University of Guilan
Faculty of Agricultural Sciences

**Cereal Research**
**Vol. 16, No. 1, 2026 (17-32)**
Home page: https://cr.guilan.ac.ir/
pISSN: 2252-0163 eISSN: 2538-6115

# Carbon footprint analysis of rice cultivation in Guilan province using life cycle assessment and traditional knowledge data

**Maedeh Omidi Nowbijar[1]✉, Hossein Barani[2], Mohamad Rahim Forouzeh[2] and Ahmad Abedi Sarvestani[3]**

1. Ph.D. Graduate, Department of Rangeland Management, Faculty of Rangeland and Watershed Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran; 2. Associate Professor, Department of Rangeland Management, Faculty of Rangeland and Watershed Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran; 3. Associate Professor, Department of Agricultural Extension and Education, Faculty of Agricultural Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran.
✉ Corresponding author: maedeh.omidi@gmail.com

**Article Info**

**Article type:**
Research Article

**Article history:**
Received: 29 November 2025
Revised: 10 February 2026
Accepted: 14 February 2026
Available online: 1 March 2026

**Keywords:**
Greenhouse gas emissions
Ethnography
Paddy field
Rural community
Sustainable production

**Abstract**

**Introduction:** Rice (*Oryza sativa*) is a strategic agricultural crop that plays a pivotal role in food security and livelihoods in Iran and worldwide. In this context, a comprehensive assessment of greenhouse gas emissions from rice cultivation systems is essential for achieving sustainable production and carbon footprint (CF) serves as an indicator for estimating both direct and indirect greenhouse gas emissions. Alongside global efforts to mitigate climate change, the role of traditional knowledge systems in carbon management has increasingly garnered attention. The objective of this study was to investigate the carbon footprint of rice cultivation and the associated traditional knowledge and practices related to its influencing factors in Gilan Province during the 2022 cropping year.

**Materials and Methods:** A mixed-methods design was applied, integrating quantitative and qualitative approaches. The CF was calculated for three farm sizes (<0.5 ha, 0.5-1 ha, and >1 ha) using life cycle assessment (LCA) based on the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) guidelines. Traditional knowledge was explored through an ethnographic approach and analyzed using coding procedures in MAXQDA 2020. Data normality was assessed using the Shapiro–Wilk test. Given the non-normal distribution of some variables, the non-parametric Kruskal–Wallis test was performed using SPSS. For pairwise comparisons, Dunn's post hoc test with Bonferroni correction was applied at a 5% significance level.

**Results and Discussion:** The average CF of rice production was estimated at 1.23 kg $CO_{2\text{-eq}}.kg^{-1}.y^{-1}$. Although no statistically significant differences were observed among farm sizes, larger farms tended to have slightly lower CF values. The mean global warming potential of the system was 3031 kg $CO_{2\text{-eq}}.ha^{-1}.y^{-1}$. Methane emissions from flooded rice cultivation during the growing season accounted for approximately 64% of total emissions, while nitrogen-based fertilizers and the associated $N_2O$ emissions from their application contributed about 10%. Additional sources included fuel, labor, and seed inputs.The assessment of farmers' traditional knowledge showed that organic fertilizer management, mechanization, and seed management accounted for 50%, 40%, and 10% of the total scores, respectively, representing key components related to the carbon footprint of rice production.The main practices associated with these components included the use of organic fertilizers, semi-mechanized cultivation, and the preservation of local rice varieties.

**Conclusion:** Mitigating the CF of rice production in Gilan requires an integrated strategy that merges formal scientific approaches with traditional knowledge. Priority measures include transforming irrigation practices, optimizing fertilizer application, considering local rice cultivars, and combining farmer's experiential knowledge with energy-efficient mechanization.

**Cite this article:** Omidi Nowbijar, M., Barani, H., Rahim Forouzeh, M., & Abedi Sarvestani, A. (2026). Carbon footprint analysis of rice cultivation in Guilan province using life cycle assessment and traditional knowledge data. *Cereal Research*, *16*(1), 17-32. doi: 10.22124/CR.2026.32678.1888.

© The Author(s) retain the copyright.
DOI: https://doi.org/10.22124/CR.2026.32678.1888. **Punlisher:** University of Guilan

تحقیقات غلات
دوره شانزدهم، شماره اول، ۱۴۰۵ (۳۲-۱۷)
Home page: https://cr.guilan.ac.ir/
شاپا چاپی: ۰۱۶۳-۲۲۵۲ شاپا الکترونیکی: ۶۱۱۵-۲۵۳۸

# تحلیل ردپای کربن کشت برنج در استان گیلان با استفاده از ارزیابی چرخه عمر و داده‌های دانش سنتی

**مائده امیدی نوبیجار[۱]✉، حسین بارانی[۲]، محمدرحیم فروزه[۳] و احمد عابدی سروستانی[۴]**

۱- دانش‌آموخته دکتری، گروه مدیریت مرتع، دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران؛ ۲- دانشیار، گروه مدیریت مرتع، دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران؛ ۳- دانشیار، گروه مدیریت مرتع، دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران؛ ۴- دانشیار، گروه ترویج و آموزش کشاورزی، دانشکده مدیریت کشاورزی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.

✉ نویسنده مسئول: maedeh.omidi@gmail.com

**اطلاعات مقاله**

**نوع مقاله:**
مقاله پژوهشی

**تاریخ دریافت:** ۱۴۰۴/۰۹/۰۸
**تاریخ بازنگری:** ۱۴۰۴/۱۱/۲۱
**تاریخ پذیرش:** ۱۴۰۴/۱۱/۲۵
**انتشار آنلاین:** ۱۴۰۴/۱۲/۱۰

**واژه‌های کلیدی:**
انتشارگازهای گلخانه‌ای
تولید پایدار
جامعه روستایی
شالیزار
مردم‌نگاری

**چکیده**

**مقدمه:** گیاه برنج (*Oryza sativa* L.) یکی از محصولات کشاورزی راهبردی است که نقش محوری در امنیت غذایی و معیشت در ایران و جهان ایفا می‌کند. از این رو، ارزیابی جامع انتشار گازهای گلخانه‌ای در سیستم‌های کشت برنج برای دستیابی به تولید پایدار ضروری است و شاخص رد پای کربن ابزاری برای برآورد انتشار مستقیم و غیرمستقیم این گازها به‌شمار می‌آید. هم‌راستا با تلاش‌های جهانی برای کاهش تغییرات اقلیمی، نقش نظام‌های دانش سنتی نیز در مدیریت کربن بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است. هدف این مطالعه، بررسی رد پای کربن کشت برنج و دانش سنتی مرتبط با عوامل موثر بر آن در استان گیلان طی سال زراعی ۱۴۰۱ بود.

**مواد و روش‌ها:** یک رویکرد ترکیبی (کمی و کیفی) برای مطالعه اتخاذ شد. برای محاسبه رد پای کربن برنج در ابعاد مختلف مزرعه شامل (کم‌تر از نیم هکتار، نیم تا یک هکتار و بیش‌تر از یک هکتار) از روش ارزیابی چرخه عمر و دستورالعمل‌های هیئت بین‌دولتی تغییرات اقلیمی استفاده شد. همچنین بررسی دانش سنتی با روش مردم‌نگاری انجام و تحلیل نتایج آن با روش کدگذاری به‌کمک نرم‌افزار MAXQDA 2020 صورت پذیرفت. برای مقایسه رد پا در گروه‌ها، ابتدا نرمال بودن داده‌ها به‌وسیله آزمون شاپیرو-ویلک ارزیابی شد و در صورت مشاهده توزیع غیرنرمال در داده‌ها از آزمون ناپارامتریک کروسکال-والیس در نرم‌افزار SPSS استفاده شد. مقایسه‌های زوجی نیز با آزمون تعقیبی دان با اعمال اصلاح بونفرونی در سطح معنی‌دار پنج درصد انجام شد.

**نتایج و بحث:** میانگین رد پای کربن تولید برنج ۱/۲۳ کیلوگرم دی اکسید کربن معادل به‌ازای هر کیلوگرم محصول در سال برآورد شد. همچنین با وجود عدم اختلاف معنی‌دار با افزایش ابعاد مزرعه، رد پای کربن کاهش یافت. میانگین کل پتانسیل گرمایش جهانی ناشی از فعالیت‌های مختلف در نظام کشت برابر با ۳۰۳۱ کیلوگرم دی اکسید کربن معادل بر هکتار در سال بود. انتشار متان ناشی از کشت غرقابی برنج طی فصل رشد ۶۴ درصد و کودهای حاوی نیتروژن و انتشار $N_2O$ ناشی از کاربرد آن ۱۰ درصد از کل گازهای گلخانه‌ای تولیدی را در برداشت. سایر عوامل نیز شامل سوخت، نیروی انسانی و بذر بودند. ارزیابی دانش سنتی کشاورزان نشان داد که مدیریت کود آلی، مکانیزاسیون و مدیریت بذر، به‌ترتیب با سهم امتیازی ۵۰، ۴۰ و ۱۰ درصد، از مؤلفه‌های مرتبط با رد پای کربن تولید برنج هستند. راهبردهای شاخص این مؤلفه‌ها شامل استفاده از کودهای آلی، کشت نیمه‌مکانیزه و حفظ بذرهای بومی بود.

**نتیجه‌گیری:** مدیریت رد پای کربن برنج در منطقه نیازمند رویکردی تلفیقی از دانش سنتی و رسمی، شامل تحول در روش‌های آبیاری، بهینه‌سازی مصرف کود، توجه به رقم‌های بومی و پیوند تجربه نیروی انسانی با مکانیزاسیون کم‌مصرف است.

**نحوه استناد به این مقاله:** امیدی نوبیجار، م.، بارانی، ح.، فروزه، م.ر.، و عابدی سروستان، ا. (۱۴۰۵). تحلیل رد پای کربن کشت برنج در استان گیلان با استفاده از ارزیابی چرخه عمر و داده‌های دانش سنتی. *تحقیقات غلات*، *۱۶*(۱)، ۳۲-۱۷. doi: 10.22124/CR.2026.32678.1888

**ناشر:** دانشگاه گیلان

© حق چاپ برای نویسنده(گان) محفوظ است.

**مقدمه**

گیاه برنج (*Oryza sativa* L.) غذای اصلی بیش از نیمی از مردم جهان است و نقش محوری در امنیت غذایی و معیشت ایفا می‌کند. بیش از دو میلیارد نفر ۶۰ تا ۷۰ درصد از نیاز انرژی خود را از برنج و مشتقات آن تأمین می‌کنند (Vijayakumar & Padma, 2023). از سوی دیگر، افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای در جو، موجب تشدید گرمایش جهانی و بروز پیامدهای اقلیمی، از جمله خشک‌سالی، سیلاب و طوفان شده است. این تغییرات، بخش کشاورزی را نیز به‌شدت تحت تأثیر قرار داده و پایداری فعالیت‌های تولیدی آن را با چالش مواجه کرده است (Ji *et al*., 2024). در این میان، تولید برنج سهم قابل‌توجهی در انتشار جهانی این گازها دارد. کشت برنج از منابع مهم انتشار متان ($CH_4$) با منشأ انسانی در جو است. از سوی دیگر، مصرف کودهای شیمیایی در کشاورزی موجب افزایش انتشار اکسید نیتروژن ($N_2O$) و استفاده از سوخت‌های فسیلی در کشاورزی نیز به انتشار دی‌اکسید کربن ($CO_2$) منجر می‌شود (Arunrat *et al*., 2022).

رد پای کربن (Carbon footprint) شاخصی برای کمی‌سازی انتشار گازهای گلخانه‌ای است (Ji *et al*., 2024)، و به مجموع انتشار مستقیم و غیرمستقیم این گازها در ارتباط با یک فرد، سازمان، رویداد یا محصول گفته می‌شود. این شاخص با جمع انتشار حاصل از هر مرحله از طول عمر (تولید مواد، ساخت، استفاده و پایان عمر) محاسبه می‌شود (Nabipour Afrouzi *et al*., 2023). در نظام‌های تولید برنج، کمی‌سازی رد پای کربن و شناسایی منابع اصلی انتشار گازهای گلخانه‌ای، در کنار توجه به الزامات امنیت غذایی، از اقدامات مهم برای ارزیابی پایداری تولید به‌شمار می‌رود (Ji *et al*., 2024). در این راستا، توجه به ظرفیت دانش سنتی جوامع در مدیریت پایدار منابع طبیعی و مقابله با تغییرات اقلیمی افزایش یافته است. این دانش حاصل تجربه و تعامل مستمر جوامع محلی با محیط‌زیست است و از طریق ارائه راهکارهایی برای بهره‌برداری پایدار از منابع می‌تواند به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و تقویت ظرفیت ذخیره کربن کمک کند (Chanza *et al*., 2024). در بخش کشاورزی نیز دانش سنتی در حوزه‌هایی مانند مدیریت خاک، انتخاب محصول و کنترل آفات و بیماری‌های گیاهی طی نسل‌های متوالی و متناسب با شرایط هر منطقه شکل گرفته است. استفاده از این تجربیات در مدیریت نهاده‌ها و عملیات زراعی می‌تواند موجب پایداری تولید و کاهش پیامدهای زیست‌محیطی فعالیت‌های کشاورزی شود (Khumalo *et al*., 2025; Rosada *et al*., 2024).

مطالعات مختلفی در زمینه رد پای کربن برنج انجام شده است. دستان و همکاران (Dastan *et al*., 2016)، رد پای کربن برنج پرمحصول در استان مازندران را ارزیابی و بیش‌ترین و کم‌ترین پتانسیل گرمایش جهانی را به‌ترتیب در نظام‌های حفاظتی و رایج در منطقه مشاهده کردند. سریفیروم و همکاران (Sriphirom *et al*., 2019)، انتشار گازهای گلخانه‌ای در تایلند و اثربخشی آبیاری متناوب را در کاهش پتانسیل گرمایش جهانی مطالعه کردند. کاشیاپ و آگاروال (Kashyap & Agarwal, 2021) نیز رد پای کربن در هند را بررسی و سوزاندن بقایای محصول، انتشار مستقیم متان و استفاده از کودهای شیمیایی را به‌عنوان مهم‌ترین عوامل گزارش کردند. در تایلند نیز رد پای کربن برنج ارگانیک و متعارف بررسی و بر اهمیت روش‌های ارگانیک در کاهش انتشار تأکید شده است (Arunrat *et al*., 2022). انتشار گازهای گلخانه‌ای مزارع برنج و اثربخشی آبیاری متناوب در کاهش رد پای کربن در پرو نیز مورد بررسی قرار گرفته است (Echegaray-Cabrera *et al*., 2024). پژوهش‌های انجام شده در نظام‌های کشت برنج در نقاط مختلف جهان نشان داده‌اند که دانش سنتی با تلفیق شیوه‌های فرهنگی و روش‌هایی نظیر استفاده از رقم‌های بومی، حفظ حاصل‌خیزی و سلامت خاک، مدیریت بهینه منابع آب و به‌کارگیری نهاده‌های طبیعی، می‌تواند نقش مؤثری در پایداری نظام‌های کشاورزی داشته باشد (Limpo *et al*., 2022; Dugyon, 2024; Bisht *et al*., 2025; Sedana *et al*., 2025).

با وجود انجام مطالعات متعدد در زمینه سنجش رد پای کربن در برنج، بخش عمده‌ای از این پژوهش‌ها بر تحلیل‌های صرفاً کمی متمرکز بوده و نقش زمینه‌های اجتماعی- فرهنگی و دانش محلی کشاورزان در شکل‌دهی الگوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای نادیده گرفته شده است. از سوی دیگر، پژوهش‌های مرتبط با دانش سنتی کشاورزی عمدتاً ماهیتی کیفی داشته و کم‌تر تلاش شده است این دانش در چارچوب شاخص‌های کمی اقلیمی، از جمله ردپای کربن، تفسیر و عملیاتی شود. خلأ اصلی در ادبیات موجود، نبود رویکردی تلفیقی است که بتواند هم‌زمان اندازه‌گیری کمی انتشار گازهای گلخانه‌ای و تبیین بومی عوامل مؤثر بر آن را در مقیاس مزرعه‌ای پوشش دهد. نوآوری پژوهش حاضر در پیوند دادن تحلیل چرخه عمر کشت برنج با داده‌های مردم‌نگارانه و دانش

سنتی کشاورزان شالی‌کار است تا بتوان با یافته‌های کیفی به تفسیر مؤلفه‌های انتشار و شناسایی ظرفیت‌های بومی کاهش رد پای کربن کمک کرد.

استان گیلان به‌دلیل دسترسی به منابع آبی و خاک حاصل‌خیز به‌عنوان یکی از قطب‌های اصلی تولید برنج در ایران مطرح است و چالش‌هایی نظیر تغییرات اقلیمی در این استان، لزوم مدیریت رد پای کربن در کشت برنج را بیش از پیش نمایان می‌سازد. بر این اساس، پژوهش حاضر جهت دستیابی به اهداف زیر انجام شد: ۱- بررسی رد پای کربن کشت برنج در شالیزارهای استان گیلان بر اساس رویکرد ارزیابی چرخه عمر که در واحد عملکردی وزن و مساحت است، ۲- شناسایی و کمی‌سازی سهم مؤلفه‌های اصلی انتشار گازهای گلخانه‌ای در نظام کشت برنج، ۳- مقایسه رد پای کربن در مزارع با ابعاد مختلف به‌منظور بررسی تأثیر مقیاس مزرعه بر میزان انتشار، ۴- شناسایی و تحلیل دانش سنتی کشاورزان شالی‌کار مرتبط با مدیریت نهاده‌ها و فعالیت‌های مؤثر بر انتشار گازهای گلخانه‌ای. بررسی رد پای کربن می‌تواند فرصت‌هایی برای کاهش اثرات زیست‌محیطی، ارتقای امنیت غذایی، ترویج توسعه پایدار و تضمین آینده‌ای انعطاف‌پذیرتر را فراهم آورد.

## مواد و روش‌ها

محل آزمایش در شرق و مرکز استان گیلان در شمال ایران و شامل ۱۴ روستا از شهرستان‌های لنگرود (لطفعلی گوار)، لاهیجان (نوبیجار، حاج‌سلیم محله، سپهرپشت، گورندان، شیخ‌علی کلایه، پاشاکی و گلکش)، سیاهکل (سلش دیسام و اشکراب)، رشت (علی بزایه و چپک ناظمی) و شفت (خرفکل و ویسرود) بود (شکل ۱). مجموع مساحت این شهرستان‌ها ۳۶۵۱ کیلومترمربع می‌باشد (Statistical Centre of Iran, 2016). آب و هوای منطقه معتدل مرطوب و سرد مرطوب با میانگین بارندگی ۱۳۴۱ میلی‌متر و دمای سالانه ۱۵ درجه سلسیوس است (Meteorological Organization of Iran, 2025).

در این مطالعه از روش‌شناسی آمیخته (Mixed Methods Design) برای تحلیل هم‌زمان ردپای کربن و دانش سنتی کشاورزان در زمینه عوامل مرتبط بهره گرفته شد. انتخاب روستاها به‌صورت هدف‌مند (Purposeful sampling) و با توجه به پوشش تنوع فضایی و مدیریتی (جلگه‌ای و کوهپایه‌ای) انجام شد. افراد نمونه با روش گلوله برفی (Snowball sampling) و شامل ۳۰ خانوار (۶۰ نفر شالی‌کار) به‌عنوان اطلاع‌رسان (Informants) با حداقل ۱۵ سال تجربه در شیوه‌های کشت سنتی رقم هاشمی انتخاب شدند. داده‌های کیفی با استفاده از مردم‌نگاری (Ethnography)، شامل مشاهده مستقیم و مشارکتی (Direct and participatory observation) و مصاحبه‌های نیمه‌ساختارمند تا دستیابی به اشباع نظری (Theoretical saturation) جمع‌آوری شدند. اهمیت هر مؤلفه دانش سنتی با امتیازدهی (Scoring or point allocation) در مقیاس صفر تا صد سنجیده و فراوانی ثبت نسبی یا استناد (Relative frequency of citation) به‌عنوان شاخصی برای برآورد گستره توزیع دانش سنتی محاسبه شد. تحلیل داده‌های کیفی با کدگذاری باز، محوری و انتخابی (Open, axial and selective coding) در نرم‌افزار MAXQDA 2020 و با ترسیم نقشه مفهومی (Max map) انجام شد. در ادامه اعتبار نتایج از طریق بازبینی مشارکت‌کنندگان (Member checking)، مثلث‌سازی داده‌ها (Triangulation data) (مصاحبه، مشاهده و اسناد محلی) و ارزیابی همتایان پژوهشگر (Peer review) تأمین شد.

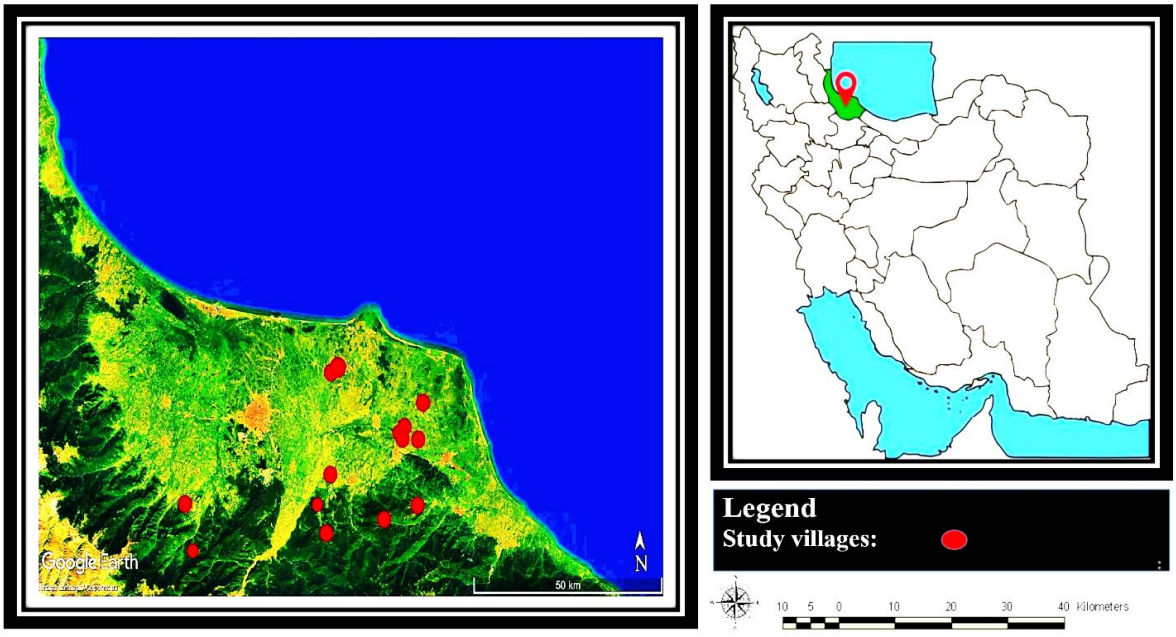
داده‌های کمی مزارع برنج در ابعاد کم‌تر از ۰/۵، ۱-۰/۵ و بیش‌تر از یک هکتار نیز از طریق پرسش‌نامه ساختاریافته شامل عملکرد شلتوک و مصرف نهاده‌ها گردآوری شد. همچنین برآورد رد پای کربن با استفاده از ارزیابی چرخه عمر (Life cycle assessment) و دستورالعمل‌های هیئت بین‌دولتی تغییرات اقلیمی (Intergovernmental Panel on Climate Change) محاسبه شد. ارزیابی چرخه عمر شامل مراحل تعریف هدف و دامنه، گردآوری داده‌های چرخه عمر، محاسبه پتانسیل گرمایش جهانی و تفسیر نتایج می‌باشد. این ارزیابی مطابق استانداردهای ISO14040 و ISO14044 و با واحد عملکردی وزن و مساحت یعنی کیلوگرم دی‌اکسید کربن معادل بر کیلوگرم شلتوک برنج در سال ($kg\ CO_{2\text{-}eq}.kg^{-1}.y^{-1}$) و همچنین کیلوگرم دی‌اکسید کربن معادل بر هکتار در سال ($kg\ CO_{2\text{-}eq}.ha^{-1}.y^{-1}$) انجام شد تا امکان مقایسه نتایج با مطالعات مشابه فراهم شود (Kashyap & Agarwal, 2021; Arunrat *et al*., 2022). مرز سیستم به‌صورت «از آماده‌سازی زمین تا برداشت محصول» تعریف و کلیه فعالیت‌های مرتبط با این بازه شامل آماده‌سازی زمین، نشاکاری، آبیاری، مصرف کود و سم، عملیات زراعی و برداشت در تحلیل لحاظ و مراحل پس از برداشت مستثنی شد. تمام گازهای گلخانه‌ای منتشرشده مانند دی‌اکسید کربن، متان و اکسید نیتروژن در طول چرخه عمر شلتوک

برنج با ضرایب پتانسیل گرمایش جهانی ۱، ۲۸ و ۲۶۵ محاسبه و به واحد استاندارد دی‌اکسید کربن معادل تبدیل شدند. داده‌ها از نظر نرمال بودن با آزمون شاپیرو-ویلک (Shapiro-Wilk) بررسی شدند و در صورت غیر نرمال بودن، آزمون ناپارامتری کروسکال- والیس (Kruskal-Wallis) با آزمون تعقیبی دان ( Dunns post –hoc test) و اصلاح بونفرونی (Bonferroni correction) برای مقایسه‌های زوجی اعمال شد.

انتشار گازهای گلخانه‌ای شامل انتشارات مستقیم (انتشار $N_2O$ به‌دلیل محتوای N در کود شیمیایی، بقایای محصول و کود حیوانی، انتشار $CH_4$ به‌دلیل کشت برنج و انتشار $CO_2$ به‌خاطر استفاده از سوخت در ماشین‌آلات مزرعه) و انتشارات غیرمستقیم (نیروی انسانی، تولید مواد شیمیایی کشاورزی و سایر نهاده‌ها) است. عوامل انتشار (EFs) مورد استفاده بر اساس مطالعات تجربی در سطح مزرعه، مطالعات جهانی یا مقادیر پیش‌فرض IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) بودند (جدول ۱). ابتدا، انتشار گازهای گلخانه‌ای مرتبط با ورودی‌ها از جمله نیروی انسانی، بذر، مواد شیمیایی و سوخت مزرعه با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شد:

$$CF_A = \sum_{i=1}^{n}(A_i \times EF_i) \qquad (۱)$$

که در آن، $CF_A$ مجموع انتشار گازهای گلخانه‌ای بر حسب کیلوگرم دی‌اکسید کربن معادل، $A_i$ داده ورودی کشاورزی i ام و $EF_i$ عامل انتشار فرآیند i ام (بر حسب کیلوگرم دی‌اکسید کربن معادل در واحد جرم) است. در مورد نیروی انسانی از معادله انرژی کار انسانی ( Hosseini *et al*., 2022) استفاده شد.




شکل ۱- نقشه منطقه مورد مطالعه

Figure 1. Map of the studied region

جدول ۱- ضرایب رد پای کربن در گیاه برنج

Table 1. Carbon footprint coefficients for rice production

| Row | Item | Unit | Carbon footprint | Source |
|---|---|---|---|---|
| 1 | Seed | kg $CO_2$-eq·kg$^{-1}$ | 1.88 | Yang *et al*., 2024 |
| 2 | Human labour | kg $CO_2$-eq·MJ$^{-1}$ | 0.2 | - |
| 3 | Farmyard manure | kg $CO_2$-eq·kg$^{-1}$ | 0.1097 | Champrasert *et al*., 2020 |
| 4 | Nitrogen | kg $CO_2$-eq·kg$^{-1}$ | 2.6 | Champrasert *et al*., 2020 |
| 5 | Phosphate | kg $CO_2$-eq·kg$^{-1}$ | 0.252 | Champrasert *et al*., 2020 |
| 6 | Potassium | kg $CO_2$-eq·kg$^{-1}$ | 0.16 | Champrasert *et al*., 2020 |
| 7 | Herbicide | kg $CO_2$-eq·kg$^{-1}$ | 10.15 | Yang *et al*., 2024 |
| 8 | Fungicide | kg $CO_2$-eq·kg$^{-1}$ | 10.15 | Yang *et al*., 2024 |
| 9 | Insecticide | kg $CO_2$-eq·kg$^{-1}$ | 16.61 | Yang *et al*., 2024 |
| 10 | Diesel fuel | kg $CO_2$-eq·kg$^{-1}$ | 2.18 | Champrasert *et al*., 2020 |

انتشار مستقیم و غیرمستقیم $N_2O$ با استفاده از دستورالعمل‌های استاندار ۲۰۰۶ و ۲۰۱۹ IPCC محاسبه شدند (Kashyap & Agarwal, 2021; Arunrat *et al.*, 2022):

$$N2O_{total} = N2O_{direct} + N2O_{indirect} \quad (۲)$$

$$CF_{N_2O} = N2O_{total} \times 265 \quad (۳)$$

که در آن، $CF_{N2O}$ انتشار گازهای گلخانه‌ای به‌دلیل $N_2O$ و عدد ۲۶۵ پتانسیل گرمایش جهانی $N_2O$ است.

انتشار مستقیم متان به‌دلیل کشت غرقابی برنج ($CF_{CH4}$) نیز با استفاده از رابطه (۴) محاسبه شد:

$$CF_{CH_4} = EF_d \times t \times A \times 28 \quad (۴)$$

در این رابطه، t مدت زمان رشد محصول به روز، A مساحت برداشت شده بر حسب هکتار، عدد ۲۸ پتانسیل گرمایش جهانی $CH_4$ و $EF_d$ عامل انتشار روزانه برای یک منطقه برداشت است که طبق رابطه (۵) محاسبه شد:

$$EF_d = EF_c \times SF_w \times SF_p \times SF_o \quad (۵)$$

که در آن، $EF_c$ عامل انتشار پایه برای مزارع با غرقاب پیوسته بدون اصلاحات آلی، $SF_w$ و $SF_p$ عوامل مقیاس‌بندی برای در نظر گرفتن تفاوت‌ها در رژیم آبی به‌ترتیب در طول دوره کشت و قبل از آن و $SF_o$ نیز عامل مقیاس‌بندی برای نوع و مقدار اصلاحات آلی اعمال شده است که برای هر کشاورز بر اساس رابطه (۶) محاسبه شد:

$$SF_o = (1 + \sum_{i=1}^{n} ROA_i \times CFOA_i)^{0.59} \quad (۶)$$

در این رابطه، $ROA_i$ نرخ کاربرد اصلاح کننده آلی i بر حسب تن در هکتار و $CFOA_i$ ضریب تبدیل برای اصلاح کننده آلی i است که با توجه به فاصله زمانی بیش از ۳۰ روز میان اختلاط بقایای کاه برنج با خاک و زمان کشت، ضریب تبدیل ۰/۲۹ در نظر گرفته شد.

سرانجام، رد پای کربن در واحد سطح (کیلوگرم دی‌اکسید کربن معادل در هکتار محصول در سال) و در واحد وزن (کیلوگرم دی‌اکسید کربن معادل در کیلوگرم محصول در سال) با روابط زیر محاسبه شد (Kashyap & Agarwal, 2021; Arunrat *et al.*, 2022):

$$CF_{Unit\ area} = CF_A + CF_{N2O} + CF_{CH4} \quad (۷)$$

$$CF_{Unit\ weight} = \frac{CF_{total}}{Yield} \quad (۸)$$

برای افزایش اعتبار نتایج، تحلیل حساسیت تک‌متغیره (One-at-a-time sensitivity analysis) ± ۱۰٪ روی تمام متغیرهای کلیدی (آبیاری، کود، سوخت، نیروی انسانی، بذر، سموم و عملکرد محصول) اعمال شد.

## نتایج و بحث

### رد پای کربن برنج

نظام مدیریتی کشت برنج در مزارع کوچک، متوسط و بزرگ از نظر الگوی زراعی و تقویم کشت عمدتاً مشابه است و تفاوت‌ها بیش‌تر در شدت مصرف نهاده‌ها و سطح مکانیزاسیون دیده می‌شود. کشت برنج در منطقه حدود ۱۲۰ روز طول می‌کشد و نشاکاری در اردیبهشت، وجین در خرداد و تیر و برداشت از اواسط مرداد تا شهریور انجام می‌شود. رقم غالب، هاشمی است و میانگین مساحت زیر کشت هر خانوار حدود ۸۰۰۰ متر مربع است. منابع آبی شامل بارندگی، سد سفیدرود، کانال‌های انتقال آب، رودخانه‌ها و آب‌بندان‌ها هستند. برنامه آبیاری منطقه با تقویم زراعی هماهنگ است و شامل مرحله اولیه برای شخم و نشا از اواخر فروردین تا اواخر اردیبهشت و مرحله نوبتی پس از نشاکاری (معمولاً از ابتدای خرداد) با الگوی چهار روز قطع آب و هشت روز آبیاری تا اواخر تیر یا اوایل مرداد می‌باشد. با افزایش اندازه مزرعه، مصرف بذر، کود نیتروژن و فسفر و سموم در واحد سطح کاهش می‌یابد. میزان بذر مصرفی به‌طور متوسط ۱۱۳ کیلوگرم در هکتار، کود اوره با ۴۶ درصد نیتروژن در حدود ۱۱۳ کیلوگرم، کود فسفره در حدود ۵۸ کیلوگرم، کود سولفات پتاسیم برای خوشه‌زایی در حدود ۳۶/۵ کیلوگرم و کود حیوانی ۱۶ کیلوگرم است. برای کنترل علف‌های هرز در حدود سه لیتر در هکتار انواع علف‌کش و برای مبارزه با آفات و بیماری‌ها در حدود ۳/۳ لیتر حشره‌کش و ۰/۸ لیتر قارچ‌کش نیز مصرف می‌شود. مصرف کود دامی تنها در مزارع بزرگ مشاهده می‌شود که بیانگر دسترسی بیش‌تر به منابع آلی و تنوع بالاتر نظام نهاده‌ای است. مصرف کود پتاسیم نیز در این مزارع به‌طور محسوسی بالاتر است و نشان‌دهنده توجه بیشتر به مدیریت تغذیه گیاه بر اساس نیاز واقعی خاک است.

با افزایش ابعاد مزرعه، سطح مکانیزاسیون نیز افزایش می‌یابد که بیانگر کارایی مدیریتی بالاتر در مزارع بزرگ‌تر است. دسترسی بهتر به ماشین‌آلات و برنامه‌ریزی دقیق‌تر به کشاورزان امکان می‌دهد مصرف نهاده‌ها را بدون کاهش عملکرد، کاهش دهند. گسترش مکانیزاسیون نیاز به نیروی انسانی را کاهش داده و در عین حال، مصرف سوخت در واحد سطح تغییر قابل توجهی نداشته است. ازاین‌رو، گذار به نظام‌های نیمه‌مکانیزه و مکانیزه به بهبود بهره‌وری عملیات زراعی منجر شده است. در حدود ۷۰ تا ۹۰ نفر-روز نیروی کار انسانی طی کل فصل رشد به ازای هر هکتار

نیاز است که معادل فعالیت ۰/۶ تا ۰/۷۵ نفر به‌صورت ثابت در طول فصل می‌باشد. نیروی کار دستی بسته به درجه مکانیزاسیون شامل فعالیت در مراحل کاشت، آماده‌سازی زمین شامل شخم با تیلر، مرزبندی و تسطیح دستی، تهیه خزانه، نشاکاری دستی و در حالت مکانیزه شامل تنظیم و حمل سینی، نظارت بر دستگاه، داشت (وجین دستی، کودپاشی، سم‌پاشی)، برداشت و جمع‌آوری شامل حمل محصول، جمع‌آوری کاه، نظارت بر دروگر، بارگیری و غیره است. عملکرد شلتوک در مزارع بزرگ عموماً بیش‌تر از مزارع کوچک و متوسط است (۳۱۰۱ در مقابل ۲۲۱۶ تا ۲۲۷۱ کیلوگرم در هکتار) که نشان‌دهنده بهره‌وری بالاتر زمین در مقیاس بزرگ‌تر است. افزایش هم‌زمان عملکرد و کاهش مصرف برخی نهاده‌ها از نظر اثر نهایی آن‌ها بر انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌تواند پیامدهای زیست‌محیطی مثبتی داشته باشد (جدول ۲).

میانگین پتانسیل گرمایش جهانی در نظام کشت مورد مطالعه برابر با ۳۰۳۱ کیلوگرم دی اکسید کربن معادل بر هکتار در سال است. آبیاری و انتشار متان طی فصل رشد در گیاه برنج با میانگین ۱۹۲۳ کیلوگرم دی اکسید کربن معادل بر هکتار در سال (در حدود ۶۴ درصد) بیش‌ترین مقدار را به‌خود اختصاص داده است. مصرف و پیامدهای استفاده از کودهای نیتروژنه شامل انتشار اکسید نیتروژن به‌دلیل محتوای نیتروژن در کود اوره، حیوانی و بقایا ۶ درصد و کود اوره ۴ درصد است که در مجموع ۱۰ درصد می‌شود. سهم سوخت و نیروی انسانی ۸ درصد، بذر ۷ درصد، حشره‌کش ۲ درصد، علف‌کش یک درصد، کود پتاسیم، فسفاته، قارچ‌کش و کود حیوانی کم‌تر از یک درصد است (جدول ۳ و شکل ۲).

جدول ۲- ویژگی‌های مدیریتی و تقویم زراعی، مصارف و تولیدات مزارع نمونه برنج در منطقه مورد مطالعه

Table 2. Management practices, cropping calendar, inputs, and outputs of the sampled rice farms in the studied region

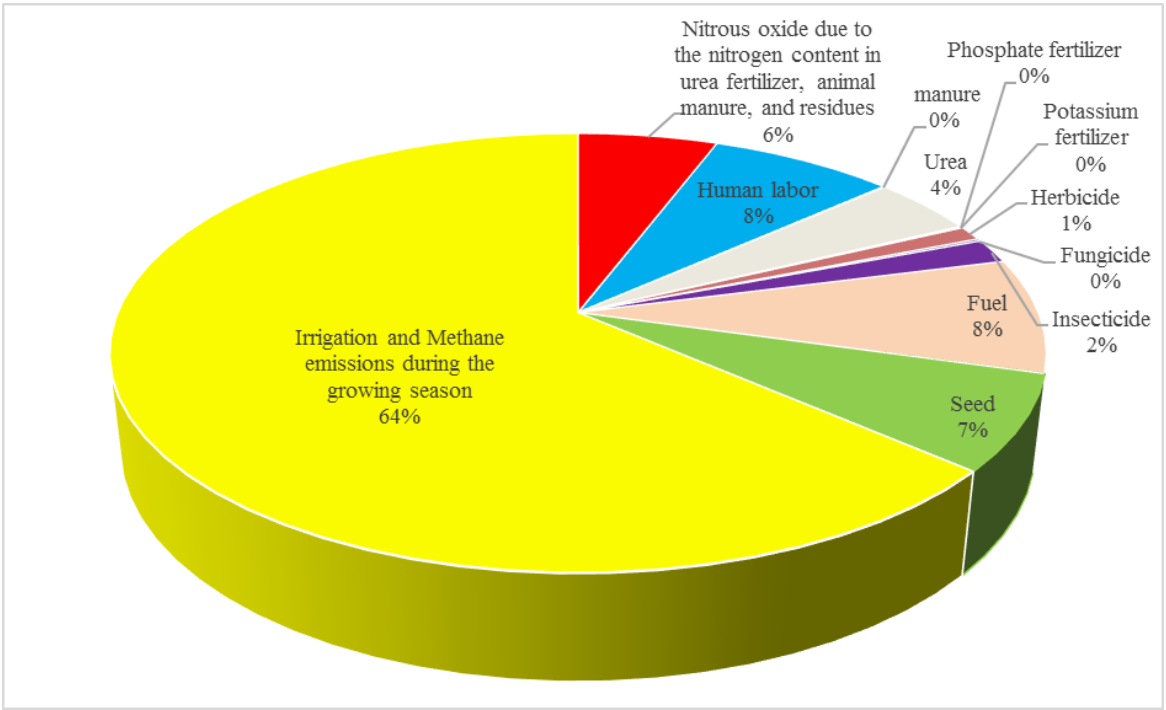
| Managerial variable | Small farm (< 0.5 ha) | Mediumfarm (0.5–1 ha) | Large farm (> 1 ha) | Total mean |
|---|---|---|---|---|
| Rice variety | Hashemi | Hashemi | Hashemi | |
| Seed (kg) | 121.43 | 114.71 | 104.11 | 113.42 |
| Farmer experience (Year) | 15 years or more | 15 years or more | 15 years or more | |
| Land and seedbed preparation (Month) | April -May | April -May | April -May | |
| Transplanting (Month) | May | May | May | |
| Growth duration (Day) | About 120 days | About 120 days | About 120 days | |
| Irrigation method | Traditional continuous flooding | Traditional continuous flooding | Traditional continuous flooding | |
| Urea fertilizer (kg/ha) | 133.33 | 103.68 | 100.68 | 112.56 |
| Phosphate fertilizer (kg/ha) | 60.95 | 57.35 | 56.16 | 58.15 |
| Potassium fertilizer (kg/ha) | 23.81 | 29.41 | 56.16 | 36.46 |
| Manure (kg/ha) | 0 | 0 | 47.95 | 15.98 |
| Management of residues | No burning of straw; grazing by livestock or return to the soil | No burning of straw; grazing by livestock or return to the soil | No burning of straw; grazing by livestock or return to the soil | |
| Weeds control | Hand weeding + use of herbicides | Hand weeding + use of herbicides | Use of herbicides | |
| Herbicide (kg/ha) | 3.71 | 3.24 | 2 | 2.98 |
| Pests control | Use of insecticides | use of insecticides | Use of insecticides | |
| Insecticide (kg/ha) | 4.10 | 3.46 | 2.26 | 3.27 |
| Fungicide (kg/ha) | 1.19 | 0.71 | 0.46 | 0.79 |
| Mechanisation | Traditional cultivation Semi-mechanised | Semi-mechanised mechanised | Mechanised | |
| Human labour (MJ/ha) | 1270.80 | 1204.35 | 988.4 | 1154.52 |
| Fuel (L/ha) | 93.6 | 94.97 | 98.86 | 95.81 |
| Cultivated land (ha) | 0.26 | 0.68 | 1.46 | 0.8 |
| Harvesting period | August–September | August–September | August–September | |
| Paddy rice (kg/ha) | 2215.62 | 2270.59 | 3101.37 | 2529.19 |
| Straw and stubble (kg/ha) | 2658.74 | 2724.71 | 3721.64 | 3035.03 |

جدول ۳- منابع انتشار (kg $CO_{2\text{-eq}}.ha^{-1}.y^{-1}$) و رد پای کربن (kg $CO_{2\text{-eq}}.kg^{-1}.y^{-1}$) در نظام کشت برنج در منطقه مورد مطالعه

Table 3. Emission sources (kg $CO_{2\text{-eq}}.ha^{-1}.y^{-1}$) and carbon footprint (kg $CO_{2\text{-eq}}.kg^{-1}.y^{-1}$) in rice cultivation systems in the studied region

| Emission source | Small farm (Mean ± SD) | Medium farm (Mean ± SD) | Large farm (Mean ± SD) | Total mean | Kruskal–Wallis test |
|---|---|---|---|---|---|
| Direct and indirect $N_2O$ emissions (due to N content in fertilisers and residues) | 188.9 ± 123.3 | 154.7 ± 44.9 | 178.4 ± 58.0 | 173.99 | 0.736 $^{ns}$ |
| Human labour | 253.7 ± 129.1 | 240.9 ± 39.1 | 197.7 ± 55.4 | 230.74 | 0.319 $^{ns}$ |
| Manure | 0.0 ± 0.0 | 0.0 ± 0.0 | 5.26 ± 6.19 | 1.75 | 0.003$^{*}$ |
| Urea fertiliser | 148.1 ± 93.2 | 124.0 ± 37.9 | 120.4 ± 32.6 | 130.83 | 0.000$^{*}$ |
| Phosphate fertiliser | 1.20 ± 1.11 | 1.13 ± 0.37 | 1.10 ± 0.27 | 1.14 | 0.000$^{*}$ |
| Potassium fertiliser | 2.14 ± 4.99 | 2.36 ± 2.43 | 4.5 ± 1.80 | 3 | 0.000$^{*}$ |
| Herbicide | 37.7 ± 16.1 | 32.8 ± 6.3 | 25.4 ± 10.2 | 31.97 | 0.085 $^{ns}$ |
| Fungicide | 11.6 ± 10.0 | 7.16 ± 0.94 | 5.91 ± 1.68 | 8.22 | 0.054 $^{ns}$ |
| Insecticide | 68.0 ± 39.5 | 57.4 ± 11.6 | 48.9 ± 14.0 | 58.11 | 0.531 $^{ns}$ |
| Fuel | 250.9 ± 127.3 | 253.9 ± 50.2 | 264.3 ± 74.0 | 256.09 | 0.968 $^{ns}$ |
| Seed | 225.6 ± 128.6 | 215.6 ± 60.9 | 195.7 ± 52.8 | 212.33 | 0.848 $^{ns}$ |
| Irrigation (methane emissions during the growing season) | 1957.6 ± 906.3 | 1867.0 ± 339.3 | 1944.9 ± 565.3 | 1923.14 | 0.999 $^{ns}$ |
| Total global warming potential (kg $CO_2$eq per ha per year) | 3144.7 ± 1552.0 | 2956.9 ± 532.1 | 2992.4 ± 859.0 | 3031.33 | 0.999 $^{ns}$ |
| Carbon footprint of paddy rice (kg $CO_2$eq per kg) | 1.42 ± 0.70 | 1.30 ± 0.23 | 0.96 ± 0.28 | 1.23 | 0.121 $^{ns}$ |

$^{ns}$ and $^{*}$ Not-significant and significant at 5% probability level, respectively.




شکل ۲- منابع انتشار (درصد) در نظام کشت برنج در منطقه مورد مطالعه

Figure 2. Emission sources (percent) in rice cultivation systems in the studied region

در مطالعه دستان و همکاران (Dastan *et al.*, 2016) پتانسیل گرمایش جهانی در نظام کشت رایج و بهبودیافته ۳۶۸۸ و ۲۹۲۹ کیلوگرم دی‌اکسید کربن معادل بر هکتار در سال بود. همچنین، انتشار متان طی فصل رشد در این دو نظام ۸۳۱ و ۱۵۷۵ کیلوگرم دی اکسید کربن معادل بر هکتار در سال (۲۸ و ۴۳ درصد) و انتشار $N_2O$ در هر دو کشت به‌میزان ۸۴۰ کیلوگرم دی اکسید کربن معادل بر هکتار در سال (۲۹ و ۲۳ درصد) بود. کاشیاپ و آگاروال (Kashyap & Agarwal, 2021)، میانگین انتشار گازهای گلخانه‌ای برنج در پنجاب را ۸۸۰۰ کیلوگرم دی‌اکسید کربن معادل بر هکتار در سال و مهم‌ترین عوامل انتشار را سوزاندن کاه در مزرعه (۳۶ درصد)، انتشار $N_2O$

ناشی از محتوای نیتروژن در کود و بقایا (۱۹ درصد) و انتشار متان طی فصل رشد (۱۶ درصد) عنوان کردند. آرونرات و همکاران (Arunrat *et al*., 2022) بیان کردند که انتشار گازهای گلخانه‌ای برنج در تایلند در روش کشت ارگانیک ۳۲۹۰ و در روش متعارف ۴۹۲۲ کیلوگرم دی‌اکسید کربن معادل بر هکتار در سال است و مهم‌ترین عوامل را انتشار متان طی فصل رشد و انتشار $N_2O$ ناشی از محتوای نیتروژن در کود و بقایا گزارش کردند. ایشان همچنین افزودند که روش ارگانیک، انتشار را از طریق ترسیب کربن در خاک کاهش می‌دهد. مقایسه نتایج مطالعه حاضر با مطالعات دیگران نشان می‌دهد که پتانسیل گرمایش جهانی کشت برنج در استان گیلان در بازه میانی طیف جهانی قرار دارد، به‌طوری که کم‌تر از نظام‌های پرنهاده و پرمحصول در پنجاب هند و جنوب شرقی آسیا، اما بالاتر از برخی نظام‌های بهبودیافته یا ارگانیک است. این یافته‌ها نشان می‌دهند است که افزایش عملکرد و شدت نهاده‌ها لزوماً با کاهش رد پای کربن همراه نیست و مصرف بیش‌تر انرژی و کود نیتروژن می‌تواند انتشار مطلق گازهای گلخانه‌ای را تشدید کند. مشابه مطالعات دیگران، انتشار متان طی فصل رشد عامل غالب انتشار در مطالعه حاضر نیز بوده است.

میانگین رد پای کربن برنج در منطقه مورد مطالعه ۱/۲۳ کیلوگرم دی‌اکسید کربن معادل به‌ازای هر کیلوگرم محصول در سال برآورد شد (جدول ۳). این مقدار با مطالعات پیشین در ایران و دیگر کشورهای آسیایی تفاوت دارد. در مطالعه دستان و همکاران (Dastan *et al*., 2016) رد پای کربن نظام تولید رایج منطقه برابر ۰/۶۵ و نظام بهبودیافته ۰/۴۸ کیلوگرم دی‌اکسید کربن معادل بر کیلوگرم محصول در سال به‌دست آمد. کاشیاپ و آگاروال (Kashyap & Agarwal, 2021) رد پای کربن برنج را ۱/۲۰ کیلوگرم دی‌اکسید کربن معادل بر کیلوگرم محصول در سال محاسبه کردند. در مطالعه آرونرات و همکاران (Arunrat *et al*., 2022) رد پای کربن در روش ارگانیک ۱/۱۷ و در متعارف ۰/۹۳ کیلوگرم دی‌اکسید کربن معادل بر کیلوگرم محصول در سال بود. در این مطالعه، رد پای کربن به‌ازای واحد محصول نسبت به برخی پژوهش‌های بین‌المللی بالاتر بود که عمدتاً ناشی از عملکرد کم‌تر رقم کیفی هاشمی است. میانگین عملکرد رقم‌های پرمحصول در سایر مطالعات بین ۲/۸۱ تا ۷/۴۱ تن در هکتار گزارش شده است، در حالی‌که عملکرد رقم هاشمی در این پژوهش ۲/۵۳ تن در هکتار بود و تفاوت قابل توجهی را نشان می‌دهد. این یافته همسو با نتایج آرونرات و همکاران (Arunrat *et al*., 2022) نشان می‌دهد که کاهش عملکرد در نظام‌های ارگانیک یا کیفی می‌تواند رد پای کربن را در واحد وزن محصول افزایش دهد، حتی اگر انتشار کل در واحد سطح کاهش یابد. بنابراین، اتکا به شاخص رد پای کربن بر مبنای واحد محصول به‌تنهایی می‌تواند گمراه کننده باشد و استفاده هم‌زمان از شاخص‌های مبتنی بر واحد سطح برای مقایسه نظام‌های کشت ضروری است، زیرا عملکرد محصول می‌تواند اثر پنهان‌کننده‌ای بر رد پای کربن داشته باشد (Kashyap & Agarwal, 2021). تفاوت‌های مشاهده شده در مطالعات بین‌المللی نشان می‌دهد که مقایسه مستقیم رد پای کربن بدون در نظر گرفتن شرایط اقلیمی، شدت نهاده‌ها، نوع رقم و روش محاسبه می‌تواند برداشت‌های ساده‌انگارانه‌ای در پی داشته باشد.

در بین مزارع کوچک، متوسط و بزرگ کشت برنج، تفاوت‌های معنی‌دار آماری عمدتاً در مصرف نهاده‌هایی مانند کود دامی و کودهای شیمیایی (اوره، فسفات و پتاس) مشاهده شد. نتایج نشان داد که مزارع بزرگ نسبت به مزارع کوچک و متوسط، در مصرف کود دامی و همچنین اوره و پتاس تفاوت معنی‌دار دارند، در حالی‌که تفاوت در مؤلفه‌هایی مانند انتشار $N_2O$، متان ناشی از آبیاری، مصرف سوخت، بذر و نیروی انسانی معنی‌دار نبود. این یافته‌ها نشان می‌دهند که داده‌ها توانایی آشکارسازی اختلاف‌های بزرگ مدیریتی را دارند، اما در متغیرهایی با پراکندگی طبیعی بالا و همپوشانی مقادیر بین گروه‌ها، توان آماری برای تشخیص اختلاف‌های کوچک تا متوسط کاهش می‌یابد. کفایت داده‌ها برای تحلیل مطالعه از دو منظر ارزیابی شد. از نظر کیفی، حجم نمونه‌برداری تا دستیابی به اشباع نظری کافی بوده و تنوع الگوهای مدیریتی مزارع در منطقه را پوشش داده است. از نظر کمی نیز هر گروه شامل ۱۰ مزرعه بود که با استانداردهای مطالعات کشاورزی کوچک و متوسط سازگار است. با این‌حال، پراکندگی بالای برخی متغیرها ($N_2O$، متان، بذر و نیروی انسانی) باعث کاهش توان آماری آزمون‌های ناپارامتریک شده است. بر این اساس، عدم مشاهده اختلاف معنی‌دار آماری در برخی شاخص‌ها به معنی عدم وجود تفاوت واقعی در بین گروه‌ها نیست، بلکه محدودیت توان آماری و نوسانات ذاتی سامانه‌های زراعی را منعکس می‌کند (جدول‌های ۳ و ۴).

تحلیل حساسیت تک‌متغیره نشان داد که رد پای کربن کشت برنج نسبت به تغییر ۱۰٪± در متغیرها واکنش متفاوتی دارد. بیش‌ترین حساسیت مربوط به انتشار متان ناشی از آبیاری بود. افزایش یا کاهش ۱۰ درصدی این مؤلفه به‌ترتیب موجب تغییر حدود شش درصدی در رد پای کربن بر حسب سطح و محصول شد که اهمیت مدیریت آب و فرآیندهای غرقابی را در انتشار گازهای گلخانه‌ای برجسته می‌کند. سایر نهاده‌ها مانند کودهای شیمیایی، سوخت، نیروی انسانی و بذر اثر محدودتری داشتند و تغییر ۱۰ درصد در آن‌ها نوسانات کم‌تر از یک درصد در رد پای کربن ایجاد کردند. در مورد عملکرد محصول، افزایش ۱۰ درصد باعث کاهش تقریباً ۹ درصد و کاهش ۱۰ درصد موجب افزایش بیش از ۱۱ درصد رد پای کربن شد که رابطه معکوس بین عملکرد و شدت انتشار کربن را نشان می‌دهد. این یافته بر اهمیت بهبود عملکرد به‌عنوان راهبردی کارآمد برای کاهش شدت کربن تولید برنج تأکید دارد، به‌گونه‌ای که حتی بدون تغییر در میزان مصرف نهاده‌ها نیز می‌توان شدت انتشار را کاهش داد. همچنین نتایج نشان دادند که حتی زمانی که تفاوت‌های آماری معنی‌دار مشاهده نمی‌شود، مدیریت آب نقش غالبی در انتشار دارد و داده‌های جمع‌آوری شده برای شناسایی متغیرهای مهم کافی و معتبر هستند (جدول ۵).

جدول ۴- مقایسه‌های زوجی گروه‌ها با آزمون تعقیبی دان و اعمال اصلاح بونفرونی

Table 4. Pairwise group comparisons using Dunn’s post-hoc test with Bonferroni correction

| Emission source | Pairwise comparison | Significant level | Adjusted significant level |
|---|---|---|---|
| Manure | Small–Medium | 1.000 $^{ns}$ | 1.000 $^{ns}$ |
| | Small–Large | 0.030$^{*}$ | 0.010$^{*}$ |
| | Medium–Large | 0.030$^{*}$ | 0.010$^{*}$ |
| Urea fertiliser | Small–Medium | 0.011$^{*}$ | 0.033$^{*}$ |
| | Small–Large | 0.000$^{*}$ | 0.000$^{*}$ |
| | Medium–Large | 0.011$^{*}$ | 0.033$^{*}$ |
| Phosphate fertiliser | Small–Medium | 0.011$^{*}$ | 0.032$^{*}$ |
| | Small–Large | 0.000$^{*}$ | 0.000$^{*}$ |
| | Medium–Large | 0.011$^{*}$ | 0.032$^{*}$ |
| Potassium fertiliser | Small–Medium | 0.166 $^{ns}$ | 0.499 $^{ns}$ |
| | Small–Large | 0.000$^{*}$ | 0.000$^{*}$ |
| | Medium–Large | 0.006$^{*}$ | 0.018$^{*}$ |

$^{ns}$ and $^{*}$ Not-significant and significant at 5% probability level, respectively.

جدول ۵- تحلیل حساسیت تک‌متغیره در میانگین ردپای کربن کشت برنج نسبت به متغیرهای کلیدی

Table 5. One-Way Sensitivity Analysis of the Mean Carbon Footprint in Rice Cultivation Relative to Key Variables

| Variable | ΔGWP% (per hectare) | ΔCF% (per kg of produce) |
|---|---|---|
| Irrigation ($CH_4$ emissions) | ±6.3 | ±6.3 |
| Fuel | ±0.9 | ±0.9 |
| Human labour | ±0.8 | ±0.8 |
| Seed | ±0.7 | ±0.7 |
| $N_2O$ emissions | ±0.6 | ±0.6 |
| Urea fertiliser | ±0.4 | ±0.4 |
| Insecticide | ±0.2 | ±0.2 |
| Herbicide | ±0.1 | ±0.1 |
| Other inputs | < ±0.05 | < ±0.05 |
| Crop yield | 0.0 | −9.1 / +11.1 |

One-way sensitivity analysis was performed by varying each parameter individually by ±10%, while holding all others constant.

در این مطالعه، حجم محدود نمونه و پراکندگی داده‌ها توان آماری لازم برای شناسایی اختلاف‌های کوچک تا متوسط بین گروه‌ها را کاهش داد. علاوه بر این، تعمیم نتایج به سایر مناطق برنج‌کاری کشور باید با احتیاط انجام شود، چرا که نمونه‌برداری به‌صورت هدف‌مند و با تمرکز بر تنوع مدیریتی و شرایط محیطی محلی انجام شده است. در مطالعات آینده، افزایش تعداد نمونه‌ها و تکرار مکانی می‌تواند توان آماری را افزایش دهد، امکان شناسایی اثرات مدیریتی ظریف‌تر را فراهم کند و در نتیجه عدم قطعیت در برآورد رد پای کربن را کاهش دهد. همچنین، در این

پژوهش ضرایب انتشار گازهای گلخانه‌ای از منابع بین‌المللی معتبر و دستورالعمل‌های IPCC استخراج شدند تا امکان مقایسه با سایر مطالعات فراهم شود. با این‌حال، این ضرایب ممکن است تحت تأثیر ویژگی‌های محلی مانند رقم برنج، مدیریت آبیاری، ویژگی‌های خاک و شرایط اقلیمی متفاوت باشند. برای برنج رقم هاشمی در استان گیلان، داده‌های میدانی موجود نبود و استفاده از ضرایب پیش‌فرض بین‌المللی به‌عنوان بهترین تقریب انتخاب شده است. این محدودیت ذاتی، دقت برآورد رد پای کربن را کاهش می‌دهد و باید در مطالعات آینده با جمع‌آوری داده‌های محلی بهبود یابد.

**دانش سنتی و رد پای کربن برنج**

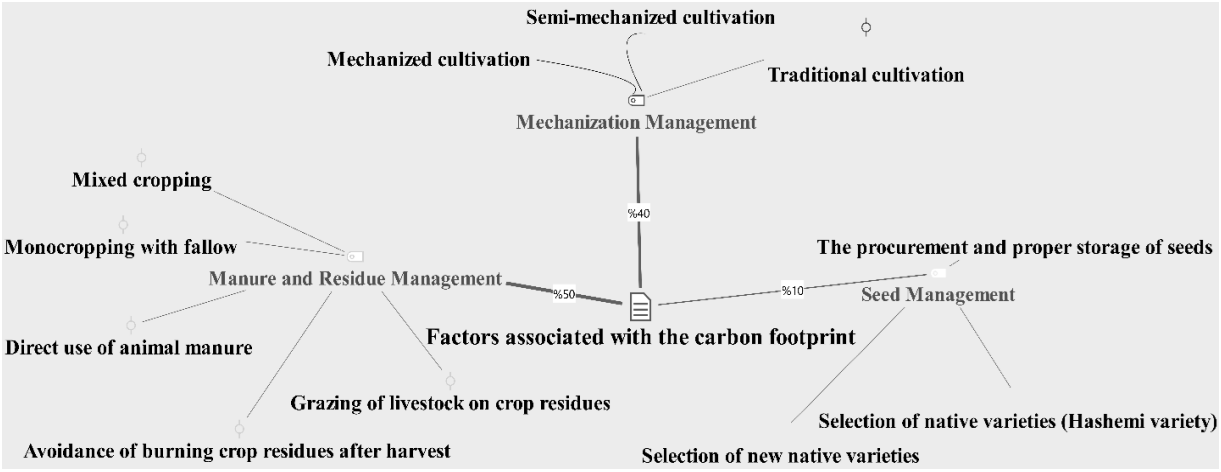
بخش عمده عناصر دانش ثبت شده در این پژوهش بازتاب دهنده رویکردهای عمومی و مشترک در نظام‌های سنتی کشت برنج در شمال ایران است. از دیدگاه کشاورزان، مدیریت کود آلی، مکانیزاسیون و بذر از جمله مؤلفه‌های مؤثر بر رد پای کربن تولید برنج به‌شمار می‌روند. اگرچه این شیوه‌های تجربی در بسیاری از مناطق برنج‌خیز ایران و جهان نیز شناخته شده و متداول هستند، اما در جامعه محلی مورد مطالعه به‌دلیل تداوم گسترده، انطباق با شرایط خردمقیاس اراضی (میانگین ۰/۸ هکتار) و ترکیب با ابزارهای نوین (مانند تیلر، سینی نشا و سورتینک مکانیزه) با میانگین فراوانی ثبت نسبی ۰/۶ به یک نظام دانشی پویا تبدیل شده است. در همین راستا، لیمپو و همکاران (Limpo *et al.*, 2014)، دیویا و همکاران (Dhivya *et al.*, 2024)، بیشت و همکاران (Bisht *et al.*, 2025) و سدانا و همکاران (Sedana *et al.*, 2025)، نیز بر نقش مؤلفه‌هایی نظیر استفاده از رقم‌های سنتی و ذخیره بذر، حفظ سلامت خاک، مدیریت آبیاری، کاربرد کودهای طبیعی، کنترل آفات و حفاظت از تنوع زیستی در پایداری نظام‌های کشاورزی تأکید کرده‌اند. بنابراین، اگرچه دانش سنتی کشاورزان منطقه از نظر بسیاری از مؤلفه‌های مدیریتی با یافته‌های علمی همسو است، اما نشان‌دهنده تمرکز بیش‌تر بر مدیریت مزرعه و نهاده‌های تولید است و کم‌تر به فرایندهای پیچیده بیوفیزیکی از جمله سازوکارهای تولید و انتشار متان می‌پردازد. ازاین‌رو، تلفیق دیدگاه‌های بومی با شواهد علمی می‌تواند زمینه‌ساز شناسایی راه‌کارهای عملی و متناسب با شرایط محلی برای بهبود مدیریت کربن در کشت برنج باشد.

مدیریت کود آلی شامل میانگین اثربخشی ۵۰ درصد است. در این بخش کشت تک‌محصول و آیش با ۰/۹۷ و عدم سوزاندن بقایای آلی با ۰/۹۰ بیش‌ترین فراوانی ثبت نسبی را به‌خود اختصاص دادند. در منطقه مورد مطالعه کشت تک‌محصولی رایج است و پس از برداشت محصول برنج در شهریورماه، در این مناطق، دام‌ها از صبح تا عصر در پس‌چر مزارع چرا می‌کنند. این شیوه بهره‌برداری در گویش محلی با عنوان اشکل چره (Aškal čarə) شناخته می‌شود. این نوع چرا، متناسب با شرایط جوی و میزان بقایای گیاهی در مزارع، تا فصل زمستان به‌جز روزهای برفی ادامه می‌یابد. در این دوره، استفاده از سایر منابع خوراک دام تا حدود نصف کاهش پیدا می‌کند. پوشش گیاهی مورد استفاده دام‌ها شامل گیاهان علفی یک‌ساله و چندساله مانند راتون (*Oryza sativa*)، گالی (*Carex spp*)، سوروف (*Echinochloa crus- galli*)، دم اسبی (*Equisetum ramosissimum* Desf.)، سورگوم (*Sorghum halepense*) و مرغ (*Cynodon dactylon*) است. آیش‌گذاری نیز به‌طور رایج برای جلوگیری از تخریب خاک و حفظ بهره‌وری آن به‌کار می‌رود. البته برخی خانوارها با محصور کردن زمین خود در فصل پاییز به کشت بقولات مانند لوبیا می‌پردازند و معتقد هستند که به تقویت زمین کمک می‌کند و منبع درآمد تکمیلی است (شکل‌های ۳ و ۴). در کشت برنج، بخش قابل توجهی از کاه تولیدی معمولاً به‌عنوان ضایعات سوزانده می‌شود. بهره‌برداری از کاه برای تغذیه دام و بازگرداندن بقایای گیاهی به خاک، ضمن جلوگیری از انتشار گازهای گلخانه‌ای، کربن آلی خاک را افزایش می‌دهد و ظرفیت ذخیره‌سازی آن را بهبود می‌بخشد. ویجایاکومار و پادما (Vijayakumar & Padma, 2023) در مطالعه خود اشاره داشتند که سوزاندن بقایای برنج و ضایعات به انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌افزاید. همچنین نگوین و همکاران (Nguyen *et al.*, 2019) عنوان کردند که سوزاندن کاه در مزرعه منجر به انتشار گازهای گلخانه‌ای به‌میزان ۰/۷ تا ۴/۵۱ گرم $CH_4$ و ۰/۰۲ تا ۰/۰۷ گرم $N_2O$ در هر کیلوگرم کاه برنج سوزانده شده می‌شود. این اقدام می‌تواند پیامدهای منفی جدی برای سلامت انسان در اثر تشکیل ذرات معلق در هوا و تولید گازهای سمی نیز داشته باشد. کشاورزان منطقه عمدتاً از بقایای گیاهی و کودهای حیوانی برای بهبود حاصل‌خیزی خاک استفاده می‌کنند. از دیدگاه آنان، جایگزینی بخشی از کودهای شیمیایی با کودهای

آلی، ضمن کاهش وابستگی به نهاده‌های شیمیایی، می‌تواند منجر به بهبود کمی و کیفی محصول برنج شود. همچنین، وجین دستی یکی از شیوه‌های مدیریت علف‌های هرز و کاهش نیاز به مصرف علف‌کش‌ها است. در این روش، علف‌های هرز از بستر کشت خارج و در گل‌ولای شالیزار دفن می‌شوند تا با تجزیه و پوسیدگی، به مواد آلی خاک افزوده شوند. کودهای نیتروژنی نیز از عوامل مهم در رد پای کربن هستند و اگر راندمان استفاده از آن‌ها مدیریت شود، کل انتشار ۳۰ تا ۵۰ درصد کاهش می‌یابد (Vijayakumar & Padma, 2023). آزمایش دوره‌ای خاک و استفاده از منابع آلی مغذی مانند کود سبز (Green manure)، آزولا (*Azolla filiculoides*) و کود دامی می‌تواند به محدود کردن استفاده بی‌رویه از آن‌ها کمک کند (Vijayakumar & Padma, 2023). پذیرش کنترل زیستی به‌جای آفت‌کش‌ها نیز در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای مؤثر است (Arunrat *et al*., 2022).

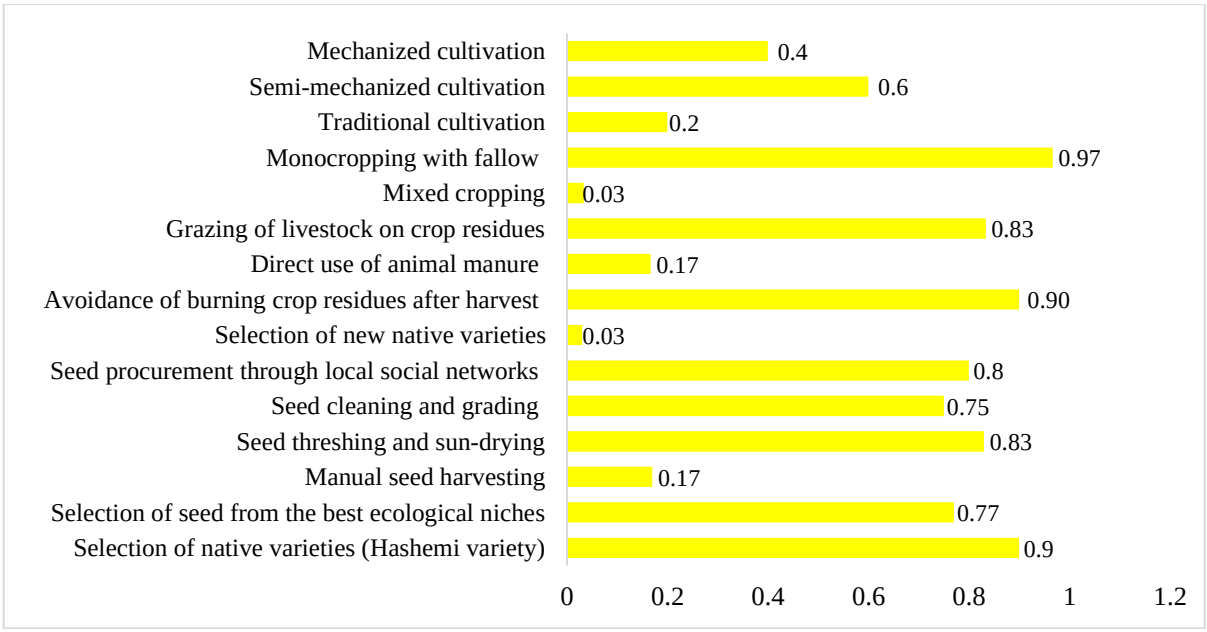
بخش بعدی مدیریت مکانیزاسیون و نیروی انسانی با اثربخشی ۴۰ درصد است. ماشین‌آلات مورد نیاز در روش سنتی تیلر و در مکانیزه، دستگاه نشاکار و دروگر هستند. در گذشته مراحل آماده‌سازی برنج به شکل دستی انجام می‌شد، ولی امروزه و به‌تدریج مراحل به‌سمت مکانیزه شدن پیش می‌رود. در خانوارهای با متراژ کم زمین (زیر ۵۰۰۰ متر مربع) غالباً روش‌های سنتی و نیمه‌مکانیزه (برداشت مکانیزه) و در خانوارهایی با زمین بیش‌تر روش‌های مکانیزه (داشت، کاشت و برداشت مکانیزه) مرسوم است. به‌طورکلی، در روش مکانیزه، حجم محصول بیش‌تر، اما خوشه برنج نازک‌تر و محصول نهایی نیز ریزتر است، در حالی‌که در روش دستی، برنج درشت‌تر و سفیدتر، نوخاله آن کم‌تر و پخت آن مطبوع‌تر است و کم‌تر نیز دچار شپشک می‌شود. با این‌حال، سرعت عمل و قیمت معقولانه در روش دروگر علت جایگزینی آن شده است. کشت نیمه‌مکانیزه با میزان ۰/۶ بیش‌ترین فراوانی ثبت نسبی را در مدیریت مکانیزاسیون به‌خود اختصاص داده است (شکل‌های ۳ و ۴). دانش تلفیقی در بخش مکانیزاسیون و نیروی انسانی به معنای پیوند تجربه‌های سنتی کشاورزان با فناوری‌های نوین است. کشاورزان با شناخت محلی از زمین‌های کوچک، اقلیم و شیوه‌های کار گروهی، ظرفیت‌های بومی را فراهم می‌کنند و دانش رسمی با ورود ماشین‌آلات مدرن، بهینه‌سازی مصرف انرژی و آموزش مهارت‌های فنی، بهره‌وری را افزایش می‌دهد. این هم‌افزایی باعث می‌شود ماشین‌آلات متناسب با شرایط محلی طراحی و استفاده شوند و نیروی انسانی به‌جای حذف شدن، توانمند و متخصص شود، هزینه‌ها و مصرف سوخت کاهش یابد و در نهایت علاوه بر حفظ اشتغال و پذیرش اجتماعی، رد پای کربن نیز کم شود.

در ارزیابی جوامع محلی، اثربخشی مدیریت بذر حدود ۱۰ درصد گزارش شده است. کشاورزان منطقه از رقم‌های بومی مقاوم به آفات، به‌ویژه رقم هاشمی، استفاده می‌کنند که با شرایط اقلیمی سازگار است و نیاز به نهاده‌های شیمیایی کم‌تری دارد. این رویکرد با فراوانی نسبی ۰/۹ بیش‌ترین سهم را در مدیریت بذر دارد. از موارد دیگر، تهیه و نگهداری بذرهای پایه است که هر ساله از مرغوب‌ترین شالیزارها انتخاب و برای سال زراعی بعد ذخیره می‌شوند. برداشت بذر معمولاً به‌صورت دستی با داس ویژه‌ای انجام می‌شود. به باور کشاورزان، این روش در مقایسه با برداشت مکانیزه با دروگر، ضمن هدررفت کم‌تر بذر، موجب حفظ بهتر کیفیت محصول می‌شود. در صورت استفاده از دروگر، بذرهای برداشت‌شده به‌منظور کاهش رطوبت، برای چند روز در معرض تابش آفتاب قرار می‌گیرند. همچنین، بوجاری و پاک‌سازی بذرها در گذشته به‌صورت سنتی و با استفاده از الک انجام می‌شد، اما امروزه این فرایند تا حد زیادی با دستگاه‌های سورتینگ صنعتی جایگزین شده است. در صورت کمبود بذر مرغوب، کشاورزان بذر مورد نیاز خود را از طریق شبکه‌های محلی یا کارخانه‌های برنج‌کوبی تأمین می‌کنند. افزون بر این، معرفی و استفاده از رقم‌های کیفی مقاوم به آفات مانند جمشیدی نیز در حال گسترش است که بررسی ظرفیت آن‌ها از نظر علمی و اجرایی اهمیت دارد (شکل‌های ۳ و ۴). از دیگر روش‌های افزایش بهره‌وری تولید، استفاده از قابلیت راتون در شالیزارها است. در این روش، پس از برداشت محصول اصلی، از جوانه‌ها و ساقه‌های باقی‌مانده برنج برای تولید محصول دوم، بدون نیاز به کاشت مجدد، استفاده می‌شود. این شیوه با کاهش نیاز به عملیات آماده‌سازی زمین، کاشت مجدد و در شرایط مناسب با مصرف آب کم‌تر، امکان بهره‌برداری مجدد از اراضی شالیزاری را فراهم می‌کند. در مجموع، کشاورزان منطقه طی نسل‌ها با شناخت شرایط اقلیمی و منابع محلی، در حفظ و انتقال بذرهای بومی و سازگاری شیوه‌های کشت با شرایط محیطی نقش داشته‌اند. تلفیق این دانش تجربی با روش‌های علمی اصلاح بذر و مدیریت زراعی می‌تواند به ارتقای بهره‌وری و پایداری تولید برنج کمک کند.




شکل ۳- نمودار عوامل مرتبط با رد پای کربن از دیدگاه دانش سنتی

Figure 3. Factors associated with the carbon footprint from the perspective of traditional knowledge




شکل ۴- فراوانی ثبت نسبی در عوامل مؤثر بر رد پای کربن از دیدگاه دانش سنتی

Figure 4. Relative frequency of citation in influential factors the carbon footprint from the perspective of traditional knowledge

تحلیل داده‌های کمی رد پای کربن و کیفی دانش سنتی نشان می‌دهد که شماری از راهبردهای بومی کشاورزان به‌طور مستقیم و یا غیرمستقیم با منابع اصلی انتشار گازهای گلخانه‌ای و رد پای کربن ارتباط دارند. متان ناشی از آبیاری و شرایط بی‌هوازی خاک با سهم ۶۴ درصدی، منبع غالب انتشار است. در این زمینه برخی روش‌های سنتی مانند آیش، چرای دام در پس‌چر مزارع، مدیریت بقایای گیاهی و پرهیز از سوزاندن آن از طریق تأثیر بر مقدار و نحوه تجزیه مواد آلی و مدیریت شرایط مزرعه، می‌توانند با فرایندهای تولید و انتشار گازهای گلخانه‌ای، به‌ویژه متان، ارتباط داشته باشند. همچنین، استفاده از کودهای آلی، دامی و بقایای گیاهی می‌تواند وابستگی به کودهای شیمیایی نیتروژنه و انتشار ناشی از تولید و مصرف آن‌ها را کاهش دهد. از سوی دیگر، الگوی نیمه‌مکانیزه کشت، مبتنی بر تلفیق دانش محلی، نیروی کار خانوادگی و ابزارهای مکانیزه، ظرفیت بهینه‌سازی عملیات مزرعه و مدیریت مصرف سوخت را دارد. انتخاب و استفاده بهینه از بذر بومی سازگار با شرایط اقلیمی و محیطی منطقه نیز می‌تواند با بهبود استقرار گیاه و یکنواختی رشد و کاهش وابستگی به بذر صنعتی، بر رد

پای کربن محصول اثرگذار باشد. با این وجود، بسیاری از کشاورزان نیازمند آگاهی جامع در مورد نقش فناوری نوین آبیاری در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای هستند. به‌عنوان مثال، روش آبیاری و خشکی تناوبی ( Alternate wetting and drying) به‌عنوان یک روش مدیریت آب برای جایگزینی آبیاری غرقابی توسط موسسه بین‌المللی تحقیقات برنج ( International Rice Research Institute) ترویج شده است (Sriphirom *et al*., 2019). این روش شامل چرخه‌های تر و خشک شدن خاک است که منجر به تغییر رطوبت خاک و شرایط اکسیداسیون و احیا می‌شود (Echegaray-Cabrera *et al*., 2024)، و با تقویت فرآیندهای هوازی در خاک در طول دوره خشک شدن، انتشار متان را با افزایش اکسیژن در خاک کاهش می‌دهد (Sriphirom *et al*., 2019). نتایج مطالعات نشان داده‌اند که این رژیم آبیاری می‌تواند انتشار گازهای گلخانه‌ای را بین ۶ تا ۴۰ درصد کاهش دهد ( Sriphirom *et al*., 2019; Echegaray-Cabrera *et al*., 2024). البته زمان‌بندی اجرای روش مهم است و توصیه می‌شود که در مرحله پنجه‌زنی برای جلوگیری از تأثیرات آن بر عملکرد دانه انجام شود (Sriphirom *et al*., 2019). در همین راستا، انریکز و همکاران (Enriquez *et al*., 2021) اظهار داشتند که پذیرش سیستم آبیاری تناوبی منجر به افزایش درآمد و بهره‌وری کلی می‌شود و این تأثیرات در سیستم‌های آبیاری پمپی نسبت به سیستم‌های کانالی محرزتر است. البته نتایج نشان دادند که آبیاری تناوبی در سیستم‌های آبیاری پمپی در مقیاس کوچک موفق بودند و کشاورزان توانستند تقریباً نیمی از هزینه‌های سوخت را صرفه‌جویی کنند، در حالی‌که این روش در سیستم‌های بزرگ مبتنی بر گرانش عمدتاً ناموفق بودند. به‌طورکلی، آب آبیاری یا رایگان است و یا بر اساس واحد مساحت (و نه مقدار آب مصرفی) قیمت‌گذاری می‌شود. همچنین، در بسیاری از مناطق برنج‌خیز آسیا، پراکندگی و خردشدگی اراضی کشاورزی، مدیریت آبیاری در سطح قطعات منفرد و تنظیم زمان آبیاری بر اساس وضعیت رطوبتی هر قطعه را دشوار می‌سازد. ازاین‌رو، فراهم‌بودن زیرساخت‌های مناسب و کارآمد آبیاری از پیش‌نیازهای مهم پذیرش و اجرای فناوری‌های نوین مدیریت آب به‌شمار می‌رود. دسترسی مطمئن به مقدار کافی آب در زمان مناسب می‌تواند اعتماد کشاورزان را به این فناوری‌ها افزایش داده و زمینه پذیرش و به‌کارگیری آن‌ها را فراهم کند.

## نتیجه‌گیری کلی

نتایج این مطالعه نشان داد که میانگین پتانسیل گرمایش جهانی کشت برنج در منطقه مورد مطالعه ۳۰۳۱± کیلوگرم دی‌اکسید کربن معادل بر هکتار در سال و میانگین رد پای کربن نیز ۱/۲۳ ± کیلوگرم دی‌اکسید کربن معادل بر کیلوگرم محصول است. انتشار متان ناشی از آبیاری و شرایط بی‌هوازی خاک با سهم غالب حدود ۶۴ درصد مهم‌ترین عامل ردپای کربن بود، درحالی‌که مصرف کودهای نیتروژن و انتشار $N_2O$ ناشی از آن‌ها در مجموع حدود ۱۰ درصد و سوخت و نیروی انسانی حدود ۸ درصد از کل انتشار را به‌خود اختصاص دادند. تحلیل حساسیت نیز نشان داد که تغییر ۱۰± درصد در مدیریت آبیاری و عملکرد محصول به‌ترتیب ۶ و ۱۰ درصد رد پای کربن برنج را تحت تأثیر قرار می دهد که نشان دهنده تأثیر عملکرد محصول و شیوه‌های مدیریتی بر رد پای کربن برنج است.

بررسی تغییرات رد پای کربن بین مزارع با ابعاد مختلف نشان داد که اگرچه اختلاف معنی‌داری بین گروه‌ها وجود نداشت، اما روند کاهشی رد پای کربن با افزایش اندازه مزرعه مشهود بود، به‌گونه‌ای که میانگین رد پای کربن در مزارع بزرگ‌تر حدود ۳۲ درصد کم‌تر از مزارع کوچک برآورد شد. این امر نشان می‌دهد که ابعاد مزرعه و مدیریت بهینه نقش قابل توجهی در کاهش انتشار دارند و این عدم معنی‌داری آماری می‌تواند ناشی از پراکندگی بالای داده‌ها، تنوع مدیریت مزرعه و محدودیت حجم نمونه باشد که همگی به‌عنوان منابع اصلی عدم قطعیت نتایج شناخته می‌شوند. افزون بر این، استفاده از ضرایب انتشار پیش‌فرض و تفاوت آن‌ها با شرایط بومی، به‌ویژه در برآورد انتشار متان و $N_2O$ از عوامل دیگر مؤثر بر دامنه عدم قطعیت برآوردها می‌باشد.

در بررسی دانش سنتی، کشاورزان منطقه بیش‌ترین اثربخشی را برای مدیریت کود آلی و بقایا (۵۰ درصد)، مکانیزاسیون و نیروی انسانی (۴۰ درصد) و مدیریت بذر (۱۰ درصد) قائل شده‌اند. یافته‌های این مطالعه نشان داد که هم‌افزایی دانش بومی کشاورزان با شواهد علمی و به‌کارگیری فناوری‌های نوین، از جمله آبیاری تناوبی، حفظ و استفاده از رقم‌های بومی مقاوم به آفات برای کاهش مصرف سموم شیمیایی، مدیریت کودهای آلی و دامی، آیش‌گذاری، پرهیز از سوزاندن بقایای گیاهی و مکانیزاسیون کم‌مصرف متناسب با اراضی خرد و مبتنی بر

دانش محلی و کار گروهی، می‌تواند به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای منجر شود.

رویکرد تلفیقی با وجود کارآمدی، با محدودیت‌هایی همراه است که از آن جمله می‌توان به تمرکز دانش سنتی بر مدیریت نهاده‌ها به‌جای فرآیندهای بیوفیزیکی انتشار، نیاز به زیرساخت و سرمایه‌گذاری اولیه برای آبیاری نوین در مناطق روستایی و محدودیت تأمین کودهای آلی در مقیاس وسیع اشاره کرد. بر این اساس، توسعه آبیاری تناوبی، بهینه‌سازی مصرف کودهای شیمیایی همراه با کودهای آلی، حمایت یارانه‌ای برای دسترسی به فناوری‌های نوین و مکانیزاسیون کم‌مصرف، مستندسازی دانش بومی در کنار دانش رسمی و گنجاندن شاخص‌هایی مانند رد پای کربن در برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری پیشنهاد می‌شود. نتایج مطالعه حاضر چارچوبی واقع‌بینانه و قابل سنجش برای مدیریت پایدار شالیزارهای با مقیاس کوچک در شمال ایران و مناطق مشابه فراهم می‌کند و توان‌مندسازی کشاورزان همراه با سیاست‌های حمایتی، ضمن حفظ تولید، به تقویت امنیت غذایی در شرایط تغییرات اقلیمی می‌انجامد.

## تضاد منافع

نویسندگان تایید می‌کنند که این تحقیق در غیاب هر گونه روابط تجاری یا مالی که می‌تواند به‌عنوان تضاد منافع بالقوه تعبیر شود، انجام شده است.

## رعایت اخلاق در نشر

نویسندگان اعلام می‌کنند که در نگارش این مقاله به‌طور کامل از اخلاق نشر از جمله سرقت ادبی، سوء رفتار، جعل داده‌ها و انتشار دوگانه، پیروی کرده‌اند. همچنین، این مقاله حاصل یک کار تحقیقاتی اصیل بوده و تا کنون به‌طور کامل به هیچ زبانی و در هیچ نشریه یا همایشی چاپ و منتشر نشده است و هیچ اقدامی نیز برای انتشار آن در هیچ نشریه یا همایشی صورت نگرفته و نخواهد گرفت.

## اجازه انتشار مقاله

نویسندگان با چاپ این مقاله به‌صورت دسترسی باز موافقت کرده و کلیه حقوق استفاده از محتوا، جدول‌ها، شکل‌ها، تصویرها و غیره را به ناشر واگذار می‌کنند.

## References


Arunrat, N., Sereenonchai, S., Chaowiwat, W., Wang, C., & 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. doi: 10.3390/agronomy12020380.

Bisht, A.S., Verma, R., Tewari, R., Bhatt, S., Hemdan, A., Gedela, S., Sharma, R., & Kumar, B. (2025). Indigenous traditional knowledge for rice cultivation in Uttarakhand. *Journal of Mountain Research*, *21*(1), 21-30. doi: 10.51220/jmr.v20-i1.3.

Champrasert, P., Sampattagul, S., Yodkhum, S., & Wangpakapattanawong, P. (2020). Assessment of carbon footprint of upland rice production in Northern Thailand. *Chiang Mai University Journal of Natural Sciences*, *19*(3), 427-446. doi: 10.12982/CMUJNS.2020.0028.

Chanza, N., Musakwa, W., & Kelso, C. (2024). Overlaps of indigenous knowledge and climate change mitigation: Evidence from a systematic review. *Frontiers in Climate*, *6*, 1344931. doi: 10.3389/fclim.2024.1344931.

Dastan, S., Soltani, A., Noormohamadi, G., Madani, H., & Yadi, R. (2016). Estimation of carbon footprint and global warming potential in rice production systems. *Environmental Sciences*, *14*(1), 19-28. [In Persian].

Dhivya, C., Monika, A., Jayashree, V., & Kamali, S.P.(2024). The role of indigenous knowledge in sustainable farming practices, *Greenaria*, *2*(10), 194-196.

Dugyon, EMC. (2024). Indigenous knowledge in traditional production of rice: Impact on food security in the upland households in Ifugao, Philippines. *Plant Science Today*, *10*(2), 27-33. doi: 10.14719/pst.1864.

Echegaray-Cabrera, I., Cruz-Villacorta, L., Ramos-Fernández, L., Bonilla-Cordova, M., Heros-Aguilar, E., & 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. doi: 10.3390/agronomy14020248.

Enriquez, Y., Yadav, S., Evangelista, G.K., Villanueva, D., Burac, M.A., & 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. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, *5*, 675818. doi: 10.3389/fsufs.2021.675818.

Hosseini, S., Sharifan, T., Kiani, H., Abyar, N., & Feyzbakhsh, M.T. (2022). Energy flow and global warming potential in direct seeded and transplantation of rice under different irrigation systems. *Journal of Water Research in Agriculture*, *35*(4), 337-356. [In Persian]. doi: 10.22092/jwra.2021.355385.885.

Ji, Y., Zhou, Y., Li, Z., Feng, K., Sun, X., Xu, Y., Wu, W., & Zou, H. (2024). Carbon footprint research and mitigation strategies for rice-cropping systems in China: A review. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, *8*, 1375092. doi: 10.3389/fsufs.2024.1375092.

Kashyap, D., & Agarwal, T. (2021). Carbon footprint and water footprint of rice and wheat production in Punjab, India. *Agricultural Systems*, *186*, 102959. doi: 10.1016/j.agsy.2020.102959.

Khumalo, T.A., Chakale, M.V., Asong, J.A., Aremu, A.O., & Amoo, S.O. (2025). Indigenous farming methods and crop management practices used by local farmers in Madibeng local municipality, South Africa. *Scientific Reports*, *15*, 8918. doi: 10.1038/s41598-025-91210-w.

Limpo, S.Y., Fahmid, I.M., Fattah, A., Rauf, A.W., Surmaini, E., Muslimin, Saptana, Syahbuddin, H., & Andri, K.B. (2022). Integrating indigenous and scientific knowledge for decision making of rice farming in South Sulawesi, Indonesia. *Sustainability*, *14*, 2952. doi: 10.3390/su14052952.

Nabipour Afrouzi, H., Ahmed, J., Mobin Siddique, B., Khairuddin, N., & Hassan, A. (2023). A comprehensive review on carbon footprint of regular diet and ways to improving lowered emissions, *Results in Engineering*, *18*, 101054. doi: 10.1016/j.rineng.2023.101054.

Nguyen, V.H., Sander, B.O., Quilty, J.R., Balingbing, C., Castalone, A.G., Romasanta, R., Alberto, M.C.R., Sandro, J.M., Jamieson, C., & Gummert, M. (2019). An assessment of irrigated rice production energy efficiency and environmental footprint with in-field and off-field rice straw management practices. *Scientific Reports*, *9*, 16887. doi: 10.1038/s41598-019-53072-x.

Sedana, G., Wirawan, K., & Miyazawa, N. (2025). Implementation of organic rice farming based on local wisdom in Bali province, Indonesia. *The Philippine Agricultural Scientist*, *108*(1), 72-78. doi: 10.62550/EN18053023.

Sriphirom, P., Chidthaisong, A., & 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. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.03.212.

Rosada, I., Amran, F.D., Nurhapsa, & Sirajuddin, S.N. (2024). Enhancing indigenous knowledge to enhance food security in rice field agroecosystems of Pinrang regency, South Sulawesi province, Indonesia. *Advancements in Life Sciences*, *11*(1), 84-91. doi: 10.62940/als.v11i1.2213.

Yang, M., Shao, L., Chu, J., Li, Z., Tian, C., Sun, F., & Yu, F. (2024). Comparative analyses of carbon footprints and economic benefits: Rice-shrimp co-cropping, rice-crab co-cropping and rice monoculture models. *Polish Journal of Environmental Studies*, *33*(2), 1413-1419. doi: 10.15244/pjoes/173094.

Vijayakumar, S., & Padma, S. (2023). Unlocking the Energy-Water-Carbon Nexus in Rice Cultivation: A Comprehensive Review. *Journal of Rice Research*, *16*(2), 1-21. doi: 10.58297/PSJA9488.

Statistical Centre of Iran. (2016). 2016 Population and Housing Census. Available at https://amar.org.ir/statistical-information/statid/52277.

Meteorological Organization of Iran. (2025). General Directorate of Meteorology of Gilan Province. Available at https://www.gilmet.ir/fa/.