی برنج (SRI) به‌عنوان روشی نوین معرفی شده که به‌طور چشمگیری مصرف آب و کودهای شیمیایی را نیز کاهش می‌دهد (Chowdhury et al., Uphoff et al., 2013; 2014). روش SRI با اعمال تغییرات اساسی در شیوه‌های سنتی مدیریت برنج شامل خزانه، کاشت، داشت و آبیاری، نه تنها منجر به کاهش مصرف منابع می‌شود، بلکه می‌تواند به افزایش عملکرد و کیفیت دانه نیز کمک کند. به‌عنوان مثال، یکی از اصول کلیدی در اجرای این روش، کاشت گیاهچه‌های جوان (با سن ۸ تا ۱۲ روز) بوده که باعث بهبود استقرار گیاهچه و افزایش توانایی این گیاهان در تولید پنجه شده و به‌طور کلی، افزایش عملکرد را به دنبال دارد (Thakur et al., 2014). بر این اساس، مشخص است که در مقایسه با روش‌های سنتی که در آن گیاهچه‌ها در سنین بالاتر و با تعداد بیشتر به زمین اصلی منتقل می‌شوند، نظام فشرده‌سازی اکولوژیک از طریق مدیریت و دانش بیشتر با تأکید بر پنجه‌زنی بیشتر، استقرار بهتر و زودهنگام گیاهچه‌ها، عملکرد را به‌طور چشمگیری بهبود می‌بخشد.

یکی از چالش‌های اصلی پذیرش این روش توسط کشاورزان، نگرانی از استقرار گیاهچه‌های کوچک در زمین اصلی بوده که با کاهش تراکم بذر در خزانه و تولید گیاهچه‌های قوی‌تر قابل جبران می‌باشد (Arsil et al., 2019). علاوه بر این، کاهش تراکم بذر در خزانه منجر به بهبود پنجه‌زنی و همچنین تولید گیاهچه‌های قوی‌تر می‌شود که رشد علف‌های هرز را کاهش داده و در نتیجه نیاز به استفاده از علف‌کش‌ها را نیز به حداقل می‌رساند (Thakur et al., 2011). برخی محققان نیز نتیجه گرفتند که فاصله بیشتر بین گیاهچه‌ها به بهبود جذب نور و عناصر غذایی کمک می‌کند و همچنین باعث کاهش تلفات ناشی از نفوذ عمقی و هرزآب می‌شود (Ungureanu et al., 2020). این ویژگی‌ها باعث می‌شود تا نظام فشرده برنج به‌عنوان نوعی راه‌حل کارآمد و پایدار در کشاورزی در مناطق مختلف تولید این محصول، به‌ویژه در کشورهایی با محدودیت منابع آبی مطرح باشد. از مزایای دیگر این نظام، کاهش مصرف بذر و هزینه‌های تولید است. در این راستا، گزارش شده است که اجرای SRI می‌تواند عملکرد برنج را تا ۴۷ درصد افزایش و هزینه‌های تولید را تا ۲۳ درصد کاهش دهد (Paul et al., 2018) که این امر نشان‌دهنده پتانسیل بالای این

می‌بخشد. از این رو، این مطالعه با هدف بررسی و مقایسه ویژگی‌های رشد، عملکرد کمی و کیفی دانه در نظام‌های مختلف کشت شامل فشرده‌سازی اکولوژیک، رایج (سنتی) و حدواسط در شرایط مزرعه و خزانه طراحی و اجرا شد.

مواد و روش‌ها

موقعیت جغرافیایی و اقلیمی محل اجرای آزمایش

این آزمایش در مزرعه‌ای شخصی واقع در شهر امیرکلا در استان مازندران در دو سال زراعی ۱۴۰۰-۱ و ۱۴۰۱-۲ در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با چهار تکرار اجرا شد. ارتفاع شهر امیرکلا از سطح دریا بین ۲۰ الی ۲۵ متر و میزان بارندگی آن بین ۵۰۰ الی ۷۵۰ میلی‌متر در سال متغیر است. اطلاعات هواشناسی ماهیانه محل اجرای آزمایش در هر دو سال زراعی در جدول ۱ آورده شده است.

روش برای بهبود بهره‌وری اقتصادی کشاورزان است. در این راستا، نتایج پژوهشی روی بررسی تأثیر شیوه‌های آبیاری و سن بوته بر عملکرد و اجزای عملکرد برنج در دو نظام کشاورزی رایج و فشرده‌سازی نشان داد که در تیمار غرقاب، تعداد پنجه‌ها بیشتر و عملکرد زیستی بالاتر بود. همچنین کمترین عملکرد در تیمار کم‌آبیاری و بیشترین عملکرد در تیمار غرقاب مشاهده شد. بر این اساس، برای افزایش تولید و صرفه‌جویی در مصرف آب، استفاده از کم‌آبیاری و سن بوته جوان (۳۹ روز) توصیه شده است (Shokhmegar et al., 2019).

با توجه به محدودیت منابع آبی به‌ویژه در کشورهای خشک و نیمه‌خشک مانند ایران و همچنین ضرورت افزایش تولید برنج به‌عنوان گیاهی اصلی برای تأمین امنیت و معیشت جمعیت روبه‌رشد در دنیا، به‌منظور پاسخگویی به تقاضای فزاینده، به‌کارگیری مدیریت نظام‌های اکولوژیک و نوآورانه‌ای مانند SRI امری اجتناب‌ناپذیر است. این راهکار مدیریتی همچنین کیفیت و کمیت دانه تولیدی را بهبود

جدول ۱- اطلاعات هواشناسی ایستگاه سینوپتیک محل اجرای آزمایش در دو سال زراعی ۱۴۰۰-۱ و ۱۴۰۱-۲
Table 1- Meteorological information from the synoptic station where the experiment was conducted in the 2021-2022 and 2022-2023 growing seasons

ماه Month	بارش Precipitation (mm)		دمای حداقل Minimum temperature (°C)		دمای حداکثر Maximum temperature (°C)		ساعات آفتابی Sunshine duration (hr)	
	۱۴۰۰ 2021	۱۴۰۱ 2022	۱۴۰۰ 2021	۱۴۰۱ 2022	۱۴۰۰ 2021	۱۴۰۱ 2022	۱۴۰۰ 2021	۱۴۰۱ 2022
فروردین March	8.9	28.9	12.3	11.3	19.7	19	192	173
اردیبهشت April	18.5	40.1	17	15.9	22.6	21.9	182	163
خرداد May	10.7	6.60	22.5	19.8	29	27.7	272	316
تیر June	19.5	7.20	24.8	23.4	32.9	31.3	257	310
مرداد July	27.7	28.5	25.3	24.2	33	31.7	240	228
مجموع بارندگی Annual rainfall (mm)	85.3	111.3	-	-	-	-	-	-

تیمارهای آزمایش در خزانه و مزرعه

در شرایط خزانه و مزرعه اجرا شد. در بخش اول آزمایش در شرایط خزانه، تیمارهای آزمایش شامل سه مقدار مصرف بذر (۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ گرم در مترمربع به‌ترتیب برای نظام‌های فشرده‌سازی اکولوژیک، حدواسط و رایج) بود. در بخش دوم آزمایش در شرایط مزرعه، تیمارها شامل سه نظام مدیریتی به‌صورت فشرده‌سازی اکولوژیک (شامل یک

سه نظام کشت شامل فشرده‌سازی اکولوژیک^۱، رایج^۲ یا سنتی و حد واسط^۳ به‌عنوان تیمارها مدنظر قرار گرفتند و آزمایش در دو بخش

- 1- Ecological Intensification or SRI
- 2- Conventional system
- 3- Intermediate system

بین ردیف برای سه نظام فشرده‌سازی اکولوژیک، رایج و حد واسط به‌ترتیب برابر با ۳۰×۳۰ ، ۲۰×۲۰ و ۱۵×۱۵ سانتی‌مترمربع در نظر گرفته شد.

در مزرعه مورد بررسی، در سال قبل از آزمایش نیز برنج کاشته شده بود. قبل از شروع آزمایش، به‌منظور تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک در هر دو سال چند نمونه تصادفی از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری خاک برداشت و به آزمایشگاه تخصصی آنالیز خاک در شهرستان بابل ارسال شد (جدول ۳).

گیاهچه در هر کپه، کم‌آبیاری به‌صورت متناوب، تراکم ۱۱ بوته در مترمربع و سن گیاهچه ۲۰ روزه، رایج (هشت گیاهچه در هر کپه، آبیاری به‌صورت ۱۰ سانتی‌متر بالاتر از سطح خاک، تراکم ۲۵ بوته در مترمربع و سن گیاهچه ۴۰ روزه) و حدواسط (شامل چهار گیاهچه در هر کپه، آبیاری به‌صورت اشباع در سطح خاک، تراکم ۱۶ بوته در مترمربع و سن گیاهچه ۳۰ روزه) بودند که مطابق با جدول ۲ اجرا شدند. لازم به ذکر است که آرایش کاشت در کلیه نظام‌ها در مزرعه به‌صورت دستی و الگوی مربع بود. بر این اساس، فاصله روی ردیف و

جدول ۲- خصوصیات نظام‌های کاشت برنج در شرایط مزرعه

Table 2- Characteristics of rice planting systems in the field

نظام‌های کاشت Planting systems	سن گیاهچه Seedling age (days)	تراکم کاشت (بوته در مترمربع) Planting density (plants.m ⁻²)	آبیاری Irrigation	تعداد گیاهچه در هر کپه Number of seedlings per hill
فشرده‌سازی اکولوژیک Ecological intensification	20	11	کم‌آبیاری به‌صورت متناوب Water deficit as alternative water	1
حدواسط Intermediate	30	16	اشباع در سطح خاک Saturation at the soil level	4
رایج Conventional	40	25	غرقاب دائم به‌صورت ۱۰ سانتی‌متر بالای خاک Permanently submerged 10 cm above the soil	8

جدول ۳- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه

Table 3- Physical and chemical properties of soil

سال Year	بافت Texture	اسیدیته pH	هدایت الکتریکی EC (dS.m ⁻¹)	نیترژن در دسترس N (%)	فسفر P (mg.kg ⁻¹)	پتاسیم K (mg.kg ⁻¹)	کربن آلی Organic C. (%)	ماده آلی Organic material (%)
۱۴۰۰-۱۴۰۱ 2021-2022	لومی Loam	7.50	1.94	0.13	44	237	1.32	2.28
۱۴۰۱-۱۴۰۲ 2022-2023	لومی Loam	7.59	1.96	0.11	38	215	1.28	2.19

میلی‌متر) به خزانه انتقال داده شدند.

ابعاد هر کرت در خزانه یک در یک مترمربع در نظر گرفته شد. در خزانه، شرایط آبیاری و دما یکسان بود و تنها میزان بذر مصرفی در مترمربع به‌عنوان تیمار مدنظر قرار گرفت.

ابعاد هر کرت در زمین اصلی چهار در چهار متر در نظر گرفته شد. در هر دو سال زراعی پس از عملیات آماده‌سازی زمین، انتقال گیاهچه‌ها به مزرعه برای نظام فشرده‌سازی اکولوژیک در هفته اول اردیبهشت ماه، برای نظام حدواسط در هفته دوم اردیبهشت ماه و

عملیات زراعی

ضدعفونی و خیساندن بذر برنج رقم طارم هاشمی (که از مرکز خدمات جهاد کشاورزی شهرستان بابل تهیه شد) در هفته اول فروردین ماه در سه مرحله شامل جداسازی بذره‌های پوک، ضدعفونی با قارچ‌کش و انتقال بذر به گرم‌خانه انجام شد.

در هر دو سال، آزمایش از روز هفتم فروردین ماه با خیساندن بذرها شروع شد و در روز پانزدهم فروردین ماه بذره‌های جوانه‌زده با طول ساقه‌چه و ریشه‌چه نرمال (به‌ترتیب برابر با ۱۰-۵ و ۱۵-۱۰

برای نظام رایج در اواخر هفته سوم اردیبهشت ماه (براساس عرف منطقه) انجام شد. یک ماه پس از استقرار کامل گیاهچه‌ها در مزرعه، آبیاری براساس توضیحات ارائه‌شده در جدول ۲ اعمال گردید. بر این اساس، در نظام فشرده‌سازی اکولوژیک پس از رسیدن ارتفاع آب به ۱۰ سانتی‌متر، آبیاری قطع شد تا سطح آب پایین رفته و سله‌ها و ترک‌های روی سطح خاک مشخص شود. در نظام حدواسط نیز آبیاری تا ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر از سطح خاک انجام شد و وقتی آب به سطح خاک رسید، آبیاری مجدد اعمال شد. در نظام رایج نیز دائماً حالت غرقاب بر سطح خاک حفظ شد و نوسان آبیاری در لایه ۱۰-۵ سانتی‌متری سطح زمین ثابت ماند.

وحین علف‌های هرز به‌طور دستی و مستمر در طول فصل رشد تا زمان بسته‌شدن تاج‌پوشش گیاهی انجام گرفت. به‌منظور اجرای آزمایش در شرایط کم‌نهاد، در هنگام آماده‌سازی زمین و در طول فصل رشد، هیچ‌گونه نهاده شیمیایی از جمله سم و کود شیمیایی استفاده نشد. البته لازم به ذکر است که در طول دوره رشد آزمایش، هیچ‌گونه آفت یا بیماری خاصی مشاهده نشد.

اندازه‌گیری صفات

در بخش اول آزمایش در خزانه و قبل از نشاکاری، طول ساقه از محل طوقه تا نوک بلندترین برگ با متر مهندسی، قطر طوقه با استفاده از کولیس، عمق نفوذ ریشه با استفاده از کاغذ میلی‌متری و قطر ریشه از قطورترین قسمت، با استفاده از لنز و دوربین ماکرو و صفحه مدرج با دقت یک صدم میلی‌متر اندازه‌گیری و ثبت شد.

برداشت و اندازه‌گیری صفات در بخش دوم عملیات در مزرعه، ۹۰ روز پس از نشاکاری آغاز شد. صفات اندازه‌گیری‌شده شامل تعداد پنجه‌های بارور، طول خوشه (از پایه تا نوک خوشه) و درصد سنبله‌های پوک بودند که قبل از برداشت ۱۰ بوته مورد آزمایش اندازه‌گیری و ثبت گردید. به این منظور، تمامی دانه‌ها از خوشه‌ها جدا شده، تعداد دانه‌های پر (بارور) و سنبله‌های پوک شمارش و درصد سنبله‌های پوک محاسبه شد. همچنین در پایان فصل رشد، عملکرد دانه و عملکرد زیستی گیاه از سطح یک مترمربع اندازه‌گیری شد. شاخص برداشت نیز با استفاده از نسبت عملکرد دانه بر عملکرد زیستی محاسبه شد. این عملیات در هر دو سال اجرای آزمایش تکرار گردید. خصوصیات کیفی شامل درصد آمیلوز و نمره ژلاتینه شدن تنها در سال اول آزمایش، در مؤسسه تحقیقات برنج کشور واقع در استان

مازندران شهر آمل اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری درصد آمیلوز، از روش کالرومتریک در طول موج ۶۲۰ نانومتر با تشکیل کمپلکس ید-نشاسته (Habibi Kiahabadi, 2007; Juliano, 1971) و دستگاه اسپکتروفوتومتر (مدل Apel PD-303) استفاده شد. بدین منظور، پس از ۲۲ دقیقه، تغییر رنگ نشاسته به رنگ آبی در مجاورت ید مشاهده شد و جذب نمونه‌ها توسط دستگاه اسپکتروفوتومتر در طول موج ۶۲۰ نانومتر قرائت گردید. لازم به ذکر است که درصد آمیلوز براساس رتبه‌بندی‌های ۳-۹، ۱۹-۱۰، ۲۴-۲۰ و ۳۳-۲۵ درصد به‌ترتیب شامل مقادیر خیلی پایین، پایین، متوسط و بالا تعیین می‌گردد (Habibi Kiahabadi, 2007). برای اندازه‌گیری نمره ژلاتینه شدن، از روش جولیانو (Juliano, 1982) استفاده شد. در این روش، دانه‌های برنج در محلول رقیق پتاسیم هیدروکسید قرار داده شده و درجه حل شدن دانه‌ها در محیط قلیایی براساس نمره‌دهی تعیین شد. نمره‌دهی نمونه‌ها در این روش بین یک تا هفت است که در رتبه یک، دانه‌ها تحت تأثیر محلول قرار نمی‌گیرند و بالاترین دمای ژلاتینه شدن (بالای ۷۴ درجه سانتی‌گراد) را به خود اختصاص می‌دهند. در رتبه هفت، دانه‌ها کاملاً در محلول حل می‌شوند و کمترین دمای ژلاتینه شدن (بین ۶۹-۵۵ درجه سانتی‌گراد) را به خود اختصاص می‌دهند. رتبه‌های دو و شش به‌ترتیب پاسخ به‌نسبت مشابه با رتبه‌های یک و هفت را داشته و رتبه‌های سه، چهار و پنج نیز مربوط به دمای ژلاتینه شدن متوسط (بین ۷۴-۷۰ درجه سانتی‌گراد) می‌باشند (Habibi Kiahabadi, 2007).

تجزیه و تحلیل داده‌ها

پیش از تجزیه و تحلیل داده‌ها، نرمال بودن توزیع باقی‌مانده‌ها با استفاده از آزمون شاپیرو-ویلک مورد بررسی قرار گرفت. سپس، به‌منظور ارزیابی همگنی واریانس خطای آزمایشی بین داده‌های آزمایش در هر دو سال زراعی، آزمون بارتلت استفاده گردید. تجزیه و تحلیل داده‌ها و محاسبه ضرایب همبستگی به‌روش پیرسون با استفاده از نرم‌افزار SAS نسخه ۹/۴ انجام شد. همچنین، مقایسه میانگین صفات با استفاده از آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد صورت گرفت.

نتایج و بحث

دار بود. علاوه بر این، اثر سال آزمایش نیز تأثیر معنی داری بر هیچ یک از این صفات مورد مطالعه گیاهچه نداشت (جدول ۴).
بیشترین طول و قطر طوقه گیاهچه برنج در شرایط خزانه به ترتیب برابر با ۲۴/۵ سانتی متر و ۴/۱ میلی متر در نظام مدیریتی فشرده سازی اکولوژیک مشاهده شد، در حالی که کمترین مقادیر این صفات به ترتیب با ۱۹/۸ سانتی متر و ۳/۵ میلی متر مربوط به نظام رایج بود (جدول ۵). بیشترین و کمترین قطر ریشه گیاهچه برنج به ترتیب برای نظام های فشرده سازی اکولوژیک و رایج به ترتیب با ۰/۵۲ و ۰/۳۳ میلی متر به دست آمد (جدول ۵).

نتایج آزمون بارتلت نشان داد که واریانس خطای آزمایشی در سال های مختلف یکنواخت بوده و امکان انجام تجزیه مرکب فراهم است. بر این اساس، در زیر نتایج مربوط به دو بخش خزانه و مزرعه به تفکیک ارائه شده است.
بر اساس نتایج تجزیه واریانس صفات رشدی گیاهچه برنج تحت تأثیر نظام های مختلف مدیریتی در خزانه مشخص شد که اثر اصلی نظام های کاشت بر طول و قطر طوقه و ریشه گیاهچه در سطح احتمال یک درصد معنی دار بود. همچنین، اثر متقابل سال و نظام های کشت در سایر صفات ارزیابی شده به غیر از عمق نفوذ ریشه غیر معنی -

جدول ۴- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) صفات رشد گیاهچه برنج تحت تأثیر نظام های کشت در شرایط خزانه در دو سال زراعی ۱۴۰۰-۱۴۰۱ و ۱۴۰۱-۱۴۰۲

Table 4- Analysis of variance (mean of squares) for growth traits of rice seedlings influenced by cultivation systems under nursery conditions in the 2021-2022 and 2022-2023 growing seasons

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean of squares			
		طول گیاهچه Seedling length	قطر طوقه Stem diameter	عمق نفوذ ریشه Depth of root penetration	قطر ریشه Root diameter
سال Year (Y)	1	1.71 ^{ns}	0.144 ^{ns}	0.499 ^{ns}	0.0007 ^{ns}
خطای سال r (Y)	6	0.398	0.044	0.117	0.001
نظام های کشت Planting systems (P)	2	42.9 ^{**}	0.754 ^{**}	90.8 ^{**}	0.083 ^{**}
Y×P	2	1.09 ^{ns}	0.049 ^{ns}	1.10 ^{**}	0.0006 ^{ns}
خطای کل Total error	12	0.173	0.038	0.087	0.001
ضریب تغییرات CV (%)		1.90	5.13	3.23	8.00

ns و **: به ترتیب عدم معنی داری و معنی داری در سطح احتمال یک درصد.

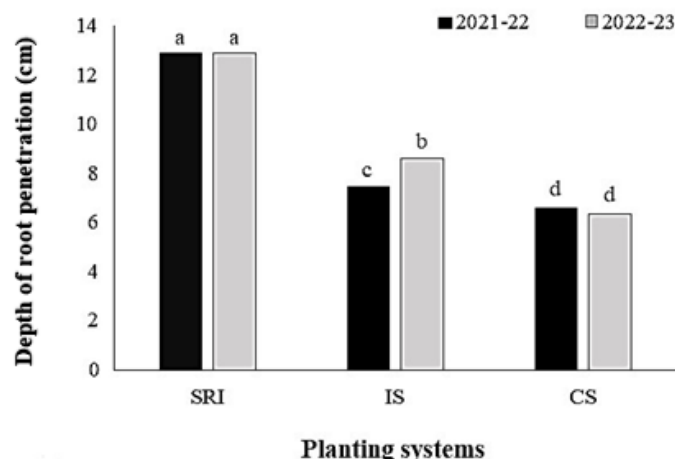
^{ns} and **: indicate non-significance and significance at the 1% probability level, respectively.

جدول ۵- مقایسه میانگین اثر نظام های کشت بر ویژگی های گیاهچه برنج در خزانه در دو سال زراعی ۱۴۰۰-۱۴۰۱ و ۱۴۰۱-۱۴۰۲
Table 5- Mean comparisons for the effects of planting systems on the characteristics of rice seedlings in the nursery in the 2021-2022 and 2022-2023 growing seasons

نظام های کشت Planting systems	طول طوقه Stem length (cm)	قطر طوقه Stem diameter (mm)	قطر ریشه Root diameter (mm)
فشرده سازی اکولوژیک Ecological intensification	24.5 ^{a*}	4.1 ^a	0.52 ^a
حد واسطه Intermediate	20.4 ^b	3.6 ^b	0.50 ^a
رایج Conventional	19.8 ^c	3.5 ^b	0.33 ^b

* حروف مشابه نشان دهنده عدم تفاوت معنی دار بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد است.

* Similar letters indicate no significant difference based on the Duncan test at the 5% probability level.



شکل ۱- مقایسه میانگین برهم کنش اثر سال و نظام‌های کشت بر عمق نفوذ ریشه گیاهچه برنج در شرایط خزانه در دو سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۰ و ۱۴۰۲-۱۴۰۱

Fig. 1- Mean comparisons for interaction between effects of year and planting systems on the root penetration of rice seedlings under nursery conditions in the 2021-2022 and 2022-2023 growing seasons

SRI: نظام فشرده‌سازی اکولوژیک، IS: نظام حدواسط و CS: نظام رایج.

SRI: System of rice intensification, IS: Intermediate system and CS: Conventional system.

به‌طوری که در این راستا گزارش شده است که در نظام‌های رایج، رقابت برای جذب مواد غذایی بین بوته‌ها افزایش یافته و باعث کاهش رشد ساقه می‌شود (Dastan et al., 2016; Amini et al., 2023). از طرفی، تاکور و همکاران (Thakur et al., 2011) گزارش کردند که در نظام فشرده، ویژگی‌های رشدی سیستم ریشه‌ای در مقایسه با نظام‌های رایج، به‌ویژه به‌دلیل ایجاد شرایط هوازی در خاک به‌طور چشمگیری برتری داشت.

در شرایط مزرعه، اثر نظام‌های مختلف کشت بر خصوصیات کمی مورد مطالعه دانه شامل اجزای عملکرد، عملکرد و شاخص برداشت برنج در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۶). علاوه بر آن، اثر متقابل سال و نظام‌های کشت بر درصد سنبلیچه‌های پوک، طول خوشه و تعداد پنجه بارور نیز معنی‌دار بود (جدول ۶).

درصد سنبلیچه‌های پوک، طول خوشه و تعداد پنجه بارور

نتایج مقایسه میانگین نظام‌های مختلف مدیریتی نشان داد که بیشترین درصد سنبلیچه‌های پوک مربوط به نظام کشت رایج با ۸/۱۹ درصد بود و کمترین مقدار در نظام فشرده‌سازی اکولوژیک با ۳/۵۳ درصد به دست آمد (جدول ۷).

در هر دو سال زراعی، نظام فشرده‌سازی اکولوژیک با ۱۲/۹ سانتی‌متر بیشترین و نظام رایج با ۶/۵ سانتی‌متر کمترین عمق نفوذ ریشه را به خود اختصاص دادند (شکل ۱).

به‌طور کلی، براساس نتایج آزمایش در بخش خزانه، ویژگی‌های ریخت‌شناختی مانند طول و قطر طوقه و ریشه گیاهچه برنج در نظام فشرده‌سازی اکولوژیک بیشتر از نظام‌های رایج بود (جدول ۵ و شکل ۱). این موضوع نشان می‌دهد که نظام فشرده‌سازی اکولوژیک می‌تواند به رشد بهتر و توسعه بیشتر اندام‌های هوایی و زیرزمینی گیاهچه برنج منجر شود، درحالی‌که مدیریت رایج موجب کاهش ویژگی‌های رشدی می‌شود که این امر می‌تواند رشد و به‌تبع آن عملکرد شلتوک را در مزرعه تحت تأثیر قرار دهد. بنابراین، این مقایسه نشان‌دهنده تأثیر مثبت نظام فشرده‌سازی اکولوژیک بر رشد گیاهچه برنج است. در این راستا، برخی پژوهشگران گزارش کردند که نظام فشرده‌سازی اکولوژیک برنج با ایجاد تغییراتی در شیوه سنتی مدیریت خزانه شامل زمان انتقال گیاهچه و اجرای الگوی کاشت مربعی، ویژگی‌های رشدی را به‌دلیل کاهش رقابت کمتر درون بوته‌ای بهبود بخشید و منجر به افزایش فعالیت فتوسنتزی و بهبود رشد گیاهچه شد (Sridevi & Chellamuthu, 2012). این نتایج با مطالعات دیگر در خصوص افزایش رشد ساقه و بهبود شرایط رشدی در نظام فشرده تطابق دارد،

جدول ۶- تجزیه واریانس صفات رشدی و عملکرد برنج تحت تأثیر نظام‌های کشت در شرایط مزرعه در دو سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۰ و ۱۴۰۱-۱۴۰۲

Table 6- Analysis of variance of rice growth traits under the influence of cultivation systems in field conditions in the 2021-2022 and 2022-2023 growing seasons

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean of squares					
		تعداد سنبلچه‌های پوک Number of unfilled spiklets	طول خوشه Panicle length	تعداد پنجه بارور Number of fertile tillers	عملکرد زیستی Biological yield	عملکرد دانه Grain yield	شاخص برداشت Harvest index
سال Year (Y)	1	9.29**	960**	0.375 ^{ns}	0.007 ^{ns}	0.001 ^{ns}	0.700 ^{ns}
خطای سال Error (Y)	6	0.061	0.017	0.153	0.004	0.001	0.506
نظام‌های کشت Planting systems (P)	2	46.5**	116**	884**	8.95**	0.384**	626**
Y×P	2	5.40**	0.736**	1.50**	0.0004 ^{ns}	0.0003 ^{ns}	1.82 ^{ns}
خطای کل Total error	12	0.124	0.036	0.111	0.001	0.0003	2.58
ضریب تغییرات CV (%)		5.92	0.717	1.86	2.14	3.15	4.18

ns و **: به ترتیب عدم معنی‌داری و معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد.

^{ns} and **: indicate non-significance and significance at the 1% probability level, respectively.

جدول ۷- مقایسه میانگین صفات رشدی برنج تحت تأثیر نظام‌های کشت در مزرعه

Table 7- Mean comparisons for growth traits of rice affected as planting systems in the field seasons

نظام‌های کشت Planting systems	سنبلچه‌های پوک Unfilled clusters (%)	طول خوشه Panicle length (cm)	تعداد پنجه بارور در بوته Number of fertilized tillers (No.plant ⁻¹)
فشرده‌سازی اکولوژیک Ecological intensification	3.53 ^{c*}	30.3 ^a	29.5 ^a
حدواسط Intermediate system	6.05 ^b	26.2 ^b	14.2 ^b
رایج Conventional system	8.19 ^a	22.8 ^c	9.36 ^c

* در هر ستون، حروف مشابه نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار براساس آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد است.

* Similar letters indicate no significant difference based on the Duncan test at the 5% probability level.

کاهش تراکم بوته و در نتیجه کاهش رقابت برای جذب مواد غذایی مربوط دانستند. نتایج این پژوهش همچنین نشان داد که درصد سنبلچه‌های پوک در تراکم ۳۰۰ گرم در مترمربع بیشتر از تراکم ۲۰۰ گرم در مترمربع بود که احتمالاً دلیل این امر مربوط به تشدید رقابت درون گونه‌ای و درون گیاه می‌باشد.

نظام فشرده‌سازی اکولوژیک با طول خوشه ۳۰/۳ سانتی‌متر بیشترین مقدار را در مقایسه بین نظام‌ها به خود اختصاص داد که نسبت به سال اول تفاوت معنی‌داری نداشت و باعث افزایش ۳۲/۹ درصدی طول خوشه نسبت به نظام رایج شد (جدول ۷). مطابق

کاهش آبیاری با ایجاد شرایط غرقابی و سله در سطح خاک، انتقال گیاهچه‌های مسن‌تر و افزایش تراکم گیاهچه‌ها در هر کپه با تشدید رقابت درون گونه‌ای، در نظام کشت رایج موجب کاهش رشد بوته‌ها و از طرفی، افزایش تعداد سنبلچه‌های پوک شد. همچنین، به نظر می‌رسد که با افزایش طول خوشه (جدول ۷)، تعداد مخازن زایشی افزایش یافته که این امر موجب تشدید رقابت برای تقسیم مواد فتوسنتزی و در نتیجه افزایش درصد سنبلچه‌های پوک شد. در این راستا، حسین‌پور و همکاران (Hosseinpoor et al., 2022) نیز دلیل کاهش تعداد سنبلچه‌های پوک در نظام فشرده تولید برنج را به

گزارش فتنی و همکاران (Fathi et al., 2017)، صفت طول خوشه برنج به شدت تحت تأثیر شرایط محیطی قرار می‌گیرد، براساس نتایج این محققان، طول خوشه به دلیل دماهای پایین‌تر و شدت کمتر تابش خورشید کاهش یافت. با این وجود، اگرچه طول خوشه عمدتاً تحت تأثیر خصوصیات ژنتیکی است، ولی عوامل محیطی و مدیریتی نیز می‌توانند به بهبود رشد و از طرفی افزایش آن کمک کنند. انتقال زودهنگام و انتخاب فاصله مناسب بین گیاهچه‌ها و آبیاری متناوب، رقابت را کاهش و از طرفی، احتمالاً وجود اکسیژن در خاک را برای رشد بهتر ریشه افزایش داده و به بهبود جذب مواد غذایی کمک نموده که در نهایت، افزایش رشد بوته موجب بهبود طول خوشه می‌شود. در همین زمینه، پژوهشگران بیان کرده‌اند که بهبود رشد ریشه و ساقه تحت مدیریت فشرده برنج به‌طور مستقیم منجر به تولید خوشه‌های بلندتر (با تعداد سنبلچه‌های بیشتر)، دانه‌بندی بهتر (با درصد بالاتر دانه‌های پر و بارور) و در نتیجه دانه‌هایی با وزن سنگین‌تر می‌شود (Thakur et al., 2011). ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2009) نیز گزارش دادند که عملکرد بالاتر دانه برنج در واریته‌های Liangyoupeijiu و Huaidao 9 با بهبود رشد اندام‌های زمینی و هوایی ارتباط دارد که این امر باعث افزایش اندازه مخازن زایشی (تعداد کل سنبلچه‌ها) شده است.

براساس نتایج این پژوهش، بیشترین و کمترین تعداد پنجه بارور به ترتیب در نظام‌های فشرده‌سازی اکولوژیک (۲۹/۵) پنجه بارور در بوته) و رایج (۹/۳۶) پنجه بارور در بوته) مشاهده شد (جدول ۷). بر این اساس، در نظام رایج به دلیل آبیاری و تهویه کمتر، منابع رشد محدودتر بوده و همین مسئله باعث کاهش تعداد پنجه‌های بارور شد. علاوه بر این، در نظام فشرده‌سازی اکولوژیک، به علت انتخاب فاصله مناسب بین گیاهچه‌ها، رقابت بین بوته‌ها کاهش یافته و با توسعه و گستردگی بهتر سیستم ریشه‌ای، جذب بهتر مواد غذایی، افزایش سطح برگ و جذب نور و نیز بهبود رشد بوته‌ها مشاهده شد که به تبع آن افزایش تعداد پنجه‌های بارور را به دنبال داشت (جدول ۷).

یکی از اجزای تیمارهای مورد بررسی در نظام‌های تحت آزمایش، روش آبیاری بوده که به دلیل تفاوت در نحوه توزیع آب و میزان رطوبت در خاک، بر سله‌بندی، تهویه و میزان اکسیژن خاک، رشد ریشه‌ها و به تبع آن رشد و تعداد پنجه‌های گیاه را تحت تأثیر قرار داده

است. در آبیاری ناکافی و یا غیریکنواخت که عموماً شیوه اجرایی در نظام مدیریت رایج می‌باشد، ریشه‌ها نمی‌توانند به‌طور مطلوب رشد کنند و این امر منجر به کاهش تعداد پنجه‌ها می‌شود. هرچند نتایج گزارش بومن و همکاران (Bouman et al., 2007) نشان می‌دهد که تعداد پنجه‌های بارور در روش آبیاری غرقاب بیشتر از کم‌آبیاری است، اما براساس نتایج این مطالعه مشخص شد که در نظام فشرده‌سازی اکولوژیک، اعمال کم‌آبیاری در کنار سایر تیمارها احتمالاً با بهبود شرایط خاک موجب افزایش رشد ریشه‌ها و بوته‌ها شود. این تفاوت‌ها نشان‌دهنده اهمیت اثر مدیریت کشت در عملکرد گیاهان است. در نظام‌های پایدار مبتنی بر روش‌های مصرف کم آب، اعمال آبیاری غرقابی به دلیل ایجاد شرایط اشباع و بی‌هوایی در خاک و در نتیجه کاهش تهویه و نفوذ اکسیژن به ریشه‌ها منجر به کاهش تعداد پنجه‌ها و رشد گیاه می‌شود. با این حال، اعمال کم‌آبیاری به همراه بهره‌گیری از روش‌هایی برای بهبود تهویه ریشه می‌تواند به افزایش حجم تولید ریشه و بهبود شرایط رشد، به‌ویژه در شرایط کم‌آبی کمک کرده و عملکرد بهتری را تولید نماید.

عملکرد زیستی، عملکرد دانه و شاخص برداشت

بیشترین عملکرد زیستی در نظام فشرده‌سازی اکولوژیک (۲۹۰۰۰ کیلوگرم در هکتار) مشاهده شد که نسبت به نظام مدیریت رایج با کمترین عملکرد زیستی (۹۴۰۰ کیلوگرم در هکتار)، افزایش حدود ۲۰۸ درصدی را نشان داد (جدول ۸). عملکرد زیستی برای نظام حد واسط (۱۲۰۰۰ کیلوگرم در هکتار) نیز در مقایسه با نظام فشرده‌سازی اکولوژیک، برابر با ۵۹ درصد کمتر و در مقایسه با نظام رایج، برابر با ۲۸ درصد بیشتر محاسبه گردید (جدول ۸).

براساس نظر محققان چنین به نظر می‌رسد که عملکرد زیستی در تعیین عملکرد دانه اهمیت زیادی دارد و برای دستیابی به عملکرد مناسب باید عملکرد زیستی را افزایش داد. طبق نتایج قربانیان آستانه و همکاران (Ghorbanian Astana et al., 2013)، رشد سریع گیاه به‌ویژه در مراحل اولیه باعث افزایش عملکرد زیستی می‌شود. حسین‌پور و همکاران (Hosseinpoor et al., 2022) در آزمایشی نشان دادند که در روش کم‌آبیاری، عملکرد زیستی تنها چهار درصد کمتر از آبیاری مرسوم بود.

جدول ۸- مقایسه میانگین اثر نظام‌های کشت بر عملکرد زیستی، عملکرد دانه و شاخص برداشت برنج

Table 8- Mean comparisos for effects of planting systems on biological yield, paddy yield, and harvest index of rice

نظام‌های کشت Planting systems	عملکرد زیستی Biological yield (kg.ha ⁻¹)	عملکرد دانه (kg.ha ⁻¹) Grain yield	شاخص برداشت Harvest index (%)
فشرده‌سازی اکولوژیک Ecological intensification	29000 ^{a*}	8300 ^a	28.6 ^b
حد واسطه Intermediate	12000 ^b	5500 ^b	45.8 ^a
رایج Conventional	9400 ^c	3900 ^c	41.5 ^a

* حروف مشابه نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار براساس آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد است.

* Similar letters indicate no significant difference based on the Duncan test at the 5% probability level.

می‌شود. نتایج برخی از تحقیقات نشان داده است که اجرای نظام فشرده‌سازی اکولوژیک باعث بهبود خصوصیات مورفوفیزیولوژیکی و افزایش عملکرد دانه می‌شود. در این راستا، منته و همکاران (Menete et al., 2008) گزارش دادند که بهبود خصوصیات مورفوفیزیولوژیکی بوته‌های برنج در نظام فشرده‌سازی اکولوژیک افزایش عملکرد دانه را به دنبال دارد. علاوه بر مزایای زیست‌محیطی ذکر شده، نتایج مطالعه‌ای روی مدل‌سازی مقایسه نظام‌های مختلف کشت نشان داد که نظام اکولوژیک همچنین باعث کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای همچون CH₄ و N₂O می‌شود (Sun et al., 2021). علاوه بر این، نظام‌های اکولوژیک برنج به دلیل کاهش مصرف آب و بهبود شرایط محیطی مانند کیفیت خاک و آب، می‌توانند به عنوان تکنولوژی‌های سبز مؤثر در کشاورزی پایدار نیز معرفی شوند (Yang et al., 2017).

نظام کشت حد واسطه بیشترین (۴۶ درصد) و نظام فشرده‌سازی اکولوژیک کمترین (۲۹ درصد) شاخص برداشت را به خود اختصاص دادند (جدول ۸). از آنجاکه شاخص برداشت به عنوان پارامتری برای سنجش کارایی تولید محصول اقتصادی در گیاهان مطرح بوده که نسبت عملکرد دانه به عملکرد زیستی را نشان می‌دهد، این موضوع نشان‌دهنده تفاوت در کارایی تبدیل ماده خشک به عملکرد اقتصادی در این دو نظام می‌باشد. کاهش شاخص برداشت در نظام فشرده‌سازی اکولوژیک احتمالاً به دلیل تمرکز بیشتر بر رشدونمو ریشه، افزایش تعداد پنجه‌های بارور و بهبود ویژگی‌های مورفوفیزیولوژیکی و در نهایت به افزایش ماده خشک کلی گیاه منجر می‌شود. با این حال، این عوامل ممکن است به طور مستقیم به افزایش عملکرد دانه منجر نشوند. بنابراین، درحالی که عملکرد زیستی بالا است، ممکن است بخش کمتری از آن به دانه تبدیل شود که در

این یافته‌ها حاکی از آن است که اجرای کم‌آبیاری می‌تواند تا حد زیادی عملکرد گیاهان را حفظ کرده و موجب کاهش مصرف آب گردد. در نظام فشرده‌سازی اکولوژیک که بر اجرای اصول پایداری و استفاده بهینه از منابع تأکید دارد، این امکان وجود دارد که ترکیب روش‌های مختلف مدیریت زراعی مانند کم‌آبیاری، وجین و استفاده از شیوه‌های خاک‌ورزی به افزایش کارایی مصرف نهاده‌ها و بهبود عملکرد کمک کند. در این نظام‌ها، با افزایش تعداد دفعات وجین و بهبود تهویه، شرایط برای رشد و توسعه بهتر ریشه‌ها فراهم می‌شود و این امر به نوبه خود باعث افزایش حجم ریشه و بهبود جذب عناصر غذایی و آب توسط گیاه می‌شود. به همین دلیل، افزایش تعداد پنجه‌های بارور و بهبود شرایط آبیاری در این نظام‌ها منجر به افزایش تولید ماده خشک و زیست‌توده شده و در نهایت، افزایش عملکرد زیستی گیاهان را به دنبال دارد. این یافته‌ها نشان‌دهنده این است که با استفاده از راهبردهای مؤثر در مدیریت آب و خاک، می‌توان در شرایط کم‌آبی به نتایج مشابه یا حتی بهتر از آبیاری مرسوم نیز دست یافت.

در مقایسه بین نظام‌های مدیریتی، بالاترین عملکرد دانه متعلق به نظام فشرده‌سازی اکولوژیک (۸۳۰۰ کیلوگرم در هکتار) بود که باعث افزایش ۵۰ و ۱۱۳ درصدی عملکرد دانه به ترتیب نسبت به نظام‌های حدواسطه و رایج شد (جدول ۸). کمترین میزان عملکرد دانه نیز با ۳۹۰۰ کیلوگرم در هکتار به نظام رایج اختصاص داشت. در نظام فشرده‌سازی اکولوژیک، استفاده از آبیاری متناوب و انتخاب الگوی کاشت مربعی به کاهش رقابت گیاهی و بهبود هوادهی خاک کمک می‌کند که این امر موجب رشد بهینه ریشه و افزایش تعداد پنجه‌های بارور شده و در نتیجه، بهبود عملکرد دانه را به دنبال دارد. همچنین، آبیاری متناوب با کاهش مصرف آب باعث افزایش عملکرد دانه نیز

و ژلاتینه شدن به ترتیب در سطح احتمال پنج و یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۹)، به طوری که بیشترین و کمترین درصد آمیلوز به ترتیب در نظام‌های فشرده‌سازی اکولوژیک (۲۲/۷ درصد) و رایج (۲۱/۵ درصد) مشاهده شد (جدول ۹). همچنین، بیشترین و کمترین نمره ژلاتینه شدن به ترتیب برای نظام‌های فشرده‌سازی اکولوژیک (۳/۷) و رایج (۳/۰) ثبت گردید (جدول ۹).

نتیجه شاخص برداشت کمتری را تولید نماید (Yang & Zhang, 2010). بر این اساس، پیشنهاد شده است که به منظور بهبود عملکرد اقتصادی و همزمان دستیابی به عملکرد زیستی و اقتصادی بالا، نسبت این دو عملکرد و یا شاخص برداشت نیز مورد توجه قرار داده شود.

خصوصیات کیفی

اثر نظام‌های کشت بر خصوصیات کیفی برنج شامل درصد آمیلوز

جدول ۹- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) صفات کیفی برنج تحت تأثیر نظام‌های کشت در شرایط مزرعه‌ای
Table 9- Analysis of variance (mean of squares) for rice quality traits influenced by cultivation systems under field conditions

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean of squares	
		درصد آمیلوز Amylose percentage	نمره ژلاتینه شدن Gelatinization
تکرار Replication	3	0.020 ^{ns}	0.01 ^{ns}
نظام‌های کشت Planting systems	2	1.02*	0.35**
خطا Error	6	0.09	0.02
ضرب تغییرات CV (%)	-	1.36	4.34
نظام‌های کشت Planting systems		درصد آمیلوز Amylose (%)	نمره ژلاتینه شدن Gelatinization
فشرده‌سازی اکولوژیک Ecological intensification	-	22.67 ^{a*}	3.65 ^a
حد واسطه Intermediate	-	22.05 ^{ab}	3.13 ^b
رایج Conventional	-	21.5 ^b	3.00 ^b

ns, *, **: به ترتیب نشان‌دهنده عدم معنی‌داری و معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد و یک درصد هستند.

* میانگین‌هایی که حداقل یک حرف مشابه در هر ستون دارند، براساس آزمون دانکن در سطح معنی‌داری $p \leq 0.05$ تفاوت معنی‌داری ندارند.

ns, *, **: representing non-significance and significance at the 5% and 1% probability levels, respectively.

* Means with at least one similar letter in each column are not significantly different based on the Duncan test at $p \leq 0.05$.

آمیلوپکتین و همچنین فرآیند ژلاتینه شدن را تحت تأثیر قرار داده است. بر این اساس، به نظر می‌رسد که در نظام فشرده‌سازی اکولوژیک، تراکم کشت و مدیریت منابع به گونه‌ای است که موجب افزایش سنتر آمیلوز و بهبود ویژگی‌های ژلاتینه شدن برنج می‌شود. لازم به ذکر است که این خصوصیات از جمله عواملی هستند که در پذیرش رقم برنج توسط مصرف‌کننده نیز نقش مهمی دارند. قابل ذکر است که افزایش درصد آمیلوز در نظام فشرده‌سازی اکولوژیک به طور کلی به بهبود کیفیت پخت منجر نمی‌شود، زیرا محتوای آمیلوز بالا

برنج‌های با درصد آمیلوز پایین به دلیل ساختار مولکولی کمتر متراکم، چسبندگی بیشتری دارند (Sahoo et al., 2024). در مقابل، برنج‌های دارای درصد آمیلوز بالاتر به دلیل ساختار بلوری آمیلوز، دانه‌های مجزا، غیرچسبنده و با کیفیت بالاتری تولید می‌کنند. افزایش درصد آمیلوز و نمره بالاتر ژلاتینه شدن در نظام فشرده‌سازی اکولوژیک ممکن است ناشی از تغییرات بهبود مدیریتی این نظام به ویژه تفاوت رژیم آبیاری باشد که باعث بروز تغییرات فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی در دانه گیاه برنج شده و این تغییرات نسبت آمیلوز و

ممکن است باعث افزایش خشکی و سفتی بافت برنج پخته و افت کیفیت آن شود. در عین حال، نمره ژلاتینه شدن مناسب در این نظام نشان می‌دهد که برنج حاصل همچنان بافت مطلوبی پس از پخت دارد. بنابراین، این نظام با افزایش نسبی آمیلوز و بهبود ویژگی‌های ژلاتینه شدن، ترکیبی از ویژگی‌های مطلوب و چالش‌برانگیز را برای کیفیت پخت ایجاد می‌کند. طبق نظر پژوهشگران، میزان آمیلوز به‌عنوان نوعی شاخصی مهم در کیفیت پخت و خوراک برنج مطرح می‌باشد (Habibi Kiahabadi, 2007). نتایج مطالعه الله‌قلی‌پور (Allahgholipour, 2018) روی رابطه بین میزان آمیلوز دانه، دمای ژلاتینه شدن و خصوصیات ویسکوزیتی ۴۰ ژنوتیپ برنج نشان داد که ژنوتیپ‌های مورد مطالعه براساس میزان آمیلوز دانه به دو گروه تقسیم شدند: گروه اول دارای محتوای آمیلوز بالا و گروه دیگر دارای محتوای آمیلوز متوسط می‌باشند. نتایج تجزیه خوشه‌ای نشان داد که گروه‌بندی ژنوتیپ‌ها براساس خصوصیات ویسکوزیته و دمای ژلاتینه

شدن مشابه گروه‌بندی آن‌ها براساس میزان آمیلوز دانه بود. میزان چسبندگی نهایی و دمای ژلاتینه شدن نیز به‌عنوان مؤثرترین خصوصیات برای تفکیک گروه‌های آمیلوز بالا و متوسط شناسایی شدند. همچنین پیش‌بینی میزان آمیلوز متوسط تا بالا براساس چسبندگی نهایی و دمای ژلاتینه شدن با ضریب تبیین ۹۷ درصد امکان‌پذیر بود.

ضرایب همبستگی بین صفات کمی و کیفی مورد مطالعه

نتایج همبستگی بین صفات کمی و کیفی مورد مطالعه برنج نشان داد که درصد سنبلیچه‌های پوک با طول خوشه، تعداد پنجه بارور، عملکرد زیستی و عملکرد دانه و با درصد آمیلوز و ژلاتینه شدن همبستگی منفی و معنی‌دار (در سطح احتمال یک درصد) و با شاخص برداشت همبستگی مثبت و معنی‌داری (در سطح احتمال یک درصد) داشت (جدول ۱۰).

جدول ۱۰- ضرایب همبستگی بین صفات کمی و کیفی برنج تحت تأثیر نظام‌های مختلف

Table 10- Correlation coefficients between quantitative traits and quality of rice affected different planting systems

صفات Traits	سنبلیچه‌های پوک Unfertilized spiklets	طول خوشه Panicle length	تعداد پنجه - های بارور Number of productive tillers	عملکرد زیستی Biological yield	عملکرد دانه Paddy yield	شاخص برداشت Harvest index	آمیلوز Amylose percentage	ژلاتینه شدن Gelatinization
سنبلیچه‌های پوک Unfertilized spiklets	1							
طول خوشه Panicle length	-0.85**	1						
تعداد پنجه‌های بارور Number of productive tillers	-0.88**	0.97**	1					
عملکرد زیستی Biological yield	-0.84**	0.94**	0.99**	1				
عملکرد دانه Paddy yield	-0.88**	0.98**	0.99**	0.97**	1			
شاخص برداشت Harvest index	0.67**	-0.77**	-0.87**	-0.92**	-0.80**	1		
آمیلوز Amylose percentage	-0.92**	0.99**	0.94**	0.93**	0.99**	-0.74*	1	
ژلاتینه شدن Gelatinization	-0.91**	0.94**	0.99**	0.99**	0.98**	-0.88**	0.95**	1

** و *: به ترتیب معنی‌داری در سطوح احتمال یک و پنج درصد

**and *: are significance at the 1% and 5% probability levels, respectively.

و قطر ساقه و ریشه، تعداد پنجه‌های بارور و طول خوشه، عملکرد کمی را به‌طور معنی‌داری افزایش داد. بهبود کیفیت دانه برنج نیز با افزایش درصد آمیلوز و نمره ژلاتینه شدن مشاهده شد، هرچند این تغییرات بسته به نیاز مصرف‌کننده ممکن است مطلوب یا نامطلوب تلقی شوند.

نظام فشرده‌سازی اکولوژیک با تراکم کمتر بوته‌ها و استفاده از نشاهای جوان، فضای بیشتری را برای نمو ریشه و جذب بهتر عناصر غذایی فراهم کرد و به‌ویژه در شرایط کمبود آب، کارایی استفاده از منابع را افزایش داد. در مقابل، نظام رایج با تراکم بیشتر و کاشت نشاهای مسن‌تر، علی‌رغم کاهش کیفیت دانه برنج منجر به تولید گیاهانی با ساقه‌های کوتاه‌تر و عملکرد کمتر شد. براساس یافته‌های این پژوهش، نظام فشرده‌سازی اکولوژیک برای تولید برنج به‌ویژه در مناطق با محدودیت منابع آبی توصیه شده و برای تحقیقات آتی نیز پیشنهاد می‌شود که تأثیر نظام‌های مختلف کاشت بر ویژگی‌های کیفی برنج تحت شرایط آب‌وهوایی متنوع نیز ارزیابی شود.

عملکرد زیستی با شاخص برداشت همبستگی منفی و معنی‌دار ($r=-0.92^{**}$) و با عملکرد دانه همبستگی مثبت و معنی‌داری ($r=0.97^{**}$) در سطح احتمال یک درصد داشت (جدول ۱۰). از سوی دیگر، طول خوشه با عملکرد زیستی و عملکرد دانه همبستگی مثبت در سطح احتمال یک درصد (به‌ترتیب با $r=0.94^{**}$ و $r=0.98^{**}$) داشت، درحالی‌که در سطح احتمال یک درصد با شاخص برداشت همبستگی منفی ($r=-0.77^{**}$) نشان داد (جدول ۱۰). بر این اساس، افزایش طول خوشه باعث افزایش تعداد دانه در هر خوشه شده و این امر تأثیر مستقیمی بر افزایش عملکرد زیستی دارد. همچنین، تعداد پنجه بارور همبستگی مثبت و معنی‌داری با عملکرد زیستی و عملکرد دانه و همبستگی منفی و معنی‌دار با شاخص برداشت داشت (جدول ۱۰). عملکرد دانه با درصد آمیلوز ($r=0.99^{**}$) و ژلاتینه شدن ($r=0.98^{**}$) همبستگی مثبت و معنی‌دار داشتند (جدول ۱۰).

نتیجه‌گیری

نتایج این مطالعه نشان داد که نظام فشرده‌سازی اکولوژیک برنج با بهبود رشد گیاهچه‌ها و افزایش کارایی استفاده از منابع، عملکرد و کیفیت برنج را بهبود می‌بخشد. بهره‌گیری از این نظام با افزایش طول

References

1. Agricultural Statistics. (2023). Ministry of Agriculture. Economic Planning Deputy. Center for Statistics, Information Technology and Communication. The First Volume. Crops. 95 pp. (In Persian).
2. Allahgholipour, M. (2018). Prediction of high and intermediate amylose groups based on the starch physicochemical properties in rice (*Oryza sativa* L.) genotypes. *Iranian Journal of Crop Sciences*, 20(2), 139-150. (In Persian with English abstract)
3. Amini, R., Zafarani-Moattar, P., Shakiba, M.R., & Hasanfard, A. (2023). Inoculating moldavian balm (*Dracocephalum moldavica* L.) with mycorrhizal fungi and bacteria may mitigate the adverse effects of water stress. *Journal of Scientific Reports*, 13(1), 16176. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-43539-3>
4. Arouna, A., Dzomeku, I.K., Shaibu, A.G., & Nurudeen, A.R. (2023). Water management for sustainable irrigation in rice (*Oryza sativa* L.) production: A review. *Journal of Agronomy*, 13, 1522. <https://doi.org/10.3390/agronomy13061522>
5. Arsil, P., Sahirman, S., Ardiansyah, H., & Hidayat, H. (2019). The reasons for farmers not to adopt System of Rice Intensification (SRI) as a sustainable agricultural practice: An explorative study. *IOP Conf. Series: Journal of Earth and Environmental Science*, 250, 012063. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/250/1/012063>
6. Bouman, B.A.M., Lampayan, R.M., & Tuong, T.P. (2007). Water management in irrigated rice: Coping with water scarcity. Los Baños (Philippines): International Rice Research Institute. 54 p.
7. Chowdhury, M.R., Kumar, V., Sattar, A., & Brahmachari, K. (2014). Studies on the water use efficiency and nutrient uptake by rice under system of intensification. *Journal of the Bioscan*, 9(1), 85-88.
8. Dastan, S., Noormohamadi, G., Madani, H., Ebrahimi, M., & Yasari, E. (2016). Investigation of growth and phenology of main crop and ratoon of rice cultivars in different cropping systems. *Journal of Plant Production*

- Technology*, 16(1), 81-101. (In Persian with English Abstract). <https://doi.org/10.22084/ppt.2016.1769>
9. Fathi, N., Pirdashti, H., Nasiri, M., & Bakhshandeh, E. (2017). Effect of weather temperature and solar radiation on grain yield and yield components of rice under different local climates in Mazandaran province. *Journal of Crops Improvement*, 19(1), 163-176. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/jci.2017.60406>
10. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2023). Available online: <http://www.fao.org/3/i1688e/i1688e00.1>
11. Ghorbanian Astana, Y., Amiri, E., Razavipour, Y., & Rezaei, M. (2013). Investigating the effect of new cultivation management system (SRI) on grain yield and water efficiency in rice fields. *Journal of Agroecology*, 4, 53-61. (In Persian with English abstract).
12. Habibi Kiahabadi, F., Hosseini, M., Yekta, M., Adeli, F., Jarian, M., & Talakoobi, M. (2018). *Investigation of physical and chemical properties of rice grains and factors affecting cooking quality in different rice varieties* [Research project]. Rice Research Institute of Iran, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO). Scientific National ID: R-1068478.
13. Hosseinpour, S., Moghadam, H., & Pirdashti, H. (2022). Evaluation of yield and yield components of rice cv. 'Tarom Hashemi' in system of rice intensification (SRI) and conventional systems. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 31(3), 329-340. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22034/saps.2021.36888.2376>
14. Juliano, B.O. (1971). Simplified assay for milled-rice amylose. *Journal of Cereal Science Today*, 16, 334-360.
15. Juliano, B.O. (1982). International co-operative testing of the alkali digestibility values for milled rice. *Journal of Starch*, 34, 21-26. <https://doi.org/10.1002/star.19820340106>
16. Mahdavi Damghani, A., Kambouzia, J., Aghamir, F., & Mahmoudi, H. (2019). Sustainable intensification of agricultural systems in Iran for adaptation to climate change: Opportunities and challenges. *Journal of Strategic Research Agricultural Sciences and Natural Resources*, 4(2), 157-168. (In Persian with English abstract). [https://doi.org/10.31433/1605-220X-2018-21-3\(1\)-118-123](https://doi.org/10.31433/1605-220X-2018-21-3(1)-118-123)
17. Mansour Ghanaei-Pashaki, K., Mohsen Abadi, G., Biglouei, M.H., Farhangi, M.B., & Mokhtassi-Bidgoli, A. (2022). Effect of rice-duck co-cultivation on the trend of changes in growth indices, photosynthesis and irrigation and precipitation water productivity in different cultivation systems. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 32(1), 149-147. <https://doi.org/10.22034/saps.2021.44833.2646>
18. Menete, M.Z.L., Van Es, H.M., Brito, R.M.L., DeGloria, S.D., & Famba, S. (2008). Evaluation of system of rice intensification (SRI) component practices and their synergies on salt-affected soils. *Journal of Field Crops Research*, 109(1-3), 34-44. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2008.06.003>
19. Modarresi, M. (2023). Rice breeding in Iran: Current status and future perspective. *Journal of Plant Breeding and Biotechnology*, 11(2), 97-104. <https://doi.org/10.9787/PBB.2023.11.2.97>
20. Paul, S.K.K., Akter, M., Sarkar, S.K., & Sarkar, M.A.R. (2018). Effect of nursery seeding density, age of seedling and number of seedlings hill-1 on the performance of short duration transplanted of rice (cv. Parija). *Journal of the Bangladesh Agricultural University*, 16(2), 215-220. <https://doi.org/10.3329/jbau.v16i2.37963>
21. Prasad, R., Shivay, Y.S., & Kumar, D. (2017). Current status, challenges, and opportunities in rice production. *Rice Production Worldwide*, 1-32. https://doi.org/10.1007/978-3-319-47516-5_1
22. Rodríguez Coca, L.I., García González, M.T., Gil Unday, Z., Jiménez Hernández, J., Rodríguez Jáuregui, M.M., & Fernández Cancio, Y. (2023). Effects of sodium salinity on rice (*Oryza sativa* L.) cultivation: A review. *Journal of Sustainability*, 15(3), 1804. <https://doi.org/10.3390/su15031804>
23. Sahoo, U., Biswal, M., Nayak, L., Kumar, R., Tiwari, R.K., Lal, M.K., Bagchi, T.B., Sah, R.P., Singh, N.R., Sharma, S., Nyak, A.K., & Kumar, A. (2025). Rice with lower amylose content could have reduced starch digestibility due to crystallized resistant starch synthesized by linearized amylopectin. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 105(5), 3064-3072 <https://doi.org/10.1002/jsfa.14074>
24. Shokhmegar, Y., & Mousavi Toghiani, S.Y. (2019). Evaluation of irrigation regimes and seedling age effects on rice (*Oryza sativa* L.) yield and yield components in conventional and ecological systems. *Journal of Iranian Irrigation and Drainage*, 13(2), 389-399. (In Persian with English abstract).
25. Sridevi, V., & Chellamuthu, V. (2012). Influence of system of rice intensification on growth, yield and nutrient uptake of rice (*Oryza sativa* L.). *Journal of Madras Agricultural*, 99(4-6), 305-307.
26. Sun, G., Sun, M., Du, L., Zhang, Z., Wang, Z., Zhang, G., & Wang, H. (2021). Ecological rice-cropping systems mitigate global warming: A meta-analysis. *Journal of Science of the Total Environment*, 789, 147900.

- <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147900>
27. Thakur, A.K., Mohanty, R.K., Patil, D.U., & Kumar, A. (2014). Impact of water management on yield and water productivity with system of rice intensification (SRI) and conventional transplanting system in rice. *Journal of Paddy and Water Environment*, 12, 413–424. <https://doi.org/10.1007/s10333-013-0397-8>
 28. Thakur, A.K., Rath, S., Patil, D.U., & Kumar, A. (2011). Effects on rice plant morphology and physiology of water and associated management practices of the system of rice intensification and their implications for crop performance. *Journal of Paddy and Water Environment*, 9, 13-24. <https://doi.org/10.1007/s10333-010-0236-0>
 29. Ungureanu, N., Vlăduț, V., & Voicu, G. (2020). Water scarcity and wastewater reuse in crop irrigation. *Journal of Sustainability*, 12, 9055. <https://doi.org/10.3390/su12219055>
 30. Uphoff, N., Kassam, A., & Thakur, A. (2013). Challenges of increasing water saving and water productivity in the rice sector: Introduction to the system of rice intensification (SRI) and this issue. *Journal of Taiwan Water Conservancy*, 61(4), 1–13.
 31. Wakasa, Y. (2024). The use of rice seed as a bioreactor. In: Applications of Plant Molecular Farming (pp. 547-567). Singapore: Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-97-0176-6_20
 32. Yang, J., & Zhang, J. (2010). Crop management techniques to enhance harvest index in rice. *Journal of Experimental Botany*, 61(12), 3177-3189. <https://doi.org/10.1093/jxb/erq112>
 33. Yang, J., Zhou, Q., & Zhang, J. (2017). Moderate wetting and drying increases rice yield and reduces water use, grain arsenic level, and methane emission. *The Crop Journal*, 5, 151-158. <https://doi.org/10.1016/J.CJ.2016.06.002>
 34. Zhang, H., Xue, Y., Wang, Z., Yang, J., & Zhang, J. (2009). Morphological and physiological traits of roots and their relationships with shoot growth in “Super” rice. *Field Crops Research*, 113, 31–40. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2009.04.004>