



Estimation of Water Footprint in Rice Production and Evaluation of the Factors Influencing It from the Perspective of Farmers' Traditional Knowledge*

M. Omid nowbijar * , **H. Barani**, **M. R. Forouzeh** and **A. Abedi sarvestani**

Ph.D. in Range science and engineering, Department of Rangeland Management, Faculty of rangeland and watershed management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran.

maedeh.omidi@gmail.com

Associate Prof., Department of Rangeland Management, and Faculty of rangeland and watershed management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. baranihossein@yahoo.com

Associate Prof., Department of Rangeland Management, and Faculty of rangeland and watershed management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. rfroozeh@yahoo.com

Associate Prof., Department of Agricultural Extension and Education, Faculty of agricultural management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. abedi@gau.ac.ir

Article Info

Research Article

Received: September 03, 2025

Accepted: January 25, 2026

Keywords:

Rice water footprint, Blue water, Green water, Grey water

Corresponding author's email:

maedeh.omidi@gmail.com

Abstract

This study aimed to assess the water footprint of rice cultivation and the evaluation of factors influencing it from the perspective of traditional knowledge during the 2022 cropping season in Gilan Province. A mixed-methods approach was adopted, combining quantitative and qualitative analyses. The volumetric method was applied to calculate the water footprint, including direct footprint estimated with CropWat 8.0 and the indirect water footprint was calculated as the product of each input quantity and its corresponding global average water footprint coefficient. Traditional knowledge was investigated using ethnographic methods, and the findings were analyzed through coding with MAXQDA 2020. Results indicated that annual mean direct water footprint of rice was approximately $1,982 \text{ M}^3 \cdot \text{ton}^{-1} \cdot \text{year}^{-1}$, of which 75% was blue water, 16% green water, and 9% grey water. The indirect water footprint was estimated at $53 \text{ M}^3 \cdot \text{t}^{-1} \cdot \text{Year}^{-1}$, while water use efficiency in rice production was $0.49 \text{ kg} \cdot \text{M}^{-3} \cdot \text{Year}$. Additionally, irrigation losses were estimated at $6,701 \text{ M}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{Year}^{-1}$. Farmers recognized the effectiveness of practices in managing water, land, seed, and transplanting, with contributions of 50%, 40%, and 10%, respectively, to reducing the water footprint. Given the proportion of green and blue water footprints in Gilan Province compared to other regions of the country, as well as the strategic role of rice in ensuring food security, the continuation of rice production in this province is essential. In this regard, integrating traditional farmers' knowledge including land management, the utilization of indigenous varieties, and appropriate planting timing with modern management practices such as alternate wetting and drying irrigation can play an effective role in improving water consumption management. Furthermore, production planning based on regional-scale water footprint assessment, modification of consumption patterns, and strengthening of irrigation infrastructure will, while protecting water resources, enhance the resilience of the production system and ensure the sustainability of farmers' livelihoods.

Cite this article: Omid nowbijar, M., Barani, H., Forouzeh, M. R. and Abedi sarvestani, A., 2025. Estimation of Water Footprint in Rice Production and Evaluation of the Factors Influencing It from the Perspective of Farmers' Traditional Knowledge. *Journal of Water Research in Agriculture*, 39(3), pp. 303-319.



DOI: <https://doi.org/10.22092/jwra.2026.370555.1092>

* - This study is part of a larger project assessing water, carbon, and related footprints in agro-pastoral households. Since rice production is a key component of this socio-ecological livelihood system, it is naturally included among the study's outputs.



نشریه پژوهش آب در کشاورزی

<https://wra.areeo.ac.ir>

برآورد ردپای آب در تولید برنج و ارزیابی عوامل موثر بر آن از دیدگاه دانش سنتی کشاورزان *

مائه امید نوبیجار* , حسین بارانی، محمدرحیم فروزه و احمد عابدی سروستانی

دانش آموخته دکتری علوم و مهندسی مرتع، گروه مدیریت مرتع، دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان.

ایران. maedeh.omidi@gmail.com

دانشیار گروه مدیریت مرتع، دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. baranihossein@yahoo.com

دانشیار گروه مدیریت مرتع، دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. rfroozeh@yahoo.com

دانشیار گروه ترویج و آموزش کشاورزی، دانشکده مدیریت کشاورزی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. abedi@gau.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
مقاله پژوهشی	این پژوهش با هدف ارزیابی ردپای آب کشت برنج و ارزیابی عوامل موثر بر آن از دیدگاه دانش سنتی در سال زراعی ۱۴۰۱ و در استان گیلان انجام شد. روش مطالعه یک رویکرد ترکیبی (کمی و کیفی) بود که در آن ردپای آب به روش حجمی شامل ردپای مستقیم آب از نرم افزار CropWat8.0 و ردپای غیرمستقیم از حاصلضرب کمی هر نهاده در ضریب جهانی آب آن محاسبه شد. همچنین بررسی دانش سنتی با روش مردم‌نگاری و تحلیل نتایج آن با روش کدگذاری به کمک نرم‌افزار MAXQDA 2020 صورت پذیرفت. میانگین ردپای مستقیم آب برنج حدود ۱۹۸۲ متر مکعب بر تن در سال بود که ۷۵٪ آن ردپای آب آبی، ۱۶٪ آن ردپای آب سبز و ۹٪ آن ردپای آب خاکستری بود. ردپای غیرمستقیم آب برنج نیز ۵۳ متر مکعب بر تن در سال است. همچنین کارایی مصرف آب در محصول برنج ۰/۴۹ کیلوگرم بر مترمکعب در سال و تلفات آبیاری برابر با ۶۷۰۱ مترمکعب در هکتار در سال برآورد شد. کشاورزان، دانش مدیریت آب، زمین، بذر و کاشت نشاء را با اثربخشی ۵۰، ۴۰ و ۱۰ درصد در ردپای آب برنج مؤثر می‌دانند. با توجه به سهم ردپای آب سبز و آبی استان گیلان در مقایسه با سایر مناطق کشور و نقش راهبردی برنج در تأمین امنیت غذایی، تداوم تولید این محصول در استان امری ضروری است. در این راستا، تلفیق دانش سنتی کشاورزان شامل مدیریت زمین، بهره‌گیری از ارقام بومی و زمان‌بندی مناسب کشت با روش‌های نوین مدیریتی مانند آبیاری متناوب، می‌تواند نقش مؤثری در بهبود مدیریت مصرف آب ایفا کند. همچنین، برنامه‌ریزی تولید مبتنی بر ارزیابی ردپای آب در مقیاس منطقه‌ای، اصلاح الگوهای مصرف و تقویت زیرساخت‌های آبیاری، ضمن حفاظت از منابع آب، موجب افزایش تاب‌آوری نظام تولید و پایداری معیشت کشاورزان خواهد شد.
واژه‌های کلیدی: ردپای آب برنج، ردپای آب آبی، ردپای آب سبز، ردپای آب خاکستری	
آدرس ایمیل نویسنده مسئول: maedeh.omidi@gmail.com	

استناد: امید نوبیجار، مائه، بارانی، حسین، فروزه، محمدرحیم، و عابدی سروستانی، احمد، ۱۴۰۴. برآورد ردپای آب در تولید برنج و ارزیابی عوامل موثر بر آن از دیدگاه دانش سنتی کشاورزان. نشریه پژوهش آب در کشاورزی، ۳۹ (۳)، صص. ۳۰۳-۳۱۹.



DOI: <https://doi.org/10.22092/jwra.2026.370555.1092>

* - پژوهش اخیر بخشی از یک تحقیق بزرگتر معطوف به محاسبه ردپای آب، کربن و غیره در بین خانوارهای نظام Agro-pastoralism (تلفیق دامداری و زراعت) بوده است. بدیهی است که محاسبه این شاخص‌ها مستلزم بررسی همه‌جانبه در تمامی زیربخش‌های تولیدی است و از آنجا که تولید برنج نیز بخشی از این نظام زیستی-معیشتی به‌شمار می‌رود، به‌طور طبیعی در زمره خروجی‌های این پژوهش قرار می‌گیرد.

مقدمه

چالش‌های پیش روی گرسنگی و غذای سالم در قرن حاضر نشان‌دهنده‌ی نیاز به تولید مواد غذایی پایدار است. برنج (*Oryza sativa*) غذای اصلی بیش از نیمی از انسان‌های جهان است و نقش محوری در امنیت غذایی دارد (ایوید و همکاران، ۲۰۲۱). این گیاه آب‌بر پس از گندم، غذای اصلی مردم ایران است و نقش ویژه‌ای در تغذیه، درآمد و اشتغال‌زایی در بخش کشاورزی دارد. با توجه به بحران آب در کشور، تداوم کشت این محصول با مشکلات متعددی روبه‌رو است (خدادادی و همکاران، ۱۴۰۳). آبیاری ناکارآمد در برنج باعث کاهش سریع سطح آب زیرزمینی و آلودگی آن می‌شود (ویجایاکومار و پادما، ۲۰۲۳). کاهش منابع آب نیازمند توجه به کارایی استفاده از آب و حفظ کیفیت آن است. همچنین، کشت برنج ارتباط نزدیکی با درآمد کشاورزان دارد و کاهش درآمد به‌طور منفی بر معیشت آن‌ها تأثیر می‌گذارد (آرونرات و همکاران، ۲۰۲۲). نیاز آبی برنج به عوامل زیادی از جمله ژنتیک ارقام، شرایط محیطی، طول دوره رشد، پارامترهای آب‌وهوایی، نوع خاک و دیگر شرایط هیدرولوژیک بستگی دارد (ویجایاکومار و پادما، ۲۰۲۳).

متداول‌ترین معیار استفاده شده برای ارزیابی مصرف آب، ردپای آب^۱ بوده و نشان‌دهنده‌ی حجمی از آبی است که به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم در فرآیند تولید یک محصول و یا خدمات به مصرف می‌رسد. این شاخص به‌صورت متر مکعب یا لیتر برای هر واحد از محصول محاسبه می‌شود (هریس و همکاران، ۲۰۲۰). رویکرد شناخته‌شده در ارزیابی ردپای آب شامل ردپای آب حجمی است و از سه بخش ردپای آب سبز، آبی و خاکستری تشکیل شده است. ردپای آب سبز، حجم آب باران مصرف‌شده در طول تولید محصول است، ردپای آب آبی، نشانگر حجم آب استفاده شده از آب‌های سطحی یا زیرزمینی برای تولید محصول و ردپای آب خاکستری، نشانگر میزان آلودگی آب ناشی از فعالیت‌های انسانی

(کشاورزی، صنعت یا مصرف خانگی) است و به‌عنوان مقدار آب شیرین مورد نیاز برای رقیق کردن آب آلوده به استانداردهای پذیرفته‌شده کیفیت آب تعریف می‌شود (داس و همکاران، ۲۰۲۱).

با توجه به ارزش آب در کشاورزی و محدودیت این منبع مهم برنامه‌ریزی و راهکارهای اجرایی مناسب از جمله توجه به نظام مدیریت محلی و مشارکت افراد جامعه روستایی متناسب با امکانات و روش‌های سنتی آبیاری ضروری است (دلجوئی راد و همکاران، ۱۳۹۴). دانش سنتی بخش جدایی‌ناپذیری از سیستم دانش هر کشوری است و به‌عنوان دانشی توصیف می‌شود که طی نسل‌ها زندگی در یک منطقه خاص جمع‌آوری شده و امکان معیشت ایمن را فراهم می‌کند (دوگیون، ۲۰۲۴). سیستم کشت سنتی به دانش سنتی کشاورزان در انجام فعالیت‌های مربوطه تبدیل شده و شامل رویکردهای مختلف در پاسخ به مشکلات مرتبط با تأمین نیازهای غذایی و محیط‌زیست است (روسادا و همکاران ۲۰۲۴). یادگیری دانش سنتی و انجام پژوهش‌هایی در زمینه داشته‌ها و دانسته‌های جوامع محلی می‌تواند شناخت شرایط را بهبود بخشیده و زمینه‌ی مناسبی را برای انجام فعالیت‌های توسعه ایجاد نماید (دلجوئی راد و همکاران، ۱۳۹۴).

مطالعات مختلفی در زمینه‌ی ردپای آب برنج انجام شده است. از جمله ایوید و همکاران (۲۰۲۱) ردپای آب شلتوک برنج در عراق را مورد محاسبه قرار دادند. پژوهش‌ها نشان داده که کشت برنج در کشور عراق به دلیل شرایط اقلیمی و روش‌های آبیاری سنتی بسیار آب‌بر است و نیازمند رویکردهای مناسب برای بهبود مدیریت آب و کاهش ردپای آن برای تضمین امنیت غذایی در آینده دارد. کاشیاپ و آگاروال (۲۰۲۱)، ردپای آب تولید شلتوک برنج در هند را بررسی و اظهار کردند که دولت نقش اصلی را در کاهش ردپای آب با بازنگری سیاست‌های حفاظت از منابع و پذیرش فناوری دارد. آرونرات و همکاران (۲۰۲۲) به مطالعه ردپای آب برنج ارگانیک و متعارف در تایلند

پرداختند و بیان داشتند که آب خاکستری در روش متعارف به دلیل استفاده از کودهای شیمیایی، علفکش‌ها و آفت‌کش‌ها به‌طور قابل توجهی بیشتر از روش ارگانیک بود. شیخ زین‌الدین و قیاسی (۱۴۰۲) به ارزیابی ردپای آب و کارایی مصرف آب در محصول برنج در استان‌های مختلف ایران پرداختند و نتیجه گرفتند که کشت برنج در استان‌های با نیاز آبی بالا باید متوقف شود. همچنین، دانش سنتی در سامانه‌های کشاورزی جهان مورد واکاوی قرار گرفته است. سینگ (۲۰۱۴)، دانش کشاورزی بومی در سامانه‌های کشت برنج دیم در هند را بررسی و بیان نمود که جوامع کشاورز بومی، شناخت عمیقی از زیست‌بوم‌های محلی، سلامت خاک، الگوهای آب‌وهوایی و مدیریت محصول ایجاد کرده‌اند که نسل به نسل منتقل شده است. دیویا و همکاران (۲۰۲۴)، به دانش سنتی در شیوه‌های کشاورزی پایدار در هند پرداختند و نتیجه گرفتند که با توجه به چالش‌های زیست‌محیطی کشاورزی مدرن مانند تغییرات آب‌وهوایی و تخریب خاک، یکپارچه‌سازی دانش سنتی با روش‌های علمی، مسیری را برای سامانه‌های کشاورزی انعطاف‌پذیرتر فراهم می‌کند. پوتوسوکاتری و همکاران (۲۰۲۴)، خرد سنتی در کشت برنج پایدار را در کشور بالی مطالعه کرده و نشان دادند که با وجود تغییرات نسلی و چالش‌ها، کشاورزان به حفظ شیوه‌های فرهنگی پایبند هستند، هرچند تفاوت‌هایی بین شرایط ایده‌آل و واقعی وجود دارد.

شناخت پیامدهای اکولوژیک فعالیت‌های انسانی، از جمله ردپای آب برای حفظ تنوع زیستی و خدمات زیست‌بوم ضروری است. تحقیقات ردپای نیازمند همکاری میان متخصصان حوزه‌های مختلف، شناخت جامع مسائل زیست‌محیطی، اجتماعی و تشویق راه‌حل‌های نوآورانه است. استان گیلان به دلیل شرایط آب‌وهوایی مساعد، خاک حاصلخیز و دسترسی به منابع آب از اهمیت ویژه‌ای در زمینه‌ی کشاورزی برخوردار است. این استان به‌عنوان یکی از قطب‌های اصلی تولید برنج در ایران، با چالش‌هایی مانند کمبود منابع آب مواجه است که لزوم کاهش مصرف آب

در کشت برنج را بیش‌ازپیش نمایان می‌سازد. پژوهش حاضر با هدف تعیین ردپای آب کشت برنج و ارزیابی عوامل مؤثر بر آن از دیدگاه دانش سنتی انجام شد. صرفه‌جویی در آب برای کشاورزی پایدار و ایجاد امنیت غذایی مهم است. در نتیجه، مدیریت منابع آب در استان گیلان نه‌تنها یک ضرورت زیست‌محیطی بلکه یک ضرورت اقتصادی و اجتماعی بوده که نیازمند برنامه‌ریزی دقیق، سرمایه‌گذاری در فناوری‌های نوین و مشارکت همگانی است. بررسی ردپای آب و دانش مدیریت محلی مرتبط به کسب‌وکارها، دولت‌ها و افراد کمک می‌کند تا درباره‌ی استفاده از منابع تصمیم‌گیری کنند و فرصت‌هایی را برای کاهش اثرات زیست‌محیطی، ترویج توسعه پایدار و تضمین آینده‌ای انعطاف‌پذیر مهیا سازند.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

استان گیلان در شمال ایران و در ۳۶ درجه و ۳۳ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۲۷ دقیقه عرض شمالی و ۴۸ درجه و ۳۲ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۳۶ دقیقه طول شرقی قرار گرفته است. منطقه مورد مطالعه شامل ۱۴ روستا در شهرستان‌های لاهیجان، سیاهکل، رشت، شفت و لنگرود است. مجموع مساحت این شهرستان‌ها ۳۶۵۱ کیلومتر مربع (سرشماری نفوس و مسکن، ۱۳۹۵)، میانگین بارندگی و دمای سالانه به ترتیب حدود ۱۳۴۱ میلی‌متر و ۱۴/۶۰ درجه سانتی‌گراد و آب‌وهوای آن معتدل مرطوب و سرد مرطوب است (هواشناسی گیلان، ۱۴۰۴) (جدول ۱). در این مناطق فصل کشت برنج از اردیبهشت هر سال آغاز شده و در شهریور طی یک دوره ۱۲۰ روزه به پایان می‌رسد. در اردیبهشت‌ماه، نشاءکاری و در خرداد و تیرماه، وجین و دوباره وجین انجام می‌شود و در اواسط مردادماه نیز برداشت محصول برنج شروع و تا شهریور ادامه می‌یابد. رقم غالب منطقه رقم هاشمی است و واحد اندازه‌گیری سنتی زمین، درز معادل ۱۰ متر مربع است.

جدول ۱- جزئیات مربوط به منطقه‌ی مورد مطالعه

ردیف	نام روستا	شهرستان	زبان و گویش	تعداد خانوار
1	نوبیجار	لاهیجان	گیلکی - بیه پیش	2
2	حاج سلیم محله	لاهیجان	گیلکی - بیه پیش	1
3	سپهرپشت	لاهیجان	گیلکی - بیه پیش	1
4	گورندان	لاهیجان	گیلکی - بیه پیش	2
5	شیخ علی کلايه	لاهیجان	گیلکی - بیه پیش	1
6	پاشاکی	لاهیجان	گیلکی - گالشی	2
7	گلکش	لاهیجان	گیلکی - گالشی	2
8	علی بزابه	رشت	گیلکی - بیه پس	2
9	چپک ناظمی	رشت	گیلکی - بیه پس	3
10	اشکراب	سیاهکل	گیلکی - گالشی	3
11	سلس	سیاهکل	گیلکی - گالشی	2
12	خرفکل	شفت	تالشی - تالشی جنوبی	3
13	ویسرود	شفت	تالشی - تالشی جنوبی	2
14	لطفعلی گواپر	لنگرود	گیلکی - گالشی	5
مجموع				30

روش کار

پژوهش حاضر با رویکرد ترکیبی (کیفی - کمی) در سال زراعی ۱۴۰۱ اجرا شد. این روش، امکان آگاهی جامع از موضوع را با ثبت تجربیات زیسته و برداشت‌های کشاورزان (داده‌های کیفی) و نتایج قابل اندازه‌گیری (داده‌های کمی) فراهم می‌کند. جامعه‌ی آماری شامل شالی‌کارانی بود که به‌طور سنتی و خانوادگی برنج رقم هاشمی تولید می‌کردند و با استفاده از نمونه‌گیری هدفمند^۱ و تکنیک گلوله برفی^۲، ۳۰ خانوار (۶۰ اطلاع‌رسان^۳ کلیدی؛ میانگین دو نفر در هر خانوار) انتخاب شدند. در هر منطقه، مزارع به‌گونه‌ای انتخاب گردید که شرایط و ویژگی‌های حاکم بر مزرعه و مدیریت زارع معرف کل منطقه باشد. حجم نمونه کوچک به دلیل ماهیت فشرده فرآیند جمع‌آوری داده‌ها و جزئیات بیشتر مورد نیاز برای این نوع تجزیه و تحلیل، ضروری است. معیار گزینش، داشتن حداقل ۱۵ سال تجربه مداوم کشت و تداوم شیوه‌های بومی بود و جمع‌آوری داده تا رسیدن به اشباع نظری^۴ ادامه یافت. داده‌های کیفی شامل رویکرد سنتی متعارف با روش

مردم‌نگاری^۵ از طریق مشاهده مشارکتی، مصاحبه‌ی نیمه‌ساختارمند و یادداشت‌برداری میدانی بود. به‌منظور نظرخواهی از کشاورزان، مفهوم ردپای آب به‌صورت غیرمستقیم و از طریق مؤلفه‌های ملموس مصرف آب در فرایند تولید برنج به آن‌ها منتقل شد. در این راستا، به‌جای استفاده از اصطلاحات فنی، پرسش‌ها و مصاحبه‌ها بر پایه‌ی تجربه‌ی عملی کشاورزان از مصرف آب آبیاری، بهره‌گیری از بارندگی، مدیریت زهکش و مصرف نهاده‌ها طراحی شد و در مرحله‌ی تحلیل داده‌ها، نتایج به چارچوب مفهومی ردپای آب بازگردانده شد. داده‌های کمی با پرسشنامه‌ی ساختاریافته برای ثبت عملکرد شلتوک، مصرف نهاده‌ها (بذر، کود، سم، سوخت، نیروی انسانی) و مساحت مزرعه گردآوری شدند.

تحلیل محتوای کیفی بر اساس رویکرد ژرفانگر^۶ و با کمک نرم‌افزار MAXQDA 2020 انجام گرفت. مراحل کدگذاری باز^۷، محوری^۸ و انتخابی^۹ به ترتیب اجرا شد و نقشه‌ی مفهومی با ابزار Max Maps ترسیم گردید. در این روش، داده‌ها به‌صورت واحدهای معنادار مجزا در

6-Interpretive Approach
7-Open Coding
8-Axial Coding
9-Selective Coding

1-Purposeful Sampling
2-Snowball Sampling
3-Informants
4-Theoretical Saturation
5-Ethnography

می‌آیند و هدف اصلی آن شناسایی، نام‌گذاری، مفهوم‌سازی داده‌ها و توصیف پدیده‌ها است. اثربخشی مفاهیم به کمک تخصیص امتیاز^۱ به روش مردم‌نگاری و به‌صورت میانگین درصد ارائه شد. این امتیازدهی بر اساس اهمیت و تأثیری است که هر عامل در ذهن و رفتار یک کشاورز دارد و عوامل در بازه صفر تا ۱۰۰ درصد امتیازبندی شدند. همچنین فاکتورهای فراوانی ثبت نسبی یا استناد^۲ یعنی نسبت تعداد افراد آگاه بومی بر کل افراد اطلاع‌رسان تعیین شد. اعتبار یافته‌ها از طریق بازبینی توسط مشارکت‌کنندگان^۳، مثلث‌سازی داده‌ها^۴ (مصاحبه، مشاهده، اسناد محلی) و بازبینی همکاران^۵ ادامه یافت تا اطمینان حاصل شود که تمامی مفاهیم و مقوله‌های اصلی شناسایی شده‌اند. در بخش کمی و مشخصات فنی کشت برنج، عملکرد شلتوک شامل رقم هاشمی و مصرف نهاده‌ها در هر مزرعه توسط پرسشنامه و مصاحبه با کشاورزان در پایان فصل زراعی ثبت گردید. مقادیر ارائه‌شده پاسخ کشاورزان در مورد الگوی مصرف مزارع نمونه هستند و ممکن است با میانگین کل استان یا توصیه‌های فنی تفاوت داشته باشند. این مقادیر در محاسبه ردپای آب محصول به کار گرفته شدند. در بخش ردپای مستقیم آب، به‌منظور محاسبه تبخیر-تعرق گیاه از نرم‌افزار CropWat8.0 برای ارزیابی مصرف آب محصول برنج شامل بارندگی مؤثر و آبیاری استفاده شد. داده‌های ماهانه هواشناسی ایستگاه سینوپتیک شامل میانگین دمای حداقل، دمای حداکثر، رطوبت نسبی، سرعت باد و ساعات آفتابی به‌عنوان متغیر ورودی مدل به کار رفت (سایت هواشناسی کل کشور، ۱۴۰۴) و مشخصات گیاه و خاک نیز با استفاده از منابع معتبر تعیین شد (مرزی و همکاران، ۱۳۹۴؛ پندی و همکاران، ۱۴۰۲؛ آلن و همکاران، ۱۹۹۸؛ فائو، ۲۰۱۹). همچنین نمودار تحلیلی داده‌های این بخش با استفاده از نرم‌افزار اکسل نسخه ۲۰۱۳ ترسیم شد.

ردپای کل آب (WF) در فرآیند رشد برنج (WF_{total})، متر مکعب بر تن در سال) مجموع آب سبز، آبی و خاکستری است (آرونرات و همکاران، ۲۰۲۲؛ کاشیپ و آگاروال، ۲۰۲۱؛ شیخ زین‌الدین و قیاسی، ۱۴۰۲).

$$WF_{total} = WF_{green} + WF_{blue} + WF_{grey} \quad (۱)$$

ردپای آب سبز (WF_{green}) و ردپای آب آبی (WF_{blue}) به ترتیب با استفاده از معادلات (۲) و (۳) محاسبه می‌شوند (آرونرات و همکاران، ۲۰۲۲؛ کاشیپ و آگاروال، ۲۰۲۱؛ شیخ زین‌الدین و قیاسی، ۱۴۰۲).

$$WF_{green} = CWU_{green} / Y = 10 \sum_{d=1}^{l_{gp}} ET_{green} / Y \quad (۲)$$

$$WF_{blue} = CWU_{blue} / Y = 10 \sum_{d=1}^{l_{gp}} ET_{blue} / Y \quad (۳)$$

$$ET_{green} = \min(ET_c, P_{eff}) \quad (۴)$$

$$ET_{blue} = \max(0, ET_c - P_{eff}) \quad (۵)$$

که در آن: CWU^6 مصرف آب محصول (متر مکعب در هکتار در سال)، ET_{green} تبخیر و تعرق آب سبز (میلی‌متر در روز)، ET_{blue} تبخیر و تعرق آب آبی (میلی‌متر در روز)، l_{gp} دوره رشد، Y عملکرد برنج (تن در هکتار در سال)، P_{eff} بارندگی مؤثر در دسترس و ET_c تبخیر و تعرق محصول است. مقدار صفر زمانی در نظر گرفته می‌شود که P_{eff} بیشتر از تبخیر و تعرق محصول باشد.

ردپای آب خاکستری (WF_{grey}) با استفاده از معادله زیر محاسبه شد.

$$(WF_{grey} = \alpha * AR / (C_{max} - C_{nal})) / Y \quad (۶)$$

که در آن α کسر آبشویی و رواناب است که ۱۰٪ نیتروژن تعیین شد. AR میانگین نرخ کاربرد ماده شیمیایی نیتروژن در مزرعه برحسب کیلوگرم بر هکتار است. C_{max} حداکثر غلظت قابل قبول آلاینده (نیتروژن) برای یک منبع آب معین است که ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر در نظر گرفته شد

^۴-Data Triangulation

^۵-Peer Review

^۶-Consumptive water use

^۱-Point Allocation

^۲-Relative Frequency of Citation (RFC)

^۳-Member Checking

و C_{nal} غلظت طبیعی نیتروژن صفر میلی گرم بر لیتر است. Y میانگین عملکرد محصول (تن بر هکتار در سال) است (کاشیپ و آگاروال، ۲۰۲۱؛ شیخ زین الدین و قیاسی، ۱۴۰۲).

ردپای غیرمستقیم آب گیاه برنج از حاصل ضرب هر نهاده در ضریب جهانی آب آن به دست آمد. بعد از محاسبه اجزای ردپای آب، کارایی مصرف آب^۱ در محصول برنج بررسی شد. این شاخص مهم به منظور سنجش مقدار بهره‌وری آب کشاورزی است و با استفاده از بهره‌وری عامل جزئی آب^۲ محاسبه شد که از تقسیم عملکرد محصول بر مقدار آب مصرفی در هر هکتار تعیین می‌شود. هر چه این نسبت بزرگ‌تر باشد نشان‌دهنده‌ی مصرف صحیح‌تر آب است (شیخ زین الدین و قیاسی، ۱۴۰۲).

$$WUE = 100 * (Y / WF_{Total}) \quad (7)$$

در این معادله WUE ، کارایی مصرف آب (بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب در سال)، WF ردپای کل آب محصول برنج (بر حسب متر مکعب بر هکتار در سال) و Y عملکرد در واحد هکتار (بر حسب کیلوگرم بر هکتار در سال) است.

مفهوم ردپای آب بر میزان آب مصرف‌شده و غیرقابل بازگشت در فرآیند تولید تمرکز دارد و در محاسبات، تلفات ناشی از انتقال و توزیع آب آبیاری، نفوذ عمقی و رواناب منجر به بازگشت آب به سامانه هیدرولوژی لحاظ نمی‌شود (هوکسترا و همکاران، ۲۰۱۱). با این حال برای ایجاد تصویر کامل‌تری از مدیریت آب، تلفات آب آبیاری نیز از معادله‌های زیر برآورد شد. به این صورت که ابتدا نیاز آبیاری ناخالص با در نظر گرفتن راندمان آبیاری محاسبه شد. سپس تلفات آبیاری به عنوان اختلاف بین نیاز آبیاری ناخالص و نیاز آبیاری خالص تعریف گردید.

$$GIWR = NIWR * \varepsilon * 10 \quad (8)$$

$$IL = GIWR - NIWR \quad (9)$$

$GIWR$ ^۳ نیاز آبیاری ناخالص (مترمکعب بر هکتار)، $NIWR$ ^۴ نیاز آبیاری خالص میزان آبی که گیاه نیاز دارد و باید تأمین شود (میلی متر)، ε ، راندمان آبیاری^۵ یعنی نسبت آب تحویلی به مزرعه که توسط گیاه مصرف می‌شود که عدد میانگین راندمان در بخش شرقی و مرکزی شبکه آبیاری سفیدرود به میزان ۳۸ در نظر گرفته شد، ۱۰ برای تبدیل میلی متر به مترمکعب بر هکتار و IL ^۶ تلفات آبیاری است (آلن و همکاران، ۱۹۹۸؛ پارسی‌نژاد و همکاران، ۲۰۰۹).

به منظور بررسی پایداری نتایج نسبت به عدم قطعیت داده‌های خوداظهاری، تحلیل حساسیت تک‌متغیره^۷ با اعمال تغییر $\pm 10\%$ درصدی بر متغیرهای کلیدی شامل عملکرد محصول، مصرف نیتروژن حاصل از منبع کود اوره (در محاسبه ردپای آب خاکستری) و نهاده‌های اصلی تأثیرگذار شامل کود شیمیایی، بذر و سوخت انجام شد.

نتایج

خصوصیات نظام کشت برنج در منطقه مورد مطالعه

جامعه‌ی آماری مورد بررسی به طور میانگین دارای ۸۰۰۰ متر مربع زمین کشاورزی برنج به ازای هر خانوار است. منابع آب استفاده‌شده در منطقه برای تأمین نیاز آبی گیاه برنج شامل آب‌های حاصل از بارندگی، به‌ویژه در ماه‌های رشد برنج، آب رودخانه‌ها، سد سفیدرود و آب-بندان‌ها است. برنامه آب‌گذاری شرکت آب منطقه‌ای گیلان به طور مستقیم با تقویم زراعی هماهنگ و شامل مراحل پیوسته و نوبتی است. آب‌گذاری اولیه (پیوسته)، معمولاً از اوایل اردیبهشت‌ماه آغاز می‌شود و تا پایان اردیبهشت به صورت پیوسته ادامه دارد. این مرحله برای تأمین آب کافی برای نشاء برنج ضروری است. آب‌گذاری نوبتی پس از اتمام مرحله نشاکاری (معمولاً از ابتدای خرداد)، انجام می‌شود. این نوبت‌بندی بر اساس وضعیت ذخیره آب سد سفیدرود و نیاز آبی مناطق مختلف تعیین می‌گردد. برنامه

5-Irrigation Efficiency

6-Irrigation losses

7-One-Way Sensitivity Analysis یا One-Variable-at-a-Time

1-Water Use Efficiency

2-Partial Factor Productivity of Water (PFPW)

3-Gross Irrigation Water Requirement

4-Net Irrigation Water Requirement

نوبت‌بندی معمولاً به صورت «چهار روز قطع و هشت روز وصل» اجرا می‌شود. این به این معنی است که آب به مدت چهار روز قطع و سپس به مدت هشت روز وصل خواهد بود. این نوبت‌بندی تا اواخر تیرماه یا اوایل مرداد (بسته به نیاز و شرایط آب‌وهوایی) ادامه دارد.

میزان سم و کود شیمیایی، برای هر هکتار ۱۰۸ کیلوگرم کود اوره معروف به کود سفید با ۴۶ درصد نیتروژن و معادل ۵۰ کیلوگرم نیتروژن خالص، ۵۹ کیلوگرم کود فسفاته معروف به کود سیاه، ۴۷/۵۰ کیلوگرم کود سولفات پتاسیم، برای خوشه‌زایی و سالم بودن ساقه و همچنین میزان بذر مصرفی ۱۰۸ کیلوگرم در هکتار است که در اصطلاح محلی به آن تخم جو گفته می‌شود. برای کنترل علف‌های هرز، به ازای هر هکتار زمین سه لیتر علف‌کش از جمله پیش‌رویشی بوتاکلر، مبارزه با آفات، سه لیتر حشره‌کش شامل دیازینون و ۰/۷ لیتر قارچ‌کش مانند بیم (تریسیکل‌ازول) برای کنترل بلاست کاربرد دارد. مقادیر گزارش‌شده کود دامی ۲۹ کیلوگرم در هکتار است و

نشان‌دهنده‌ی مصرف محدود و موردی بوده و در بسیاری از مزارع این نهاده حذف شده است.

کشت عمدتاً به نیروی کار دستی وابسته بوده و نیروی انسانی موردنیاز بسته به درجه مکانیزاسیون شامل فعالیت در مراحل کاشت، داشت و برداشت است. شخم و آماده‌سازی زمین عمدتاً توسط مردان، کاشت و وجین توسط زنان و برداشت به صورت مشارکتی توسط همه اعضای خانوار انجام می‌شود. در شالیزارهای مورد مطالعه، به ازای هر هکتار ۷۰ تا ۹۰ نفر-روز نیروی کار طی کل فصل رشد (حدود ۱۲۰ روز) نیاز است که معادل فعالیت ۰/۶ تا ۰/۷۵ نفر به صورت ثابت در طول فصل است. حتی در حالت نیمه مکانیزه نیز به دلیل خرد بودن اراضی (میانگین ۰/۸ هکتار)، استفاده محدود از دستگاه نشاکار و دروگر و عملیات دستی (تنظیم و حمل سینی نشا، وجین، جمع‌آوری کاه، نظارت بر ماشین‌آلات و غیره) مقدار نیروی کار انسانی همچنان بالا است و تنها حدود ۲۰ نفر-روز در هکتار کاهش می‌یابد (جداول ۲ و ۳).

جدول ۲- برآورد نیروی کار انسانی مورد نیاز برای تولید یک هکتار برنج هاشمی در شالیزارهای منطقه‌ی مورد مطالعه (نفر-روز در هکتار)*

ردیف	عملیات	کشت سنتی	کشت نیمه مکانیزه	توضیحات
۱	آماده‌سازی زمین	۱۵	۱۵	شخم با تیلر، مرزبندی و تسطیح دستی
۲	تهیه خزانه و نشاکاری	۳۵	۱۵	در حالت مکانیزه: تنظیم و حمل سینی، نظارت بر دستگاه، اصلاح دستی
۳	داشت (وجین، کودپاشی، سم‌پاشی)	۳۰	۳۰	وجین دستی
۴	برداشت و جمع‌آوری	۱۰	۱۰	حمل محصول، جمع‌آوری کاه، نظارت بر دروگر، بارگیری و غیره
۵	جمع کل (نفر-روز در هکتار)	۹۰	۷۰	طی ۱۲۰ روز فصل رشد (۰/۷۵-۰/۶ نفر ثابت)

* مدت‌زمان انجام کار مفید هر کارگر هشت ساعت در روز در نظر گرفته شده است
* نفر-روز در هکتار به معنای مجموع روزهای کاری یک نفر برای یک هکتار است

جدول ۳- میانگین مصرف گزارش شده نهاده‌ها و تولیدات کشت برنج هاشمی توسط کشاورزان (پرسشنامه - سال زراعی ۱۴۰۱)
(L/ha و kg/ha)

ردیف	مصارف	واحد مصرف	مقدار
1	بذر	kg /ha	108.54
2	نیروی انسانی	Mj/ha	873.46
3	سوخت	L/ha	84.5
4	کود حیوانی	kg/ha	29.17
5	کود اوره	kg / ha	108.13
6	کود فسفات	kg / ha	59.17
7	کود پتاس	kg / ha	47.50
8	علف‌کش	kg/ ha	2.84
9	قارچ‌کش	kg/ ha	0.68
10	حشره‌کش	kg/ ha	3.24
11	زمین زراعی	ha	0.8
12	شلتوک	Ton/ha	۱2.77
13	کاه و کلش	Ton/ha	3.33

ردپای مستقیم و غیرمستقیم آب

میانگین تبخیر- تعرق واقعی (ET_c) محصول ۴۹۹ میلی‌متر در یک دهه (۱۰ روز)، نیاز آبیاری (IR) ۴۱۱ میلی‌متر و بارندگی مؤثر (P_{eff}) ۸۸ میلی‌متر در یک دهه بود. همچنین با در نظر گرفتن راندمان آبیاری ۳۸ درصد، نیاز آبیاری ناخالص معادل ۱۰۸۲ میلی‌متر یا ۱۰۸۲۲ متر مکعب بر هکتار و تلفات آبیاری برابر با ۶۷۱ میلی‌متر (۶۷۰۱ مترمکعب در هکتار) است. این نتایج بیانگر آن است که بخش عمده‌ای از آب برداشت‌شده از منابع آبی در قالب تلفات آبیاری از چرخه مصرف گیاه خارج می‌شود (جدول ۴). در محاسبه ردپای غیرمستقیم آب، میانگین ردپای آب جهانی برای نهاده‌ی سموم (حشره‌کش، علف‌کش و قارچ‌کش) یافت نشد و در مورد انواع کود شیمیایی تنها میانگین ردپای آب جهانی (ضریب) برای کود اوره وجود داشت و سایر کودها نیز با این میانگین ارزیابی شدند (جدول ۵). نتایج ردپای مستقیم آب برای کشت برنج نشان داد که ردپای آب آبی ۱۴۸۵، ردپای آب سبز، ۳۱۷ و ردپای آب خاکستری، ۱۸۰ متر مکعب بر تن است. میانگین سالانه ردپای آب مستقیم برنج در سال ۱۴۰۱، ۱۹۸۲ متر مکعب

بر تن در سال و ۵۴۸۹ متر مکعب بر هکتار در سال است که ۷۵٪ آن ردپای آب آبی و ۱۶٪ آن ردپای آب سبز و نه درصد آن ردپای آب خاکستری است. میانگین سالانه ردپای آب غیرمستقیم برنج ۵۳ متر مکعب بر تن در سال و ۱۴۷ متر مکعب بر هکتار در سال است. در نهایت، ردپای آب کل حدود ۲۰۳۵ متر مکعب بر تن در سال و ۵۶۳۶ متر مکعب بر هکتار در سال است. همچنین کارایی مصرف آب در محصول ۰/۴۹ کیلوگرم بر مترمکعب در سال است (جدول ۶ و ۷ و شکل ۱).

نتایج تحلیل حساسیت نشان داد که ردپای آب گیاه برنج بیشترین حساسیت را نسبت به عملکرد محصول دارد و این عامل بیشترین تأثیر را بر ردپای کل می‌گذارد؛ کاهش ۱۰ درصد عملکرد باعث افزایش حدود ۱۱ درصد و افزایش ۱۰ درصد عملکرد باعث کاهش حدود نه درصد در ردپای آب می‌شود. همچنین عدم قطعیت در مصرف نیتروژن از منبع کود اوره و سایر نهاده‌ها تنها تغییرات جزئی (کمتر از یک درصد) در ردپای کل آب ایجاد می‌کند. تغییرات مصرف نیتروژن از منبع کود اوره (ردپای خاکستری) حدود $\pm ۰/۹$ درصد در ردپای کل آب اثر دارد

۱- برنج هاشمی از نوع کم محصول است و در تحقیقات پایلوت بازه‌ای بین ۱/۵ تا ۵/۵ تن بر هکتار تولید دارد (شهبازی و همکاران، ۱۳۹۶؛ کاوسی و یزدانی، ۱۳۹۹؛ قناعتی گیل پردسری و همکاران، ۱۴۰۱).

و نشان‌دهنده حساسیت متوسط این متغیر است. نهاده‌های دیگر شامل کود شیمیایی، بذر و سوخت (ردپای آب غیرمستقیم) اثر بسیار کمی بر ردپای کل آب دارند، به‌طوری‌که تغییر ± 10 درصد در مصرف آن‌ها کمتر از ۰/۵ درصد ردپای آب را تغییر می‌دهد (جدول ۸).

جدول ۴- نیاز آبی گیاه برنج در منطقه‌ی مورد مطالعه

ردیف	ET ₀ (mm/d)	ET _c (mm/dec)	P _{eff} Eff. Rain (mm/dec)	IR (mm/dec)	Planting &Harvesting date	CWU m ³ /ha			IL m ³ /ha
						Total	green	Blue	
1	2.27	498.95	87.7	411.25	اردیبهشت تا شهریور	4989.5	877	4112.5	6701

جدول ۵- ردپای آب غیرمستقیم شلتوک برنج بر حسب وزن محصول و مساحت زیر کشت (m³/ha) و (m³/ton) در منطقه‌ی مورد مطالعه

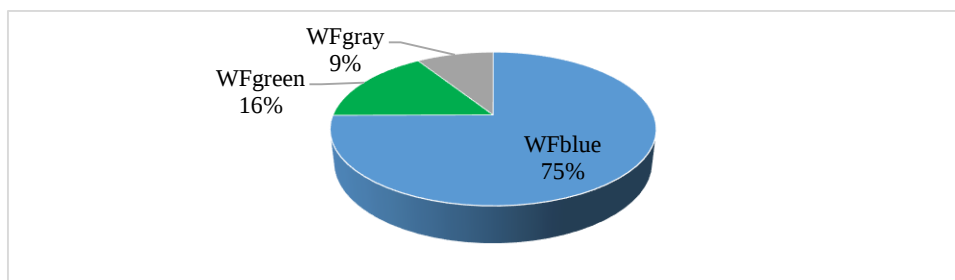
ردیف	آیتم	میزان مصرف (L/ha) / (kg/ha)	ردپای آب جهانی (m ³ /ton)	ردپای آب غیرمستقیم بر حسب وزن (m ³ /ton)	ردپای آب غیرمستقیم بر حسب مساحت (m ³ /ha)
1	بذر	108.54	1325 (چاگان و هوکسترا، 2010)	51.92	143.82
2	کود شیمیایی	214.8	12.8 (فیاملا و همکاران، 2020)	0.99	2.75
3	گازوئیل	84.5	0.30 (سان و همکاران، 2018)	0.01	0.03
4	مجموع			52.92	146.59

جدول ۶- ردپای آب خاکستری شلتوک برنج بر حسب وزن محصول و مساحت زیر کشت (m³/ha) و (m³/ton) در منطقه‌ی مورد مطالعه

ردیف	کل کود مصرفی (نیتروژن خالص) (ton /ha)	کسر نیتروژن رسیده به واسطه‌ی آبشویی یا رواناب (10 درصد)	C _{max} (mg/l)	مقدار مطلق ردپای آب خاکستری (M ³ /year)10 ⁶	عملکرد محصول (ton /ha)	ردپای آب خاکستری بر حسب وزن (m ³ /ton)	ردپای آب خاکستری بر حسب مساحت (m ³ /ha)
1	0.50	0.05	10	0.005	2.77	180.50	499.99

جدول ۷- انواع ردپای آب شلتوک برنج بر حسب (m³/ha) و (m³/ton) و کارایی مصرف آب محصول در منطقه‌ی مورد مطالعه

ردیف	انواع ردپا	ردپای آب کل				کارایی WUE (kg /m ³)
		WF ^{total} (m ³ /ha)	WF ^{total} (m ³ /ton)	WF ^{gray} (m ³ /ton)	WF ^{green} (m ³ /ton)	WF ^{blue} (m ³ /ton)
1	مستقیم	5489.49	1981.75	180.50	316.60	1484.65
2	غیرمستقیم	146.59	52.92	–	–	–
3	مجموع	5636.08	2034.67			



شکل ۱- نمودار درصد اجزای ردپای آب برنج در منطقه‌ی مورد مطالعه

جدول ۸ - تحلیل حساسیت تک‌متغیره رد پای آب گیاه برنج نسبت به متغیرهای کلیدی داده‌های خوداظهاری در منطقه‌ی مورد مطالعه

ردیف	متغیر	واحد	مقدار پایه	سناریو ۱۰-٪	رد پای آب (m ³ /ton)	سناریو ۱۰+٪	رد پای آب (m ³ /ton)	تغییر نسبت به رد پای آب پایه	نتیجه تحلیل حساسیت
1	عملکرد	(ton/ha)	2.77	2.49	2249.21	3.05	1836.24	+11٪-9٪	بیشترین حساسیت
2	نیتروژن موجود در اوره	(kg N/ha)	50	45	2003.86	55	2039.96	±0.89٪	اثر محدود
3	کود شیمیایی	(kg/ha)	214.8	193.32	2021.76	236.3	2021.96	±0.005٪	اثر ناچیز
4	بذر	(kg/ha)	108.54	97.7	2016.68	119.4	2027.06	±0.25٪	اثر جزئی
5	سوخت	(L/ha)	84.5	76.1	2021.86	92.95	2021.86	±0٪	اثر ناچیز

*: تحلیل حساسیت به روش تغییر تک‌متغیره و با اعمال تغییر ۱۰ ± درصدی بر هر متغیر انجام شد، درحالی‌که سایر متغیرها ثابت در نظر گرفته شدند

الگوی مصرف آب و دانش سنتی

در منطقه‌ی مورد مطالعه، دانش سنتی کشت به مجموعه‌ای از شیوه‌های تجربی مدیریت زمین، آب، بذر و کاشت نشاء اطلاق می‌شود که طی نسل‌ها در میان شالیکاران شکل گرفته و همچنان در مجموع با میانگین فراوانی ثبت نسبی ۰/۷ به کار می‌رود (شکل ۳). این روش‌ها، هرچند در بسیاری از مناطق برنج‌خیز ایران و جهان نیز شناخته‌شده و متداول هستند، اما در جامعه‌ی محلی مورد پژوهش به دلیل تداوم گسترده، انطباق با شرایط خردمقیاس اراضی (میانگین ۰/۸ هکتار) و ترکیب با ابزارهای نوین (مانند تیلر، سینی نشاء و سورتیک مکانیزه) به یک نظام دانشی پویا تبدیل شده است.

مدیریت زمین: این بخش شامل سه رویکرد است. مرحله اول آماده‌سازی زمین برای سال زراعی است. شخم شالیزارهای برنج و آماده‌سازی بستر در دهه‌ی ۴۰ با گاو نر یا در زبان محلی ورزه^۱ بوده و امروزه در دو مرحله یعنی اوایل اسفند و فروردین توسط دستگاه تیلر و با آب‌های ذخیره‌شده از باران انجام می‌شود. این رویکرد با میزان ۰/۹ بیشترین فراوانی ثبت نسبی را در مدیریت زمین به خود اختصاص داده است. مرحله‌ی بعدی گلخراشی می‌باشد. در این فرآیند با به هم زدن و از بین بردن ساختمان خاک، لایه‌ای بسیار سفت و مقاوم در برابر نفوذ آب در کف شالیزار ایجاد می‌شود که در حفظ آب و ایجاد ایستایی در شالیزار مؤثر است. راهکار بعدی تسطیح زمین است که ضمن به وجود آوردن سطحی صاف و یکنواخت برای

کشت برنج از اتلاف آب جلوگیری می‌کند. اثربخشی مدیریت زمین در الگوی بهینه مصرف آب از دیدگاه کشاورزان ۳۰ درصد است (شکل‌های ۳ و ۴).

مدیریت آب: اولین اقدام در این بخش، مدیریت سنتی کانال‌های آبیاری است که در اصطلاح محلی کانال و نهر ورونی^۲ نامیده می‌شود و شامل فعالیت کشاورزان برای آماده‌سازی آب ورودی به مزارع برنج است. در این مرحله، افراد اقدام به لایروبی و تمیز کردن رودخانه‌ها، کانال‌ها و نهرها جهت انتقال بهتر آب و حفظ دسترسی به آب در طول فصل رشد می‌کنند. راهکار بعدی وجود آبیاری محلی است که بر اساس تجربه و دانش سنتی، نوبت‌بندی آب را در روستاها و بین شالیزارها انجام می‌دادند. این نوبت‌بندی‌ها می‌تواند شامل دوره‌هایی باشد که آب به یک بخش از زمین‌ها نمی‌رسد و در نتیجه خاک کمی خشک می‌شود. اگرچه آبیاری غرقابی روش غالب است، اما کشاورزان سنتی با توجه به نیاز گیاه در مراحل مختلف رشد (مانند اوایل پنجه‌زنی یا قبل از برداشت) و نیز شرایط آب‌وهوایی (مثلاً بارش باران)، عمق آب را تنظیم کرده و یا برای مدت کوتاهی اجازه می‌دهند سطح آب پایین‌تر بیاید. یکی دیگر از مصادیق دانش سنتی، در زمینه‌ی خشک کردن زمین در اواخر فصل رشد و قبل از برداشت است. کشاورزان برای برداشت آسان‌تر و جلوگیری از خوابیدگی محصول، آب شالیزارها را قطع می‌کنند و اجازه می‌دهند زمین کاملاً خشک شود. رویکرد مدیریت کانال‌ها و خشک کردن زمین پیش از برداشت با میزان ۰/۹ بیشترین

فراوانی ثبت نسبی را در بخش مدیریت آب به خود اختصاص داده است. کشاورزان اثربخشی این قسمت را ۵۰ درصد برآورد نمودند (شکل‌های ۳ و ۴).

مدیریت بذر: این بخش شامل هفت رویکرد است. کشاورزان منطقه در طول سالیان از ارقام بومی مانند «هاشمی» که سازگاری بیشتری با شرایط اقلیمی منطقه، مقاومت نسبی به تنش‌های آبی و کاهش مصرف آب دارد استفاده کرده‌اند. این رویکرد با میزان ۰/۹ بیشترین فراوانی ثبت نسبی را در مدیریت بذر به خود اختصاص داده است. یکی از نکات کلیدی، ذخیره‌سازی بذر برای سال زراعی آینده است. کشاورزان بذرها را از مرغوب‌ترین شالیزارهای خود انتخاب و ذخیره می‌کنند. در برخی خانوارها قسمتی از زمین که مربوط به تهیه بذر برای سال بعد است به روش دستی با ابزار سنتی «داره»^۱ برداشت می‌شود و ایشان معتقدند برنج بریده‌شده با دست به دلیل خشک شدن در معرض آفتاب از کیفیت بیشتری نسبت به دروگر برخوردار است. در صورتی که امکان برداشت دستی فراهم نباشد بعد از برداشت با دروگر این بذر از سایر بذرها تفکیک و چند روز در منزل کشاورز در معرض نور خورشید خشک می‌شود. در گذشته، بذرها به شکل سنتی سرنده و الک شده و ناخالصی، سنگریزه و علف هرز از آن جداسازی می‌شد. امروزه این کار توسط کارخانه‌های سورتیک برنج به سهولت تفکیک می‌گردد. در صورتی که کشاورزان به هر دلیل در یک سال زراعی از بذر مناسبی برخوردار نباشند از طریق شبکه ارتباط محلی، مطلوب‌ترین بذر را از کارخانه برنج‌کوبی روستای محل سکونت خود و یا مستقیماً از خود شخص فروشنده خریداری می‌کند. قیمت بذر چیزی در حدود نیمی از قیمت برنج سفید در همان سال است. امروزه در کشاورزی برنج با متراژ بالا استفاده از ارقامی از برنج کیفی مقاوم به تغییرات آب‌وهوایی مورد توجه است. معرفی ارقام بومی، چون رقم جمشیدی، با کیفیت مشابه رقم هاشمی و مقاوم‌تر به کم‌آبی یکی از این موارد است.

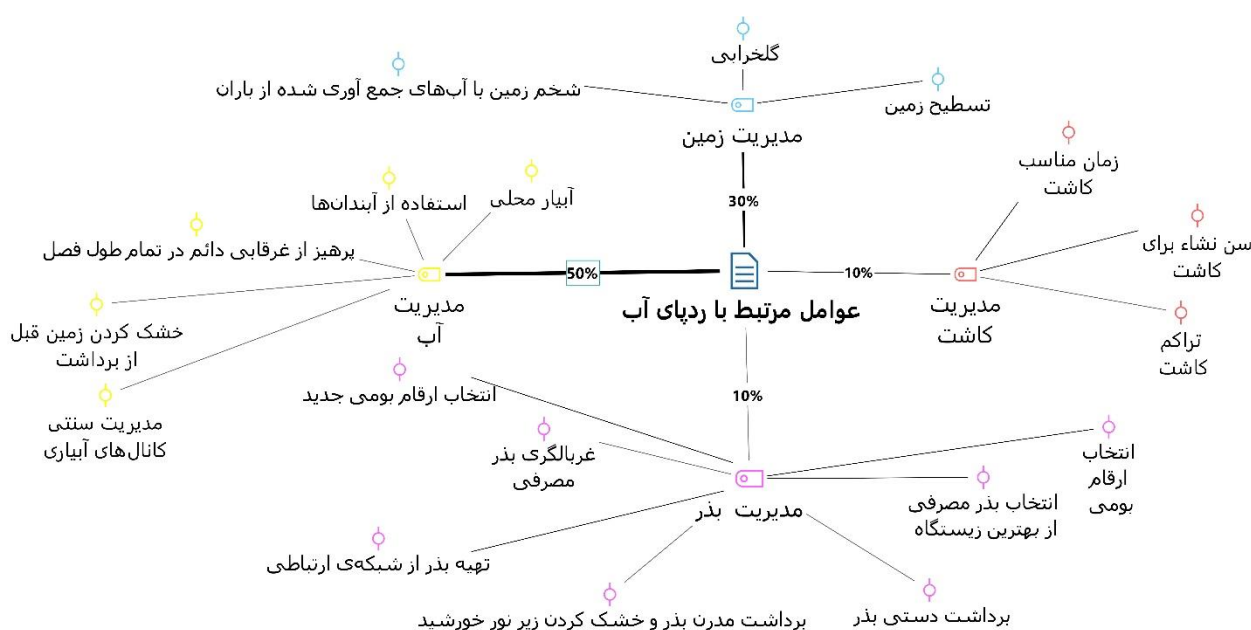
بهره‌برداران برای بخش بذر اثربخشی با میزان ۱۰ درصد قائل شده‌اند (شکل‌های ۳ و ۴).

مدیریت کاشت نشاء: دانش کشاورزان در این

بخش شامل انتخاب زمان مناسب کاشت، سن و تراکم کاشت نشاء با اثربخشی ۱۰ درصد است. زمان آماده‌سازی خزانه‌های برنج در اواسط فروردین است. در روش سنتی که به آن جو شونی^۲ گفته می‌شود، بذر برنج را ۲۴ ساعت خیس کرده و سه روز در تاریک‌خانه نگهداری می‌شود تا بذر جوانه یا در اصطلاح محلی کل^۳ بزند؛ سپس چهار تا پنج روز در حیاط خانه گذاشته تا به اندازه دو بندانگشت سبز شده و بقیه فرآیند رشد در بستر زمین سپری می‌شود. در روش مکانیزه، هشت روز زمان برای آماده‌سازی سینی نشاء نیاز است. بذر، ۲۴ ساعت در آب معمولی و ۲۴ ساعت در ضد قارچ خیسانده می‌شود. جوانه‌های آماده‌شده سپس در بستر کشت نشاء یا تیم بیجار^۴ گذاشته می‌شوند. دانش سنتی کشاورزان منطقه، میانگین سن نشاء ۲۰ روزه را جهت انتقال به زمین اصلی مناسب می‌داند و معتقد هستند که رعایت سن مورد نظر روی افزایش عملکرد محصول تأثیرگذار است. همچنین، کشاورزان کشت زود هنگام را به دلیل برخورداری بیشتر از منابع آب فصلی (الگوی بارش) توصیه می‌کند. رویکرد بعدی تراکم کاشت نشاء است که با میزان ۰/۹ بیشترین فراوانی ثبت نسبی را در این بخش به خود اختصاص داده است. کشاورزان فاصله مناسب بین نشاءها را یک چارک (۲۶ سانتی‌متر) می‌دانند. دو اصطلاح محلی انبست^۵ یعنی متراکم و گلف^۶ یعنی غیرمتراکم برای آرایش مزارع شالی‌کاری شده به کار می‌رود. جامعه محلی معتقد است که نشاکاری به شکل متراکم به‌ویژه در زمین‌هایی که از مصرف کود غنی هستند باعث افت عملکرد می‌شود و شالی‌کاری غیرمتراکم به استاندارد نزدیک‌تر است. از همین رو، نشاکار زبده را فردی می‌دانند که با توجه به موقعیت زمین و نشاء بتواند توازن در چیدمان نشاءها را ایجاد نماید (شکل‌های ۲ و ۳).



شکل ۲ - نمودار فراوانی ثبت نسبی عوامل مرتبط با ردپای آب از دیدگاه دانش سنتی



شکل ۳ - نمودار عوامل مرتبط با ردپای آب از دیدگاه دانش سنتی (MAXQDA 2020 - MAX Maps)

بحث و نتیجه‌گیری

تغییرات اقلیمی، کاهش منابع آب و افزایش رقابت مصرف، استمرار تولید برنج در ایران را با چالشی جدی مواجه ساخته است. با توجه به اهمیت این محصول در سبد غذایی کشور و نیاز آبی بالای آن، بهره‌گیری از شاخص‌هایی نظیر ردپای آب برای برآورد دقیق‌تر مصرف

واقعی آب ضرورت می‌یابد. با این حال، به دلیل اتکای این مطالعه بر داده‌های خوداظهاری و محدود بودن دوره زمانی بررسی به یک سال زراعی، نتایج باید با احتیاط تفسیر شوند. هرچند این عدم قطعیت‌ها از محدودیت‌های ذاتی چنین پژوهش‌هایی به شمار می‌آیند و می‌توان آن‌ها را تا حدی از طریق پالایش و تحلیل حساسیت داده‌ها مدیریت

کرد. در این راستا، انجام مطالعات بلندمدت مبتنی بر داده‌های چندساله به منظور بررسی دقیق‌تر آثار تغییرات اقلیمی پیشنهاد می‌شود.

میانگین ردپای مستقیم آب برنج در سال ۱۴۰۱ حدود ۱۹۸۲ مترمکعب بر تن در سال و ۵۴۸۹ مترمکعب بر هکتار در سال برآورد شد که ۷۵ درصد آن مربوط به ردپای آب آبی، ۱۶ درصد سبز و نه درصد خاکستری است. این امر بیانگر وابستگی بالای کشت برنج منطقه به آبیاری است. برخلاف بسیاری از مطالعات پیشین که تنها به ردپای مستقیم آب پرداخته‌اند، در این پژوهش ردپای غیرمستقیم ناشی از تولید و مصرف نهاده‌ها نیز برآورد شد. نتایج نشان داد میانگین سالانه ردپای غیرمستقیم آب برنج در سال ۱۴۰۱ برابر با ۵۳ مترمکعب بر تن در سال و ۱۴۷ مترمکعب بر هکتار در سال است. این مطلب نشان می‌دهد که اگر چه این نوع از ردپا در مقایسه با ردپای مستقیم کمتر است اما نهاده‌های تولید و فعالیت‌های جانبی در فشار بر منابع آب نقش دارند. در نهایت، ردپای کل آب برنج در منطقه مورد مطالعه ۲۰۳۵ مترمکعب بر تن در سال و ۵۶۳۶ مترمکعب بر هکتار در سال برآورد شد و کارایی مصرف آب در محصول برابر با ۰/۴۹ کیلوگرم در متر مکعب در سال به دست آمد. همچنین در کشت غرقابی برنج، بخش قابل توجهی از آب برداشت‌شده به صورت نفوذ عمقی^۱ و نشست جانبی^۲ از دسترس گیاه خارج می‌شود (رعنا و همکاران، ۲۰۲۵). اگرچه این تلفات مستقیماً در محاسبه ردپای آب محصول لحاظ نمی‌شوند و تنها تبخیر- تعرق واقعی گیاه (ET_c) مبنای محاسبه است، توجه به بهبود راندمان آبیاری و کاهش تلفات، نقش مهمی در مدیریت پایدار منابع آب دارد.

در سطح جهانی، میانگین ردپای آب مستقیم شلتوک برنج ۱۳۲۵ مترمکعب بر تن است که سهم سبز، آبی و خاکستری به ترتیب ۴۸، ۴۴ و ۸ درصد است (چاپاگن و هوکسترا، ۲۰۱۰). مقادیر این شاخص از ۶۳۸ در ویتنام، ۱۰۹۷ در هند تا ۳۰۷۲ در عراق متغیر است و در تایلند

برای کشت معمولی و ارگانیک به ترتیب ۱۴۷۰ و ۱۲۱۶ مترمکعب بر تن گزارش شده است (ایوید و همکاران، ۲۰۲۱؛ آرونرات و همکاران، ۲۰۲۲؛ کاشیپ و آگاروال، ۲۰۲۱). در سطح ملی نیز شیخ‌زین‌الدین و قیاسی (۱۴۰۲) سهم اجزای ردپای آب آبی، خاکستری و سبز را به ترتیب ۵۳-۴۵، ۲۵-۶ و ۱۵-۰ درصد و ردپای کل آب را در دامنه ۱۹۵۱ تا ۲۷۵۱ مترمکعب بر تن گزارش کردند. همچنین ایشان افزودند که ردپای آب مستقیم برنج در استان گیلان به طور متوسط ۲۲۴۳/۷۶ مترمکعب بر تن و کارایی مصرف آب ۰/۴۲ کیلوگرم در متر مکعب در سال است. اختلاف مقادیر ردپای آب در مقایسه با مطالعه‌ی حاضر را می‌توان به تفاوت در میزان نهاده‌های مصرفی و عملکرد محصول نسبت داد. در همین راستا، کاشیپ و آگاروال (۲۰۲۱) تأکید می‌کنند که ردپای آب بر واحد سطح شاخص مناسب‌تری برای مقایسه است، زیرا کمتر تحت تأثیر تغییرات عملکرد قرار می‌گیرد. بر اساس نتایج پرسشنامه، عملکرد شلتوک در منطقه ۲/۸ تن در هکتار گزارش شد که کمتر از میانگین استانی ۳/۹ تن در هکتار (انواع ارقام) در سال ۱۴۰۱ است. مقادیر گزارش‌شده در مطالعات مزرعه‌ای برای رقم هاشمی نیز نشان‌دهنده دامنه‌ای از عملکرد بین حدود ۲/۳ تا ۳/۹ تن در هکتار، در بازه‌ی مصرف ۴۰ تا ۸۰ کیلوگرم نیتروژن خالص است (شهبازی و همکاران، ۱۳۹۶؛ کاوسی و یزدانی، ۱۳۹۹؛ قناعتی گیل پردسری و همکاران، ۱۴۰۱).

از مهم‌ترین رویکردهای مدیریتی در حوزه‌ی مصرف آب برنامه‌ریزی تولید مبتنی بر ردپای آب منطقه‌ای و اصلاح الگوی مصرف است. در این راستا، تعدیل سبد غذایی با کاهش سهم برنج و جایگزینی آن با محصولات کم‌آب‌بر می‌تواند نقش مؤثری در کاهش فشار بر منابع آب ایفا کند. برنامه‌ریزی تولید نیز مستلزم تمرکز کشت برنج در مناطق با نیاز آبی کمتر و محدودسازی یا توقف آن در مناطق پرمصرف و جایگزینی با محصولات نظیر گندم، ذرت و سیب‌زمینی است. مطالعات پیشین نشان می‌دهد که افزایش

دما با تشدید تبخیر، نیاز آبی گیاه را افزایش می‌دهد و استان‌های با اقلیم گرم و خشک، به دلیل سهم بالای ردپای آب آبی، گزینه مناسبی برای کشت برنج نیستند، درحالی‌که بخش‌هایی از استان‌های شمالی کشور، به‌ویژه گیلان، از ردپای آب سبز بالاتر و ردپای آب آبی کمتری برخوردارند (شیخ زین‌الدین و قیاسی، ۱۴۰۲؛ خدادادی و همکاران، ۱۴۰۳). با توجه به مصرف سرانه بالای برنج در ایران و نقش آن در امنیت غذایی، تداوم تولید داخلی برنج در استان‌هایی مانند گیلان، ضمن کاهش وابستگی به واردات و نوسانات بازار جهانی، می‌تواند به تثبیت قیمت‌ها، پایداری اقتصادی کشاورزان و حفاظت هم‌زمان از منابع آب کشور کمک کند.

از دیگر رویکردها در راستای کاهش ردپای آب برنج، تلفیق دانش سنتی کشاورزان با روش‌های علمی و فناوریانه است. دانش سنتی کشاورزان گیلانی که حاصل قرن‌ها تعامل با محیط طبیعی است، نقش مهمی در مدیریت مصرف آب و کاهش پیامدهای زیست‌محیطی دارد. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که مدیریت آب، زمین، انتخاب بذر بومی، کاشت نشای جوان (حدود ۲۰ روزه)، کشت زودهنگام و تراکم کم، از دیدگاه کشاورزان بیشترین تأثیر را بر کاهش ردپای آب برنج دارد. این نتایج با دیدگاه سینگ (۲۰۱۴) و دیویا و همکاران (۲۰۲۴) همخوانی دارد که مدیریت پایدار کشاورزی را مبتنی بر استفاده از ارقام سنتی، سلامت خاک، حفظ منابع آب، کودهای طبیعی و تنوع زیستی می‌دانند.

در استان گیلان، اگرچه کشت برنج عمدتاً به‌صورت غرقابی انجام می‌شود، اما کشاورزان به‌طور سنتی با اقداماتی نظیر تسطیح زمین، استفاده از آب‌بندان‌ها، شخم با آب باران و پرهیز از غرقاب دائم، مصرف آب را مدیریت کرده‌اند. همچنین نظام‌های مشارکتی سنتی در مدیریت و نگهداری کانال‌های آبیاری، با توزیع عادلانه آب و کاهش هدررفت، به افزایش بهره‌وری کمک کرده است. در سال‌های اخیر، آبیاری متناوب به‌عنوان جایگزینی برای

آبیاری غرقابی مورد توجه قرار گرفته و مؤسسه بین‌المللی تحقیقات برنج^۱ آن را توصیه کرده است (سریفیروم و همکاران، ۲۰۱۹). این روش شامل چرخه‌های تر و خشک شدن خاک است که منجر به تغییرات در رطوبت خاک و شرایط اکسیداسیون- احیا می‌شود و در صورت اجرای درست (مرحله‌ی پنجه‌زنی) می‌تواند بدون کاهش عملکرد، مصرف آب را تا ۳۸ درصد کاهش دهد (اچگاری-کابرا و همکاران، ۲۰۲۴؛ سریفیروم و همکاران، ۲۰۱۹). وجود زیرساخت‌های آبیاری کارآمد از پیش‌نیازهای کلیدی پذیرش فناوری‌های صرفه‌جویی در آب است، زیرا دسترسی به آب در حجم و زمان مناسب، اعتماد کشاورزان را به این روش‌ها افزایش می‌دهد (انریکز و همکاران، ۲۰۲۱). استفاده از بذره‌های بومی مقاوم به کم‌آبی همراه با ارقام اصلاح‌شده و روش‌های علمی کاشت می‌تواند مصرف آب را کاهش داده و کیفیت محصول را حفظ کند. کشاورزان گیلانی عمدتاً از ارقام بومی مانند هاشمی استفاده می‌کنند که با وجود حساسیت ژنتیکی به خشکی شدید، به دلیل سازگاری با اقلیم و مدیریت آب محلی (نوبت‌بندی سنتی، تنظیم عمق غرقاب و دوره‌های کوتاه خشک کردن زمین) مقاومت نسبی به کم‌آبی نشان می‌دهند. عوامل دیگری مانند زمان مناسب کاشت، سن نشاء و تراکم بهینه بوته نیز با بهبود جذب عناصر غذایی، کاهش مصرف کود و افزایش عملکرد مؤثرند (فرح‌دهر و همکاران، ۱۴۰۲). تأخیر در کاشت باعث افزایش خطر خوابیدگی و کاهش عملکرد می‌شود، درحالی‌که فاصله مناسب بین بوته‌ها نور و فعالیت فتوسنتزی بهینه را فراهم می‌کند (حسن‌پور و همکاران، ۱۴۰۱؛ فرح‌دهر و همکاران، ۱۴۰۲). بررسی روش‌های مکمل مانند کشت راتون که امکان برداشت مجدد محصول با مصرف آب کمتر را فراهم می‌کند و استفاده از ارقام نزدیک به هاشمی مانند جمشیدی که مقاوم‌تر به کم‌آبی است، می‌تواند به کاهش ردپای آب و بهینه‌سازی تولید کمک کند. با وجود مزایای رویکردهای تلفیقی، محدودیت‌های اقتصادی کشاورزان خرد، کمبود

کند. انجام پژوهش‌های آینده با تمرکز بر پیامدهای اقتصادی، اجتماعی و فرهنگی این رویکردها برای افزایش پذیرش آنها ضروری است.

تعارض منافع

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

زیرساخت‌های آبیاری کارآمد، دسترسی محدود به تسهیلات مالی و مقاومت‌های فرهنگی از موانع اصلی پذیرش این روش‌ها به شمار می‌رود. با این حال، نتایج پروژه‌های پایلوت آبیاری تناوبی در استان گیلان نشان‌دهنده ظرفیت بالای این روش در کاهش مصرف آب است. در مجموع، اتخاذ رویکردی تلفیقی مبتنی بر دانش سنتی و دانش رسمی می‌تواند ضمن کاهش ردپای آب برنج، به حفاظت از منابع آب، افزایش تاب‌آوری نظام تولید و پایداری معیشت کشاورزان در استان گیلان کمک

فهرست منابع

۱. پندی، حسین، اسدی کپورچال، صفورا، وظیفه دوست، مجید و رضایی، مجتبی، ۱۴۰۲. برآورد تبخیر-تعرق و ضریب گیاهی برنج با استفاده از مدل SWAP با و بدون تلفیق تصاویر ماهواره‌ای، تحقیقات آب‌وخاک ایران، ۵۴ (۵)، صص. ۱۱۹۷-۱۲۱۳. doi:10.22059/ijswr.2023.361733.669525
۲. دلجویی‌راد، احمد، رسولی‌آذر، سلیمان و رشیدپور، لقمان، ۱۳۹۴. بررسی نقش دانش بومی در استفاده بهینه از آب در بخش کشاورزی، کنفرانس بین‌المللی توسعه پایدار با محوریت کشاورزی، محیط‌زیست و گردشگری، تبریز. <https://civilica.com/doc/468396>
۳. حسن‌پور، خیزران، اسفنجاری کناری، رضا و معتمد، محمد کریم، ۱۴۰۱. سنجش و ارزیابی پایداری نظام زراعی کشت برنج با استفاده از روش شاخص ترکیبی (مورد مطالعه: شهرستان لاهیجان)، تحقیقات غلات، ۱۲ (۴)، صص. ۳۳۳-۳۴۸. doi: 10.22124/cr.2023.25094.1777
۴. خدادادی بالانقیبی، محمدرضا، سلطانی، افشین و زینلی، ابراهیم، ۱۴۰۳. برآورد ردپای آب آبی و سبز برنج در پهنه‌های اگرواکولوژیک کشاورزی کل کشور، تحقیقات آب‌وخاک ایران: ۵۵ (۱۰)، صص. ۱۷۴۱-۱۷۱۹. doi:10.22059/ijswr.2024.377040.669719
۵. فرح‌دهر، فاطمه، جهانسوز، محمدرضا، صوفی‌زاده، سعید و یزدانی، محمدرضا، ۱۴۰۲. مستندسازی مدیریت‌های زراعی مؤثر بر تولید برنج (*Oryza sativa* L) در استان گیلان، علوم گیاهان زراعی ایران ۵۴ (۲)، صص. ۲۰۴-۱۹۱. doi 10.22059/ijfcs.2023.348013.654936
۶. قناعتی گیل پردسری، مرصاد، اصفهانی، مسعود و اعلمی، علی، ۱۴۰۱. اثر مقادیر کود نیتروژن و محلول‌پاشی میکوات کلراید بر شاخص‌های مقاومت به خوابیدگی بوته، عملکرد و اجزای عملکرد برنج رقم هاشمی، تحقیقات غلات، ۱۲ (۳)، صص. ۲۴۰-۲۲۵. doi: 10.22124/cr.2023.23747.1756
۷. کاوسی، مسعود و یزدانی، محمدرضا، ۱۳۹۹. اثر دور آبیاری و میزان کود نیتروژن بر عملکرد دانه و اجزای عملکرد برنج (*Oryza sativa* L.) رقم هاشمی، نشریه علوم زراعی ایران: ۲۲ (۲)، صص. ۱۶۸-۱۸۲. <http://agrobreedjournal.ir/article-1-1009-fa.html>
۸. سایت سرشماری نفوس و مسکن، ۱۳۹۵. مرکز آمار ایران، <https://amar.org.ir/statistical-information/statid/52277>
۹. سایت اداره کل هواشناسی استان گیلان، ۱۴۰۴. <https://www.gilmet.ir/fa>

۱۰. شهبازی، محبوبه، زینلی، ابراهیم، گالشی، سرالله، احتشامی، سید محمدرضا و درستی، حمید، ۱۳۹۶. واکنش عملکرد دانه و سایر ویژگی‌های زراعی دو رقم برنج (*Oryza sativa* L.) بومی هاشمی و پرمحصول سپیدرود به مقدار نیتروژن کودی در رشت. *مجله مدیریت خاک و تولید پایدار*، ۷ (۱)، صص. ۳۸-۲۱.
- Doi: 10.22069/ejsms.2017.8997.1543**
۱۱. شیخ زین الدین، آذر، قیاسی، حامد، ۱۴۰۲. ارزیابی ردپای آب و کارایی مصرف آب در محصول برنج در راستای پایداری، *دانش کشاورزی و تولید پایدار* ۳۳ (۲)، صص. ۲۲۵-۲۰۷.
- Doi: 10.22034/saps.2022.49098.2774**
۱۲. مرزی نوحدانی، مریم، مصطفی‌زاده فرد، بهروز، موسوی، سید فرهاد، یزدانی، محمدرضا و علیزاده، محمدرضا، ۱۳۹۴. اثر ادوات مختلف خاک‌ورزی بر منحنی مشخصه رطوبتی خاک غالب شالیزار در استان گیلان. *علوم آب و خاک*، ۱۹ (۷۲)، صص. ۱۷۷-۱۸۸.
- http://dx.doi.org/10.18869/acadpub.jstnar.19.72.16.**
13. Allan, R.G. Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop Evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - *FAO Irrigation and Drainage*: No. 56
14. Arunrat, N., Sereenonchai, S., Chaowiwat, W., Wang, C., and Hatano, R., 2022. Carbon, Nitrogen and Water Footprints of Organic Rice and Conventional Rice Production over 4 Years of Cultivation: A Case Study in the Lower North of Thailand, *Agronomy*, 12, 380.
15. Chapagain, A., and Hoekstra, A., 2010. The blue, green and grey water footprint of rice from production and consumption perspectives. *Ecological Economics*. 70. 749-758. 10.1016/j.ecolecon.2010.11.012.
16. Das, K., Gerbens-Leenes, P.W. and Nonhebel, S. 2021, the water footprint of food and cooking fuel: A case study of self-sufficient rural India, *Journal of Cleaner Production*, 281: 125255.
17. Dhivya, C., Monika, A., Jayashree, V., and Kamali, S.P., 2024. The Role of Indigenous Knowledge in Sustainable Farming Practices, *greenaria.in*, 2(10): 194-196. ISSN: 2584-153.X, Article ID: G-24-1051
18. Dugyon, E.M.C., 2024. Indigenous knowledge in traditional production of rice: Impact on food security in the upland households in Ifugao, Philippines. *Plant Science Today*. **<https://doi.org/10.14719/pst.1864>**
19. FAO. Crop Water and Irrigation Requirements Program of FAO (CROPWAT) Food and Agriculture Organization, 2019. Available online: <http://www.fao.org/land-water/databases-and-software/cropwat/en/>
20. Fiamelda, L., Suprihatin, and Purwoko, 2020. Analysis of water and electricity consumption of urea fertilizer industry: case study PT. X. IOP Conference Series: *Earth and Environmental Science*. 472. 012034. 10.1088/1755-1315/472/1/012034.
21. Echegaray-Cabrera, I., Cruz-Villacorta, L., Ramos-Fernández, L., Bonilla-Cordova, M., Heros-Aguilar, E., and Flores Del Pino, L., 2024. Effect of Alternate Wetting and Drying on the Emission of Greenhouse Gases from Rice Fields on the Northern Coast of Peru. *Agronomy*: 14, 248. **<https://doi.org/10.3390/agronomy14020248>**
22. Enriquez Y, Yadav S, Evangelista GK, Villanueva D, Burac MA and Pede V., 2021. Disentangling Challenges to Scaling Alternate Wetting and Drying Technology for Rice Cultivation: Distilling Lessons from 20 Years of Experience in the Philippines. *Front. Sustain. Food System*. 5:675818. **doi: 10.3389/fsufs.2021.675818**
23. Ewaid, S., Ali Abed, S., Ali Chabuk, A and Nadhir Al-Ansari, N., 2021. Water Footprint of Rice in Iraq: *Earth and Environmental Science* 722, 012008, **doi:10.1088/1755-1315/722/1/012008**
24. Harris, F., Moss, C., J.M.Joy, E., Quinn, R., P.F.D Scheelbeek, F., Dangour, A.D., and Green, R., 2020. The Water Footprint of Diets: A Global Systematic Review and Meta-analysis, panel. *Advances in Nutrition*. 11 (2): 375-386.
25. Hoekstra, A.Y., Chapagain, A.K., Aldaya, M.M., & Mekonnen, M.M. (2011). The Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard. London: Earthscan. Available at: <https://www.waterfootprint.org/resources/TheWaterFootprintAssessmentManual>

26. Kashyap, D., and Agarwal, T., 2021. Carbon footprint and water footprint of rice and wheat production in Punjab, India, *Agricultural Systems* 186: 102959.
27. Singh, R.K., 2014, Indigenous Agricultural Knowledge in Rainfed Rice Based Farming Systems for Sustainable Agriculture: Learning from Indian Farmers. *Indigenous Knowledge and Sustainable Agriculture Development*, 101-111.
28. Sriphirom, P., Chidthaisong, A., and Towprayoon, S., 2019. Effect of alternate wetting and drying water management on rice cultivation with low emissions and low water used during wet and dry season, *Journal of Cleaner Production*, 223: 980-988, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.212>.
29. Sun, P., Elgowainy, A., Wang, M., Han, J. and Henderson, R.J., 2018. Estimation of U.S. refinery water consumption and allocation to refinery Products, *Fuel*. 221: 542–557.
30. Parsinejad, M., Yazdani, M. R., & Ebrahimian, H., 2009. Field and regional scale evaluation of irrigation efficiency in paddy fields: A case study of Guilan Province, Iran. *Irrigation and Drainage*, 58(4), 495–505.
31. Putu Sukanteri, N., Joshi, R.C and Tamba, I.M., 2024. Cultivating Sustainable Agriculture: Traditional Wisdom in Balinese Rice Farming. <https://doi.org/10.31220/agrirxiv.2024.00270>
32. Rana, M. M., Mahmud, K., Rahman, A., Jahangir, M. M. R., and Amin, M. G. M., 2025. Irrigation and percolation management for reducing water footprint and nutrient leaching in rice-based ecosystems. *Water Science and Engineering*, 18(4), 454–46
33. Rosada, I., Nurliani, A., Nurhapsa, FD., and Sirajuddin, SN., 2024. Enhancing Indigenous Knowledge to Enhance Food Security in Rice Field Agroecosystems of Pinrang Regency, South Sulawesi Province, Indonesia. *Adv. Life Scintice*.11 (1): 84-91.
34. Vijayakumar, S., and Padma, S., 2023. Unlocking the Energy-Water-Carbon Nexus in Rice Cultivation: A Comprehensive Review, *Journal of Rice Research*: 16 (2), <https://doi.org/10.58297/PSJA9488>