Iranian Journal of Biosystem Engineering
Homepage: http://ijbse.ut.ac.ir
ISNN: 2423-7841

Assessment of the Carbon and Nitrogen Footprints for Wheat, Tomato, Onion, and Watermelon Cultivation in the Sistan and Baluchestan Region

Majid Dekamin[1] | Hossein Rezaei [2] | Amin Toranjian [3]✉

1. Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, Malayer University, Malayer, Iran.
Dekamin@malayeru.ac.ir
2. Department of Water and Soil Science, Faculty of Agriculture, Malayer University, Malayer, Iran.
h.rezaei@malayeru.ac.ir
3. Corresponding Author, Department of Water and Soil Science, Faculty of Agriculture, Malayer University, Malayer, Iran. a.toranjian@malayeru.ac.ir

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: Feb. 13, 2026

Revised: May. 26, 2026

Accepted: June. 3, 2026

Published online: Summer 2026

Keywords:
Carbon footprint;
Nitrogen footprint;
Environmental sustainability;
Cropping systems;
Resource-use efficiency;
Arid and semi-arid agriculture;
Sustainable agriculture.

ABSTRACT

Agriculture in arid and semi-arid regions faces the dual challenge of ensuring food production while simultaneously reducing environmental pressures associated with intensive resource use. In this context, carbon footprint (CF) and nitrogen footprint (NF) indicators provide effective tools for evaluating the environmental sustainability of cropping systems. This study aimed to conduct a comprehensive assessment of the carbon and nitrogen footprints of four major crops, including wheat (Triticum aestivum L.), tomato (Solanum lycopersicum L.), onion (Allium cepa L.), and watermelon (Citrullus lanatus Thunb.), cultivated in Sistan and Baluchestan Province, Iran. The assessment was based on real input–output data obtained from official agricultural statistics and regional management practices. The nitrogen footprint was quantified by considering direct nitrogen losses, including ammonia volatilization, nitrous oxide emissions, nitrate leaching, and ammonium leaching, as well as indirect nitrogen emissions associated with the production and transportation of agricultural inputs. Carbon footprint was estimated by aggregating greenhouse gas emissions derived from fertilizers, diesel fuel, electricity, irrigation water, machinery, and agrochemicals. Results showed that, at the hectare scale, tomato production had the highest carbon footprint with 4584.08 kg CO_2-eq ha^{-1}, whereas watermelon showed the lowest value with 3027.35 kg CO_2-eq ha^{-1}. The highest indirect nitrogen footprint was also observed in watermelon (1665.84 g N-eq ha^{-1}) and tomato (1565.57 g N-eq ha^{-1}). However, at the yield-based scale, wheat exhibited the highest carbon footprint intensity, reaching approximately 1663 kg CO_2-eq t^{-1} due to its low productivity (1.88 t ha^{-1}). Wheat also showed the highest yield-based nitrogen footprint, whereas onion and watermelon demonstrated the lowest environmental burdens per unit of product. Economic indicators further revealed that wheat imposed the highest environmental cost per unit of economic return, while onion and watermelon exhibited superior environmental–economic efficiency. Overall, the findings indicate that sustainability assessments based solely on hectare-scale indicators can be misleading in arid environments. Integrating area-based, yield-based, and economic-based indicators provides a more reliable framework for crop selection, resource allocation, and sustainable agricultural planning in water-scarce regions.

Cite this article: Dekamin, M., Rezaei, H., Nabavi-Pelesaraei, A. (2026). Assessment of the Carbon and Nitrogen Footprints for Wheat, Tomato, Onion, and Watermelon Cultivation in the Sistan and Baluchestan Region, *Iranian Journal of Biosystem Engineering*, 57 (2), 1-22. https://doi.org/10.22059/ijbse.2026.411038.665638

© The Author(s).
Publisher: The University of Tehran Press.
DOI: https://doi.org/10.22059/ijbse.2026.411038.665638

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Agricultural production in arid and semi-arid regions is increasingly constrained by limited water availability, high climatic variability, and growing environmental pressures associated with intensive input use. In such regions, improving productivity alone is no longer sufficient to ensure sustainability; instead, production systems must also minimize environmental externalities while maintaining economic viability. Among the various environmental pressures linked to agriculture, nitrogen pollution and greenhouse gas emissions are of particular concern due to their direct impacts on air and water quality, climate change, and ecosystem health.

Nitrogen fertilizers play a central role in modern crop production, yet their inefficient use results in substantial losses to the environment in the form of ammonia volatilization, nitrate leaching, nitrous oxide emissions, and other reactive nitrogen pathways. These losses not only reduce nitrogen use efficiency but also impose significant environmental and societal costs. At the same time, agricultural activities contribute notably to carbon emissions through fertilizer production, energy consumption, irrigation, machinery operation, and the use of agrochemicals. In water-scarce regions, the energy required for groundwater extraction and irrigation further amplifies the carbon footprint of crop production.

Footprint-based indicators, such as the nitrogen footprint (NF) and carbon footprint (CF), have emerged as powerful tools for quantifying these pressures in a unified and comparable manner. However, many existing studies focus on a single spatial or functional scale, most commonly emissions per unit land area. While area-based indicators are useful for regional emission inventories, they may provide a misleading picture of environmental efficiency when used alone, particularly in regions where crop yields and economic returns differ widely among crops.

This study addresses this limitation by applying a multi-scale footprint assessment framework to four major crops—wheat (*Triticum aestivum* L.), tomato (*Solanum lycopersicum* L.), onion (*Allium cepa* L.), and watermelon (*Citrullus lanatus* Thunb.)—cultivated in Sistan and Baluchestan Province, southeastern Iran. By simultaneously evaluating nitrogen and carbon footprints at the land-area, yield-based, and economic scales, the study aims to provide a more comprehensive understanding of the environmental efficiency of cropping systems in arid environments and to support informed decision-making regarding crop selection and resource management.

Materials and Methods

The assessment was conducted using a cradle-to-farm-gate perspective, focusing on agricultural input use and field-level emissions associated with crop production. Input–output data were obtained from official agricultural statistics, field surveys, and region-specific management practices representative of Sistan and Baluchestan Province. The selected crops represent both staple (wheat) and high-value horticultural products (tomato, onion, and watermelon), which together account for a substantial share of cultivated land and water use in the region.

Nitrogen Footprint Assessment

The nitrogen footprint was quantified by accounting for both direct and indirect nitrogen losses. Direct losses included ammonia volatilization (NH_3), nitrate leaching (NO_3^-), nitrous oxide emissions (N_2O), and ammonium leaching (NH_4^+) resulting from nitrogen fertilizer application. These pathways were estimated using established emission factors and stoichiometric conversion coefficients reported in the literature. Indirect nitrogen emissions were calculated by considering nitrogen losses embedded in the production and transportation of agricultural inputs such as mineral fertilizers, organic manure, diesel fuel, electricity, and pesticides.

Total nitrogen footprint was first calculated on a per-hectare basis and subsequently normalized by crop yield to obtain nitrogen footprint per ton of product. To integrate the economic dimension, an economic nitrogen footprint indicator was derived by relating total nitrogen losses to the gross economic value of crop production, based on local market prices for each crop.

Carbon Footprint Assessment

The carbon footprint was calculated by aggregating greenhouse gas emissions associated with the production and use of agricultural inputs and field operations. Emission sources included mineral fertilizers, organic manure, diesel fuel, electricity for irrigation, irrigation water delivery, machinery use, seeds, and agrochemicals. Emission factors were applied to each input to estimate emissions in terms of CO_2-equivalent.

Similar to the nitrogen footprint, carbon footprint results were first expressed per unit land area (kg CO_2-

eq ha^{-1}) and then normalized by yield (kg CO_2-eq t^{-1}) and economic value (kg CO_2-eq USD^{-1}). This multi-scale approach enabled a consistent comparison of environmental performance across crops with different productivity levels and market values.

Results and Discussion

Land-Area-Based Footprints

At the land-area scale, the results indicated that tomato and onion production exhibited the highest nitrogen and carbon footprints due to intensive input use and high irrigation demand. Wheat, in contrast, showed relatively lower footprints per hectare, reflecting its lower input intensity. However, area-based indicators alone masked important differences in productivity and economic efficiency among crops.

In the case of nitrogen footprint, indirect emissions associated with input production constituted the dominant share across all crops, highlighting the importance of upstream supply chains in shaping environmental outcomes. For carbon footprint, irrigation water and nitrogen fertilizer emerged as the primary emission sources, emphasizing the strong linkage between water management, energy use, and climate impacts in arid regions.

Yield-Based Footprints

When normalized by yield, a markedly different pattern emerged. Wheat exhibited the highest nitrogen and carbon footprints per ton of product, despite its lower per-hectare emissions. This outcome was primarily driven by its low yield under the prevailing climatic and management conditions. In contrast, onion, tomato, and watermelon benefited from substantially higher yields, resulting in significantly lower footprint intensities per unit of output.

These findings demonstrate that yield plays a critical role in determining environmental efficiency. Crops with high productivity can effectively dilute the environmental burdens associated with input use, whereas low-yield systems concentrate emissions into a smaller amount of output, leading to higher footprint intensities.

Economic-Based Footprints

The integration of economic value further amplified the contrasts among crops. Wheat displayed the highest nitrogen and carbon footprints per unit of economic return, indicating poor environmental–economic efficiency. Even with a relatively higher market price, the low yield of wheat resulted in limited economic output per hectare, thereby increasing the environmental cost per dollar earned.

Conversely, onion and watermelon showed the lowest footprint intensities per unit of economic value, reflecting a favorable combination of high productivity and reasonable market prices. Tomato occupied an intermediate position, with higher area-based footprints offset by strong yield performance.

Implications for Sustainability Assessment

Taken together, the results clearly demonstrate that sustainability assessments based solely on land-area indicators can be misleading, particularly in arid regions where yield variability is high. A multi-scale framework that incorporates land-area, yield-based, and economic-based indicators provides a more nuanced and policy-relevant understanding of environmental performance. Such an approach highlights trade-offs between food security, environmental protection, and economic viability that are not apparent when using a single metric.

Conclusion and Implications

This study underscores the importance of adopting a multi-dimensional perspective when evaluating the environmental sustainability of crop production systems in arid and semi-arid regions. The combined assessment of nitrogen and carbon footprints across land-area, yield, and economic scales revealed that crop rankings can change substantially depending on the chosen metric. Wheat, while often considered environmentally benign at the hectare scale, emerged as the least efficient crop when evaluated per unit of output and economic return. In contrast, high-yield horticultural crops demonstrated superior environmental efficiency despite higher input use.

From a management perspective, these findings suggest that efforts to reduce environmental pressures should prioritize improvements in productivity and resource-use efficiency rather than focusing exclusively on reducing input quantities. Enhancing nitrogen use efficiency, optimizing irrigation practices, and adopting energy-efficient water delivery systems can simultaneously reduce nitrogen and carbon footprints without compromising production.

At the policy level, the results highlight the need to move beyond area-based indicators in agricultural planning and subsidy schemes. Incorporating yield- and value-based footprint metrics into decision-making

processes can support more sustainable cropping patterns and better alignment between environmental objectives and economic incentives. Future research should extend this framework by incorporating climate change scenarios, price volatility, and alternative management strategies to further refine sustainability assessments and guide long-term agricultural development in water-scarce regions.

Funding

This research was financially and institutionally supported by the Faculty of Agriculture, Malayer University, through the 2025 research grant awarded to the corresponding author. The authors gratefully acknowledge Malayer University for its financial and administrative support of this study.

Authorship contribution

For research articles with several authors, a short paragraph specifying their individual contributions must be provided. The following statements should be used “Conceptualization, Majid Dekamin; methodology, Majid Dekamin; software, Hossein Rezaei; validation, Hossein Rezaei, Amin Toranjian; formal analysis, Hossein Rezaei; data curation, Hossein Rezaei; writing—original draft preparation, Hossein Rezaei, Amin Toranjian; writing—review and editing, Majid Dekamin. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.”

Declaration of Generative AI and AI-assisted technologies in the writing process

During the preparation of this work the authors used ChatGPT in order to Grammer and English editing. After using this tool/service, the authors reviewed and edited the content as needed and takes full responsibility for the content of the publication.

Data availability statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

The authors gratefully acknowledge the Ministry of Agriculture Jihad of the Islamic Republic of Iran for providing access to the agricultural statistics and datasets used in this study. The availability of these official data resources was essential for conducting the analyses and achieving the objectives of this research. The authors sincerely appreciate the Ministry's efforts in collecting, maintaining, and disseminating comprehensive agricultural information that supports scientific research and evidence-based decision-making.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, and plagiarism, and any form of misconduct.

This study did not involve human participants, animals, clinical data, or any procedures requiring ethical approval. Therefore, according to institutional and international research ethics guidelines, ethical committee approval and an ethics code were not required for this research.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

مجله مهندسی بیوسیستم ایران، دوره ۵۷، شماره ۲ شاپا: ۷۸۴۱-۲۴۲۳
Homepage: http://ijbse.ut.ac.ir

ارزیابی ردپای کربن و ردپای نیتروژن تولید گندم، گوجه فرنگی، پیاز و هندوانه در سیستان و بلوچستان

مجید دکامین[۱] | حسین رضایی[۲] | امین ترنجیان[۳] ✉

۱. گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران. رایانامه: Dekamin@malayeru.ac.ir

۲. گروه علوم آب و خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران. رایانامه: h.rezaei@malayeru.ac.ir

۳. نویسنده مسئول، گروه علوم آب و خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران. رایانامه: a.toranjian@malayeru.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقالهٔ پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۲۴
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۳/۵
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۳/۱۳
تاریخ انتشار: تابستان ۱۴۰۵

واژه‌های کلیدی:
ردپای کربن،
ردپای نیتروژن،
پایداری زیست‌محیطی،
سامانه‌های کشت،
بهره‌وری مصرف منابع،
کشاورزی مناطق خشک و نیمه‌خشک،
کشاورزی پایدار.

چکیده

کشاورزی در مناطق خشک و نیمه‌خشک با چالش هم‌زمان تأمین امنیت غذایی و کاهش فشارهای زیست‌محیطی ناشی از مصرف فشرده نهاده‌ها روبه‌رو است. در این چارچوب، شاخص‌های ردپای کربن (CF)و ردپای نیتروژن(NF) ابزارهایی کارآمد برای ارزیابی پایداری سامانه‌های تولید محصولات زراعی محسوب می‌شوند. این پژوهش با هدف ارزیابی جامع ردپای کربن و ردپای نیتروژن چهار محصول عمده شامل گندم (Triticum aestivum L.)، گوجه‌فرنگی (Solanum lycopersicum L.)، پیاز (Allium cepa L.) و هندوانه (Citrullus lanatus Thunb.)در استان سیستان و بلوچستان انجام شد. داده‌های مورد استفاده از آمارنامه‌های رسمی وزارت جهاد کشاورزی و اطلاعات واقعی مصرف نهاده‌ها و عملکرد محصولات استخراج گردید. ردپای نیتروژن با در نظر گرفتن انتشارهای مستقیم شامل تصعید آمونیاک، انتشار اکسید نیتروژن، آبشویی نیترات و آمونیوم، و همچنین انتشارهای غیرمستقیم ناشی از تولید و حمل نهاده‌های کشاورزی محاسبه شد. ردپای کربن نیز بر پایه مجموع انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از مصرف کودها، سوخت، برق، آب آبیاری، ماشین‌آلات و نهاده‌های شیمیایی برآورد گردید. نتایج نشان داد که در مقیاس هکتاری، گوجه‌فرنگی با ۴۵۸۴/۰۸ کیلوگرم معادل دی‌اکسیدکربن در هکتار بیشترین ردپای کربن را داشت، در حالی که هندوانه با ۳۰۲۷/۳۵ کیلوگرم معادل دی‌اکسیدکربن در هکتار کمترین مقدار را نشان داد. همچنین بیشترین ردپای نیتروژن غیرمستقیم مربوط به هندوانه (۱۶۶۵/۸۴ گرم معادل نیتروژن) و گوجه‌فرنگی (۱۵۶۵/۵۷ گرم معادل نیتروژن) بود. با این حال، در مقیاس محصول‌محور، گندم به دلیل عملکرد پایین (۱/۸۸ تن در هکتار) بالاترین شدت ردپای کربن را با حدود ۱۶۶۳ کیلوگرم معادل دی‌اکسیدکربن به ازای هر تن محصول و همچنین بیشترین ردپای نیتروژن محصول‌محور را نشان داد، در حالی که پیاز و هندوانه کمترین شدت انتشار را به ازای هر تن محصول داشتند. شاخص‌های اقتصادی نیز نشان دادند که گندم بیشترین هزینه زیست‌محیطی را به ازای هر واحد ارزش اقتصادی تولید ایجاد می‌کند، در حالی که پیاز و هندوانه از کارایی زیست‌محیطی–اقتصادی مطلوب‌تری برخوردار بودند. در مجموع، نتایج این پژوهش نشان داد که ارزیابی پایداری صرفاً بر پایه شاخص‌های هکتاری می‌تواند گمراه‌کننده باشد و ترکیب شاخص‌های سطح‌محور، محصول‌محور و اقتصادی، مبنای دقیق‌تری برای اصلاح الگوی کشت، بهبود بهره‌وری منابع و کاهش فشارهای زیست‌محیطی در مناطق خشک و نیمه‌خشک فراهم می‌کند.

استناد: دکامین، مجید ؛ رضایی، حسین ؛ و ترنجیان، امین (۱۴۰۴). ارزیابی ردپای کربن و ردپای نیتروژن تولید گندم، گوجه فرنگی، پیاز و هندوانه در سیستان و بلوچستان، *مجله مهندسی بیوسیستم ایران ایران*، ۵۷ (۲)، ۲۲-۱. https://doi.org/10.22059/ijbse.2026.411038.665638

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

DOI: https://doi.org/10.22059/ijbse.2026.411038.665638

مقدمه

بخش کشاورزی در دهه‌های اخیر، هم‌زمان با ایفای نقش حیاتی در تأمین امنیت غذایی، به یکی از مهم‌ترین منابع فشارهای محیط‌زیستی در مقیاس محلی و جهانی تبدیل شده است. افزایش جمعیت، تغییر الگوهای مصرف و ضرورت افزایش تولید، منجر به تشدید مصرف نهاده‌هایی نظیر کودهای شیمیایی، سوخت‌های فسیلی و منابع آب شده است؛ روندی که پیامدهای آن به‌صورت انتشار گسترده گازهای گلخانه‌ای و اتلاف نیتروژن واکنشی در محیط‌زیست بروز یافته است (Gu et al., 2023; Dekamin and Kheiralipour, 2023). این چالش‌ها در مناطق خشک و نیمه‌خشک، که ظرفیت بازیابی اکوسیستم‌ها محدود و حساسیت محیطی بالاست، شدت بیشتری پیدا می‌کند.

در این میان، ردپای کربن به‌عنوان شاخصی کلیدی برای کمی‌سازی انتشار گازهای گلخانه‌ای، سهم سیستم‌های کشاورزی را در تغییر اقلیم نشان می‌دهد. این شاخص انتشارهای ناشی از تولید نهاده‌ها، عملیات مزرعه‌ای، مصرف انرژی و انتشارهای غیرمستقیم خاکی، به‌ویژه اکسید نیتروژن، را در قالب معادل دی‌اکسیدکربن تجمیع می‌کند. هم‌زمان، ردپای نیتروژن با تمرکز بر نیتروژن واکنشی آزادشده به محیط، مسیرهایی نظیر تبخیر آمونیاک، آبشویی نیترات و انتشار N_2O را در بر می‌گیرد و ابزاری کارآمد برای ارزیابی آلودگی هوا، منابع آب و خاک محسوب می‌شود (Xu et al., 2020; Dekamin et al., 2025a).

اگرچه کاربرد این دو شاخص در سال‌های اخیر گسترش یافته است، اغلب مطالعات موجود بر یک محصول خاص یا مقایسه روش‌های مدیریتی در چارچوب یک سیستم تولیدی متمرکز بوده‌اند؛ برای مثال، بررسی اثر سطوح مختلف مصرف کود یا شیوه‌های آبیاری بر ردپای محیط‌زیستی یک محصول مشخص در مقابل، مقایسه چند محصول متفاوت در یک منطقه واحد، با شرایط اقلیمی، نهادی و اقتصادی مشترک، کمتر مورد توجه قرار گرفته است؛ در حالی که تصمیم‌گیری‌های مرتبط با الگوی کشت در مقیاس منطقه‌ای، اثر تجمعی بسیار بیشتری بر فشارهای محیط‌زیستی دارند (Bai et al., 2023).

این خلأ پژوهشی در کشورهایی مانند ایران، که کشاورزی آن عمدتاً در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک انجام می‌شود، اهمیت مضاعفی دارد. در چنین شرایطی، انتخاب نوع محصول به‌اندازه انتخاب روش مدیریت، بر مصرف منابع و میزان انتشار آلاینده‌ها اثرگذار است. استان سیستان و بلوچستان نمونه بارزی از این وضعیت است؛ منطقه‌ای که با محدودیت شدید منابع آب، تبخیر بالا، دمای زیاد و وابستگی گسترده به آب‌های زیرزمینی مواجه بوده، اما در عین حال نقش مهمی در تولید محصولات زراعی و باغی کشور ایفا می‌کند.

در استان سیستان و بلوچستان، چهار محصول گندم (*Triticum aestivum L.*)، گوجه‌فرنگی (*Solanum lycopersicum L.*)، پیاز (*Allium cepa L.*) و هندوانه (*Citrullus lanatus Thunb.*) از مهم‌ترین محصولات کشت‌شده به شمار می‌روند. گندم به‌عنوان یک غله استراتژیک، پایه اصلی امنیت غذایی بوده و معمولاً با سطح زیرکشت وسیع و عملکرد متوسط، اما با اهمیت اقتصادی و اجتماعی بالا تولید می‌شود (Ziaei et al., 2015). این محصول اگرچه در مقایسه با محصولات باغی شدت نهاده‌ای کمتری دارد، اما به دلیل گستردگی سطح زیرکشت، می‌تواند سهم قابل‌توجهی در انتشار تجمعی کربن و نیتروژن داشته باشد. گوجه‌فرنگی، به‌عنوان یک محصول باغی با ارزش اقتصادی بالا، معمولاً به مصرف قابل‌توجه کودهای شیمیایی، انرژی و آب وابسته است (Mohammadi et al., 2023; Amani et al., 2025). عملکرد بالای این محصول در واحد سطح، آن را به گزینه‌ای جذاب از منظر اقتصادی تبدیل کرده است، اما همین ویژگی می‌تواند به افزایش ردپای کربن و نیتروژن در صورت مدیریت نامناسب منجر شود. پیاز نیز از محصولات باغی پرمصرف نهاده محسوب می‌شود که به دلیل چرخه رشد خاص و نیاز تغذیه‌ای بالا، مستعد اتلاف نیتروژن و انتشار آلاینده‌های مرتبط است (Elhami., 2021). در مقابل، هندوانه به‌عنوان محصولی با نیاز آبی بالا و عملکرد وزنی زیاد، همواره در مرکز بحث‌های مربوط به پایداری کشاورزی در مناطق خشک قرار داشته است. اگرچه این محصول از نظر تولید زیست‌توده بسیار کارآمد به نظر می‌رسد، اما مصرف بالای آب و نهاده‌ها می‌تواند ردپای محیط‌زیستی آن را به‌ویژه در مقیاس سطح زیرکشت افزایش دهد (Dekamin et al., 2025b). از این رو، مقایسه عملکرد محیط‌زیستی هندوانه با سایر محصولات رایج منطقه، نیازمند استفاده از شاخص‌های کمی و قابل مقایسه است.

در چنین بستری، ارزیابی هم‌زمان ردپای کربن و ردپای نیتروژن در دو مقیاس سطح زیرکشت و واحد محصول، امکان مقایسه منصفانه بین محصولاتی با ماهیت کاملاً متفاوت را فراهم می‌سازد. شاخص‌های سطح‌محور، فشار واردشده بر اکوسیستم‌های محلی را نشان می‌دهند، در حالی که شاخص‌های مبتنی بر محصول، کارایی محیط‌زیستی تولید را منعکس می‌کنند. ترکیب این دو رویکرد می‌تواند تصویر دقیق‌تری از مزایا و محدودیت‌های هر محصول ارائه دهد. مطالعات پیشین در زمینه ردپای کربن و ردپای نیتروژن سامانه‌های کشاورزی عمدتاً بر یک محصول خاص، یک شاخص محیط‌زیستی یا مناطق مرطوب و معتدل متمرکز بوده‌اند. در مقابل، پژوهش حاضر با

ارزیابی همزمان ردپای کربن و ردپای نیتروژن چهار محصول مهم زراعی در شرایط خشک و نیمه‌خشک استان سیستان و بلوچستان، تلاش می‌کند تصویری جامع‌تر از پایداری زیست‌محیطی سامانه‌های زراعی ارائه دهد. همچنین استفاده همزمان از شاخص‌های سطح‌محور، عملکردمحور و اقتصادی، امکان تحلیل چندبعدی کارایی زیست‌محیطی را فراهم می‌سازد که در مطالعات پیشین کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

بر این اساس، هدف این پژوهش مقایسه ردپای کربن و ردپای نیتروژن چهار محصول گندم، گوجه‌فرنگی، پیاز و هندوانه در استان سیستان و بلوچستان بر پایه داده‌های واقعی مصرف نهاده و عملکرد است. تمرکز این مطالعه بر تفاوت‌های ذاتی بین محصولات قرار دارد، نه بر مقایسه سیستم‌های مدیریتی، تا بتواند شواهد علمی لازم برای بازنگری در الگوی کشت و تخصیص پایدار منابع در مناطق خشک و نیمه‌خشک را فراهم آورد. نتایج این پژوهش می‌تواند به‌عنوان مبنایی کاربردی برای سیاست‌گذاری کشاورزی، کاهش فشارهای محیط‌زیستی و حرکت به‌سوی تولید پایدار در سطح منطقه‌ای مورد استفاده قرار گیرد.

پیشینهٔ پژوهش

در دهه‌های اخیر، شاخص‌های ردپا به‌عنوان ابزارهایی کلیدی برای وارد کردن ملاحظات پایداری در فرآیند انتخاب و توسعه محصولات و فرآیندهای جایگزین مورد توجه گسترده قرار گرفته‌اند. مفهوم ردپا نخستین‌بار در اوایل دهه ۱۹۹۰ و با معرفی اصطلاح «ردپای اکولوژیک» در سال ۱۹۹۲مطرح شد و به‌تدریج زمینه‌ساز توسعه شاخص‌های کمی متعددی برای ارزیابی فشار فعالیت‌های انسانی بر محیط‌زیست گردید (Rees, 2018). در این میان، ردپای کربن (Carbon Footprint; CF) به‌عنوان یکی از پرکاربردترین شاخص‌ها، به‌طور گسترده برای مقایسه اثرات محصولات و سیستم‌های مختلف بر تغییرات اقلیمی و همچنین شناسایی و ارزیابی راهکارهای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای مورد استفاده قرار گرفته است (Yan et al., 2015; Dekamin et al., 2026) .

در کنار ردپای کربن، ردپای نیتروژن به‌عنوان شاخصی مکمل توسعه یافت که کل مقدار نیتروژن فعال (Nr) از دست‌رفته به محیط‌زیست در نتیجه فعالیت‌های انسانی را بیان می‌کند (Leach et al., 2012). از زمان معرفی این شاخص‌ها، CFو NF به خانواده ابزارهای تصمیم‌گیری پایدار پیوسته و به‌طور فزاینده‌ای در ارزیابی‌های زیست‌محیطی توسط دولت‌ها، شرکت‌ها و سازمان‌های غیردولتی به کار گرفته شده‌اند (Wiedmann and Minx, 2008). با این حال، علی‌رغم گذشت حدود سه دهه از توسعه این شاخص‌ها، روند تخریب بی‌سابقه محیط‌زیست و اکوسیستم‌ها همچنان ادامه داشته و نشان‌دهنده ناکافی بودن اقدامات کنونی در چارچوب مدیریت پایدار منابع است (Xue et al., 2016;).

مطالعات نشان می‌دهند که اختلالات شدید در چرخه‌های بیوژئوشیمیایی کربن (C) و نیتروژن (N) از حدود ایمن عملکرد سیستم زمین فراتر رفته و پایداری بلندمدت اکوسیستم‌ها را با چالش جدی مواجه کرده است. در پاسخ به این نگرانی‌ها، پژوهش‌های اخیر به سمت برآورد هم‌زمان ردپای کربن و ردپای نیتروژن در سیستم‌های تولید محصولات زراعی حرکت کرده‌اند تا بتوانند تعاملات، بده‌بستان‌ها و هم‌افزایی‌های بالقوه میان این دو شاخص را به‌طور جامع‌تری شناسایی کنند (Xue et al., 2016) . چنین ارزیابی‌های یکپارچه‌ای، به‌ویژه در شرایطی که هدف هم‌زمان کاهش اثرات زیست‌محیطی و افزایش بهره‌وری تولید است، نسبت به رویکردهای تک‌بعدی ارجحیت دارند.

در این چارچوب، نقش مدیریت نهاده ها خصوصاً کود نیتروژنه اهمیت ویژه‌ای پیدا می‌کند، زیرا فرآیندهایی نظیر فرّاریت آمونیاک (NH_3)، انتشار اکسید نیتروژن (N_2O) و آبشویی نیتروژن می‌توانند به‌صورت خطی یا نمایی تحت تأثیر میزان مصرف کود نیتروژنه افزایش یابند. از سوی دیگر، تولید کودهای نیتروژنه خود یکی از منابع اصلی انتشار گازهای گلخانه‌ای و عامل مهمی در افزایش ردپای کربن سیستم‌های کشاورزی به شمار می‌رود (Chen et al., 2021) .

ردپای نیتروژن و ردپای کربن به‌طور خاص برای کمّی‌سازی تلفات Nr و انتشار گازهای گلخانه‌ای در فرآیند تولید واحد وزنی محصولات سبزی و صیفی معرفی شده‌اند و به‌عنوان شاخص‌هایی حساس برای ارزیابی عملکرد زیست‌محیطی این سیستم‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند (Fan et al., 2018; Liang et al., 2023) .این شاخص‌ها معمولاً بر پایه رویکرد ارزیابی چرخه عمر محاسبه می‌شوند و امکان تحلیل جامع اثرات زیست‌محیطی را در کل زنجیره تولید فراهم می‌کنند (Wang et al., 2016). شناسایی و تحلیل NrF و CF در سیستم‌های کشاورزی می‌تواند به پیش‌بینی دقیق‌تر پیامدهای زیست‌محیطی و همچنین ارائه مبنای علمی برای تصمیم‌گیری در زمینه بهبود مدیریت نهاده‌ها و فرآیندهای تولید کمک کند (Ding et al., 2022; Reisinger et al., 2017; Shibata et al., 2017; Wang et al., 2020).

اهمیت این شاخص‌ها در سیستم‌های عمده زراعی به‌خوبی مستند شده است؛ به‌طوری‌که مطالعات انجام‌شده در کشت ذرت و برنج دامنه قابل‌توجهی از مقادیر NrF و CF را در پاسخ به شیوه‌های مختلف مدیریتی گزارش کرده‌اند (Huang et al., 2022; Xu et al., 2020). با این حال، کاربرد ردپای نیتروژن به‌عنوان شاخصی مستقل نیز در سال‌های اخیر گسترش یافته و به‌عنوان ابزاری مؤثر برای برآورد کمی تلفات بالقوه نیتروژن فعال در فرآیندهای تولید معرفی شده است (Qin et al., 2011; Zhou et al., 2019) .

روش‌شناسی پژوهش

منطقه مورد مطالعه و جمع آوری داده ها

استان سیستان و بلوچستان با وسعتی حدود ۱۸۰۷۲۶ کیلومتر مربع، دومین استان پهناور کشور ایران محسوب می‌شود که بیش از ۱۱ درصد از مساحت کل کشور را دربر می‌گیرد. این استان در جنوب شرقی ایران واقع شده و از نظر مختصات جغرافیایی بین عرض‌های شمالی ′۳ °۲۵ تا ′۲۹ °۳۱ و طول‌های شرقی′۵۰ °۵۸ تا ′۲۱ °۶۳ قرار دارد (شکل ۱). داده های این پژوهش از آمارنامه های رسمی وزارت جهاد کشاورزی به دست آمده اند.

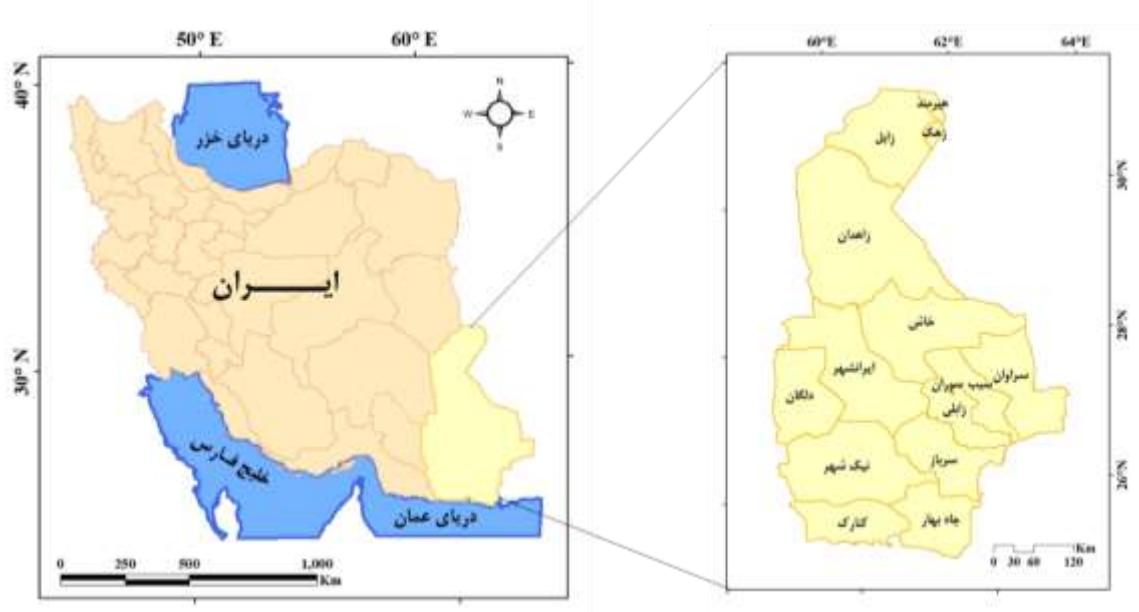
داده‌های مورد استفاده در این پژوهش از آمارنامه‌های رسمی منتشرشده توسط معاونت برنامه‌ریزی و اقتصادی وزارت جهاد کشاورزی جمهوری اسلامی ایران استخراج شد. این آمارنامه‌ها یکی از جامع‌ترین و معتبرترین پایگاه‌های اطلاعاتی بخش کشاورزی کشور محسوب می‌شوند که اطلاعات تفصیلی مربوط به تولیدات زراعی را در مقیاس شهرستانی و در یک دوره زمانی بلندمدت ارائه می‌کنند. در پژوهش حاضر، داده‌های مرتبط با چهار محصول مورد مطالعه شامل سطح زیر کشت، عملکرد، میزان مصرف نهاده‌های شیمیایی، انرژی، سوخت، بذر، عملیات مکانیزاسیون و سایر شاخص‌های مدیریتی از این منابع استخراج و برای محاسبه ردپای کربن و ردپای نیتروژن مورد استفاده قرار گرفت. وجود داده‌های پیوسته و ساختارمند در بازه زمانی حدود ۲۰ ساله این امکان را فراهم ساخت که تحلیل‌ها بر پایه اطلاعاتی پایدار، استاندارد و مبتنی بر روندهای واقعی سامانه‌های زراعی منطقه انجام شود و اثر نوسانات مقطعی ناشی از تغییرات کوتاه‌مدت اقلیمی یا مدیریتی تا حد زیادی کاهش یابد. همچنین، تفکیک داده‌ها در سطح شهرستان‌ها امکان بررسی دقیق‌تر تفاوت‌های مدیریتی و شرایط تولید در مناطق مختلف استان سیستان و بلوچستان را فراهم کرد. در این مطالعه میانگین دو سال زراعی آخر اعلامی، یعنی ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲ لحاظ شده اند.

داده‌های استخراج‌شده پیش از ورود به فرآیند محاسبات، از نظر سازگاری آماری، یکنواختی واحدها و مقادیر غیرمتعارف مورد بررسی و پالایش قرار گرفتند و سپس میانگین مقادیر برای تحلیل نهایی استفاده شد. استفاده از آمارنامه‌های رسمی وزارت جهاد کشاورزی این مزیت را داشت که تمامی داده‌ها بر اساس نظام پایش و گزارش‌دهی ملی گردآوری شده‌اند و از نظر قابلیت استناد، همگنی روش جمع‌آوری و پوشش فضایی و زمانی، از اعتبار بالایی برخوردارند. با وجود این، همانند بسیاری از مطالعات کلان‌مقیاس ارزیابی زیست‌محیطی، بخشی از داده‌ها به‌صورت میانگین‌های منطقه‌ای گزارش می‌شوند و ممکن است تمام تغییرپذیری‌های مدیریتی در سطح مزرعه را منعکس نکنند. با این حال، گستردگی پوشش مکانی و زمانی داده‌ها موجب شد این پایگاه اطلاعاتی بستر مناسبی برای ارزیابی ردپای کربن و نیتروژن سامانه‌های زراعی در شرایط اقلیمی خشک و نیمه‌خشک منطقه فراهم سازد.

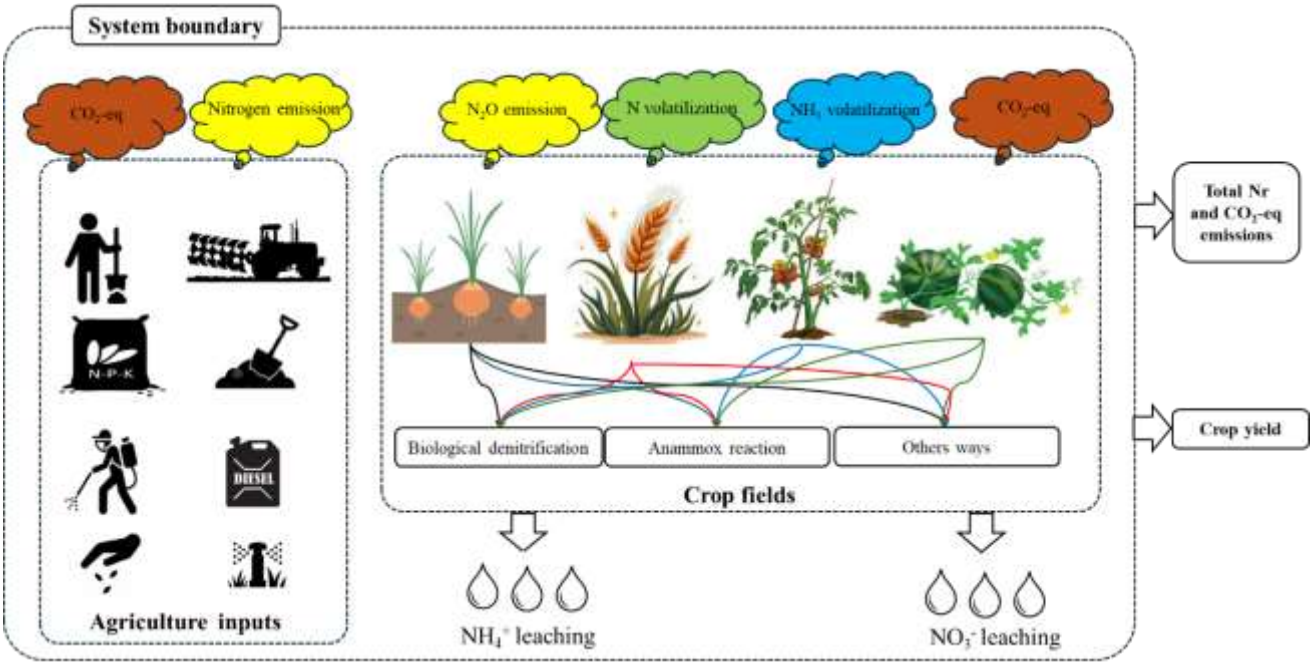
مرز سیستم برای محاسبه ردپای نیتروژن و کربن در شکل (۲) نشان داده شده است. در این مطالعه، مرز سیستم بر اساس رویکرد از گهواره تا دروازه مزرعه (cradle-to-farm-gate) برای هر دو ردپای کربن و نیتروژن تعریف شد. کلیه ورودی‌های مزرعه شامل کودهای شیمیایی (نیتروژن، فسفر، پتاسیم)، کود دامی، سوخت دیزل، برق مصرفی برای آبیاری، بذر، سموم (علف‌کش، حشره‌کش، قارچ‌کش)، ماشین‌آلات کشاورزی، نیروی کار و آب آبیاری درون مرز قرار دارند. برای هر نهاده، انتشارات ناشی از تولید (بالادستی)، حمل‌ونقل به مزرعه و مصرف در مزرعه محاسبه شده است. انتشارات مستقیم از مزرعه شامل تصعید آمونیاک(NH_3) ، انتشار اکسید نیتروژن(N_2O) ، آبشویی نیترات (NO_3^-) و آمونیوم (NH_4^+) و همچنین دی‌اکسید کربن ناشی از احتراق سوخت می‌باشد. انتشارات غیرمستقیم (نهفته) نیز از طریق ضرایب انتشار استاندارد برای تولید و حمل هر نهاده به ردپا اضافه شده است. خروجی اصلی، عملکرد محصول بوده و بقایای گیاهی در مزرعه رها شده و به عنوان محصول جانبی محاسبه نشده‌اند.

تمامی مراحل پس از برداشت شامل خشک کردن، بسته‌بندی، سردخانه، حمل به بازار، توزیع، مصرف و دفع پسماند از مرز سیستم خارج شده‌اند. همچنین ساخت زیرساخت‌های دائمی مزرعه (مانند کانال‌های آبیاری و جاده‌ها)، تولید کامل ماشین‌آلات کشاورزی (به جز استهلاک و تعمیرات)، تغییرات کاربری اراضی و دفع بسته‌بندی نهاده‌ها (با فرض لحاظ شدن در ضرایب پایگاه داده‌های مرجع) در این

مطالعه در نظر گرفته ن شده‌اند. این مرز یک سان برای هر دو ردپای کربن و نیتروژن اعمال شده تا قابلیت مقای سه نتایج بین دو شاخص حفظ شود.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در جنوب ایران



شکل ۲. مرز سیستم برای محاسبه ردپای نیتروژن و کربن در سیستان و بلوچستان

ردپای نیتروژن

ردپای نیتروژن (NF) یک شاخص جامع برای ارزیابی آلودگی نیتروژنی ناشی از کاربرد کودهای نیتروژنه در سیستم‌های کشاورزی است. این شاخص مقدار نیتروژن واکنشی (Nr) آزادشده به محیط‌زیست را از طریق چهار مسیر اصلی شامل تبخیر آمونیاک(NH_3) ، آبشویی نیترات(NO_3^-) ، انتشار اکسید نیتروژن (N_2O) و تلفات ناشی از دنیتریفیکاسیون (NO_x و N_2) کمی‌سازی می‌کند(معادله ۱). این تلفات نه‌تنها موجب کاهش کارایی مصرف نیتروژن (NUE) می‌شوند، بلکه در بروز آلودگی هوا و آب، افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای و تخریب خاک نیز نقش دارند(Huang et al., 2023; Liu et al., 2023a) .

رابطه ۱)
$$FN = \frac{NF_{total}}{Y}$$

که در آن، FN ردپای نیتروژن به ازای واحد محصول (kg N-eq t^{-1}) و Y عملکرد محصول ($t\ ha^{-1}$) است. ردپای نیتروژن کل شامل پنج مؤلفه اصلی است که به‌صورت زیر بیان می‌شود (معادله ۲):

رابطه ۲) $$= NF_{indirect} + NV_{NH_3} + NE_{N_3O} + NL_{NO_3^-} + NL_{NH_4^+} NF$$

این انتشارها ناشی از تلفات نیتروژن نهفته در فرآیند تولید و حمل نهاده‌های کشاورزی هستند که به‌صورت انتشارهای غیرمستقیم نیز در نظر گرفته می‌شوند(معادله ۳):

رابطه ۳) $$NF_{indirect} = \sum_{m=1}^{n} Q_m \times \lambda_m$$

که در آن، Q_m مقدار مصرف نهادهm (مانند اوره، گازوئیل و برق) و λ_m ضریب انتشار نیتروژن برای نهادهm (kg N-eq per unit) است.

مقادیر λ_m بر اساس مطالعات Wu et al. (2023) و Liu et al. (2023a) استخراج شده‌اند و بیانگر انتشارهای نیتروژنی نهفته در زنجیره بالادستی تولید نهاده‌ها هستند.

تصعید آمونیاک (NH_3) با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد (معادله ۴):

رابطه ۴) $$NV_{NH_3} = N \times \varepsilon \times {}^{44}/_{28} \times 0.476$$

که در آن، N مقدار نیتروژن مصرفی($kg\ N\ ha^{-1}$) ، ε ضریب تبخیر آمونیاک (۰/۱۵ برای آبیاری سطحی و ۰/۱۰ برای آبیاری بارانی)، ${}^{44}/_{28}$ ضریب تبدیل جرم مولی از NH_3–N به NH_3 و 0.476 سهم نیتروژن در مولکول NH_3 است. این مقادیر بر اساس یافته‌های Bai et al. (2023) و Liang et al. (2019) انتخاب شده‌اند.

انتشار اکسید نیتروژن (N_2O) طبق رابطه زیر برآورد شد(معادله ۵):

رابطه ۵) $$NE_{N_2O} = N \times \varphi \times {}^{17}/_{14} \times 0.833$$

که در آن، φ ضریب انتشار(N_2O (0.01) ، ${}^{17}/_{14}$ ضریب تبدیل جرم مولی از N_2O–N به N_2O و 0.833 سهم نیتروژن در مولکول N_2O است.

این روش مطابق با دستورالعمل Tier 1 هیئت بین‌الدولی تغییر اقلیم (IPCC) بوده و توسط Liu et al. (2023a) و Xu et al. (2020)تایید شده است.

آبشویی نیترات (NO_3^-) با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد (معادله ۶):

رابطه ۶) $$NL_{NO_3^-} = N \times \sigma \times {}^{62}/_{14} \times 0.238$$

که در آن، σ ضریب آبشویی نیترات (۰/۳۰–۰/۲۵ برای آبیاری سطحی و ۰/۱۵–۰/۱۰برای آبیاری بارانی)، ${}^{62}/_{14}$ ضریب تبدیل جرم مولی از NO_3^-–N به NO_3^- و 0.238 سهم نیتروژن در مولکول نیترات است.

مقادیر ضرایب بر اساس مطالعات(2023) .Wu et al ، (2019) .Liang et al وBai et al. (2023) انتخاب شدند.

آبشویی آمونیوم (NH_4^+) نیز با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد (معادله ۷):

رابطه ۷) $$NL_{NH_4^+} = N \times \gamma \times {}^{18}/_{14} \times 0.786$$

که در آن، γ ضریب آبشویی آمونیوم (معمولاً در بازه ۰/۰۵–۰/۰۳)، ${}^{18}/_{14}$ ضریب تبدیل جرم مولی از NH_4^+–N به NH_4^+ و 0.786سهم نیتروژن در مولکول آمونیوم است. اگرچه سهم تلفات آمونیومی در مقایسه با سایر مسیرها کمتر است، اما به‌منظور جامعیت ارزیابی در این مطالعه لحاظ شد(Bai et al., 2023) .

به دلیل محدود بودن پایگاه‌های داده بومی مربوط به ضرایب انتشار در سامانه‌های کشاورزی ایران، از ضرایب استاندارد ارائه‌شده توسط IPCC و مطالعات معتبر بین‌المللی استفاده شد. با این حال، برای افزایش دقت منطقه‌ای، شرایط واقعی اقلیمی، الگوی مصرف نهاده‌ها، شیوه‌های آبیاری و مدیریت زراعی منطقه در محاسبات لحاظ گردید. لازم به ذکر است که استفاده از ضرایب انتشار عمومی ممکن است بخشی از تغییرپذیری مکانی و مدیریتی انتشارها را منعکس نکند.

ردپای کربن

ردپای کربن (CF) تولید گیاهان زراعی با تجمیع انتشار گازهای گلخانه‌ای (GHG) ناشی از منابع مختلف نهاده‌های کشاورزی و عملیات مزرعه‌ای محاسبه شد. این منابع شامل انتشارهای مرتبط با تولید و مصرف کودهای شیمیایی، سوخت دیزل، برق مصرفی برای آبیاری،

عملکرد ماشین‌آلات کشاورزی و همچنین انتشارهای غیرمستقیم ناشی از گاز اکسید نیتروژن (N_2O) حاصل از مصرف کودهای نیتروژنه بود. ردپای کربن کل در دو واحد عملکردی بیان شد: کیلوگرم معادل دی‌اکسیدکربن در هکتار (ردپای کربن در سطح مزرعه) و کیلوگرم معادل دی‌اکسیدکربن به ازای هر کیلوگرم محصول (ردپای کربن در سطح محصول).

ردپای کربن کل با استفاده از رابطه کلی زیر محاسبه شد (معادله ۸):

$$CF = \sum_{j=1}^{n} \left(A_j \times EF_j\right)$$ رابطه ۸)

که در آن، A_j مقدار نهاده یا انرژی مصرفی (مانند کیلوگرم اوره، لیتر گازوئیل یا کیلووات‌ساعت برق) و EF_j ضریب انتشار متناظر با هر نهاده (kg CO_2-eq per unit) است.

انتشارهای N_2O ناشی از نیتروژن مصرفی به‌صورت جداگانه محاسبه و با استفاده از پتانسیل گرمایش جهانی صدساله (GWP_{100}) برابر با ۲۹۵ به معادل دی‌اکسیدکربن تبدیل شدند. همچنین، انتشارهای مرتبط با تجهیزات آبیاری و انتقال آب نیز در محاسبات لحاظ شدند و تفاوت‌های موجود بین سیستم آبیاری سطحی و آبیاری بارانی به‌طور مشخص در نظر گرفته شد (جدول ۱).

جدول ۱. ضرایب انتشار کربن نهاده‌های مختلف کشاورزی

منبع انتشار	واحد	ضریب انتشار	منابع
نیروی کارگری	**kg CO_2-eq per h**	۰/۷	**Mousavi-aval (2017)**
نیتروژن(N)	**kg CO_2-eq per kg**	۲/۱۲	**Zhang et al. (2013)**
فسفات(P_2O_5)	**kg CO_2-eq per kg P_2O_5**	۰/۶۴	**Chen et al. (2015)**
پتاسیم(K_2O)	**kg CO_2-eq per kg K_2O**	۰/۱۸	**Chen et al. (2015)**
کود دامی	**kg CO_2-eq per kg manure**	۰/۱۹۲	**Zhang et al. (2013)**
سوخت دیزل	**kg CO_2-eq per liter**	۴/۱	**Chen et al. (2015)**
برق	**kg CO_2-eq per kWh**	۱/۲۳	**Chen et al. (2015)**
بذر	**kg CO_2-eq per kg seed**	۱/۹۳	**Yue (2013)**
قارچ‌کش	**kg CO_2-eq per kg fungicide**	۱۲/۷	**Huang et al. (2017)**
علف‌کش	**kg CO_2-eq per kg herbicide**	۱۳/۷	**Huang et al. (2017)**
آفت‌کش	**kg CO_2-eq per kg pesticide**	۱۳/۷	**Huang et al. (2017)**
ماشین آلات	**kg CO_2-eq per kg**	۳/۳۲	**Jat et al. (2019)**
آب آبیاری	**kg CO_2-eq per m^3**	۰/۱۷	**Chaudhary et al. (2017)**

یافته‌های پژوهش

جدول ۲ سیاهه برداری میانگین نهاده های مصرفی در تولید چهار گیاه زراعی هندوانه، گوجه فرنگی، گندم و پیاز در استان سیستان و بلوچستان را نشان می دهد. سیاهه برداری این پژوهش به‌صورت سالانه برای چهار محصول زراعی اصلی شامل گندم، هندوانه، پیاز و گوجه‌فرنگی در استان سیستان و بلوچستان طی یک دوره یکساله (سال زراعی ۱۴۰۲-۱۴۰۱) گزارش شده است. داده‌های مورد نیاز از گزارش‌های آماری ملی، سازمان‌های جهاد کشاورزی استان و منابع علمی معتبر گردآوری شد. اطلاعات مربوط به نهاده‌های کشاورزی و عملکرد محصولات به‌صورت مستقیم یا غیرمستقیم از پایگاه‌های رسمی وزارت جهاد کشاورزی شامل سالنامه‌های آماری کشاورزی و طرح‌های هزینه—فایده تولید محصولات زراعی آن وزارتخانه در سطح استان استخراج شد.

کودهای شیمیایی مورد بررسی در این موجودی شامل نیتروژن(N) ، فسفر به‌صورتP_2O_5 ، پتاسیم به‌صورت K_2O و کودهای مرکب بودند. اطلاعات مربوط به سطح زیرکشت گندم، هندوانه، پیاز و گوجه‌فرنگی در استان سیستان و بلوچستان از سالنامه‌های آماری کشاورزی در دوره مورد مطالعه اخذ گردید. طول دوره رشد هر محصول بر اساس فاصله زمانی بین کاشت (یا نشاکاری در مورد گوجه‌فرنگی و پیاز) تا برداشت تعیین شد و داده‌های اقلیم‌شناسی مورد نیاز از گزارش‌های رسمی سازمان هواشناسی کشور استخراج گردید.

مصرف انرژی عمدتاً شامل گازوئیل مورد استفاده در عملیات مکانیزه طی فصل رشد محصولات بود. مهم‌ترین عملیات مکانیزه شامل

آماده‌سازی زمین (شخم و دیسک)، کاشت یا نشاکاری، مصرف کود، سم‌پاشی، برداشت و حمل‌ونقل درون‌مزرعه‌ای بود. مقدار گازوئیل مصرفی از طریق مقادیر اعلامی در آمارنامه کشاورزی گزارش شد. با توجه به اینکه در استان سیستان و بلوچستان به دلیل محدودیت منابع آب سطحی، سیستم‌های پمپاژ دیزلی نقش غالب در آبیاری دارند، مصرف گازوئیل مربوط به آبیاری و زهکشی نیز در مجموع مصرف انرژی مزرعه لحاظ شد. ضرایب انتشار گازهای گلخانه‌ای و نیتروژن واکنش‌پذیر مرتبط با کلیه نهاده‌های کشاورزی شامل کودهای شیمیایی، سموم و گازوئیل از پایگاه‌های معتبر ارزیابی چرخه عمر، از جمله Ecoinvent database و سایر پایگاه‌های مرجع بین‌المللی(IPCC) استخراج و با شرایط تولید و ساختار انرژی ایران تطبیق داده شد.

جدول ۲. سیاهه برداری میانگین نهاده های مصرفی و تولید عملکرد هندوانه، گوجه فرنگی، گندم و پیاز در سیستان و بلوچستان

نهاده های مصرفی	واحد	هندوانه	گوجه فرنگی	گندم	پیاز
نیروی کارگری	hour	۱۵۷/۸	۵۰۶	۱۰۷/۴	۴۴۶/۵
ماشین آلات کشاورزی	kg	۷/۱	۶/۸	۱۰/۹	۶/۳
کود نتیروژن	kg	۲۸۹/۶	۶۳۰/۶	۲۱۷/۷	۳۸۷/۹
کود فسفر	kg	۸۶/۸	۴۲۲/۹	۸۲	۱۶۳/۵
کود پتاس	kg	۹/۲	۰	۲۵/۵	۷۰/۶
کود دامی	kg	۴۰۶۰	۳۸۰۰	۱۴۱۴/۲	۲۵۰۰
علف کش	kg	۰/۶	۰/۴	۰	۱/۵
حشره کش	kg	۱/۶	۲/۷	۰/۱	۰
قارچ کش	kg	۰/۷	۰/۷	۰	۱
سوخت دیزل	kg	۵۶/۳	۴۹	۸۲/۱	۴۰/۳
الکتریسته	kg	۰	۰	۳۳۸/۴	۲۶۰/۵
آب آبیاری	m^3	۶۸۷۰	۹۵۱۰	۶۱۵۰	۵۸۹۰
عملکرد	kg	۲۸۶۱۷/۴۵	۲۹۴۹۲/۹	۱۸۸۱/۶	۳۴۸۵۱/۹

ردپای نیتروژن

نتایج ارزیابی ردپای نیتروژن چهار محصول زراعی گندم، پیاز، گوجه‌فرنگی و هندوانه در استان سیستان و بلوچستان نشان داد که الگوی انتشار نیتروژن فعال (Nr) به‌طور معناداری بین محصولات متفاوت است و این تفاوت‌ها نه‌تنها به مقدار مصرف کود نیتروژنه، بلکه به ساختار کلی نهاده‌ها، مسیرهای تلفات نیتروژن و کارایی تولید در هر سیستم کشت وابسته است(جدول ۳). در تمامی محصولات، انتشارهای غیرمستقیم نیتروژن (NA_indirect) سهم غالبی از ردپای نیتروژن کل را به خود اختصاص دادند، به‌طوری‌که این مؤلفه برای گندم، پیاز، گوجه‌فرنگی و هندوانه به‌ترتیب برابر با ۵۸۲/۴۶، ۱۰۲۹/۵۴، ۱۵۶۵/۵۷و ۱۶۶۵/۸۴ گرم نیتروژن معادل گزارش شد. این الگو به‌وضوح نشان‌دهنده نقش کلیدی زنجیره بالادستی تولید نهاده‌ها در تشدید فشار نیتروژنی سیستم‌های کشاورزی منطقه است.

مقادیر بالای NA_indirect در محصولات جالیزی، به‌ویژه هندوانه و گوجه‌فرنگی، بیانگر شدت بالای مصرف نهاده در این بوم سازگان های تولیدی است. سهم بسیار قابل‌توجه نیتروژن ناشی از کودهای آلی در پیاز ۱۰۲۲/۷ و هندوانه ۱۶۶۰/۸ گرم معادل نیتروژن نشان می‌دهد که استفاده از کود آلی، اگرچه اغلب به‌عنوان راهکاری سازگار با محیط‌زیست تلقی می‌شود، اما در صورت مصرف بالا و بدون مدیریت دقیق می‌تواند به یکی از منابع اصلی افزایش ردپای نیتروژن تبدیل شود. این موضوع اهمیت توجه به مقدار و نحوه مصرف کودهای آلی را در کنار کودهای شیمیایی برجسته می‌سازد.

در میان مسیرهای مستقیم تلفات نیتروژن، انتشار آمونیاک ($NVNH_3$) و اکسید نیتروژن (N_2O) نقش برجسته‌ای داشتند. بیشترین مقدار انتشار آمونیاک در گوجه‌فرنگی با مقدار ۱۰۶/۶۰ g N-eq مشاهده شد، در حالی که این مقدار برای پیاز و هندوانه به‌ترتیب ۶۵/۵۷ و ۴۸/۹۶ g N-eq و برای گندم تنها ۳۶/۸۰ g N-eqبود. این اختلاف ن شان می‌دهد که مح صولات جالیزی، به‌ویژه گوجه‌فرنگی، به دلیل مصرف بالاتر نیتروژن و شرایط اقلیمی گرم منطقه و همچنین بازه کاشت تا برداشت محصول، مستعد تصعید بیشتر آمونیاک هستند که این امر به کاهش کارایی مصرف نیتروژن و افزایش آلودگی هوا منجر می‌شود.

انتشار N_2O نیز سهم قابل‌توجهی از ردپای نیتروژن را در تمامی محصولات تشکیل داد. مقادیر NEN_2O برای گوجه‌فرنگی، پیاز، هندوانه و گندم به‌ترتیب برابر با ۱۵۹/۴۳، ۹۸/۰۷، ۷۳/۲۲ و ۵۵/۰۴ g N-eq بود. با توجه به پتانسیل بالای گرمایش جهانیN_2O ، این

نتایج نشان می‌دهد که سیستم‌های تولید محصولات جالیزی نه‌تنها از منظر آلودگی نیتروژنی، بلکه از دیدگاه تغییر اقلیم نیز فشار بیشتری به محیط‌زیست وارد می‌کنند.

جدول ۳. نتایج ارزیابی ردپای نیتروژن (g N-eq ha^{-1}) چهار محصول زراعی گندم، پیاز، گوجه‌فرنگی و هندوانه در استان سیستان و بلوچستان

آیتم محاسبه شده	هندوانه	گوجه فرنگی	گندم	پیاز
N	۴/۶	۱۰	۳/۴	۶/۱
P_2O_5	۰/۲	۰/۹	۰/۲	۰/۴
K_2O	۰	۰	۰/۱	۰/۲
نیتروژن کودهای آلی	۱۶۶۰/۸	۱۵۵۴/۵	۵۷۸/۵	۱۰۲۲/۷
سوخت دیزل	۰/۱۸	۰/۱۵	۰/۲۶	۰/۱۳
آفت کش ها	۰/۰۴	۰/۰۶	۰	۰/۰۴
NAindirect=∑Qusedm*λm	۱۶۶۵/۸۴	۱۵۶۵/۵۷	۵۸۲/۴۶	۱۰۲۹/۵۴
$NVNH_3$ = N× ε ×44/28 ×0.476	۴۸/۹۶	۱۰۶/۶۰	۳۶/۸۰	۶۵/۵۷
NEN_2O = N × φ ×17/14 ×0.833	۷۳/۲۲	۱۵۹/۴۳	۵۵/۰۴	۹۸/۰۷
$NLNO_3$- = N × σ ×62/14 × 0.238	۳۷/۹۱	۸۲/۵۵	۲۸/۵۰	۵۰/۷۸
$NLNH_4^+$ = N × γ × 18/14 × 0.786	۹/۳۱	۲۰/۲۸	۷	۱۲/۴۸
NF=NF/Y	۰/۰۶	۰/۰۷	۰/۳۸	۰/۰۴
Nfv=NF/crop value	۰/۳۲	۱/۳۳	۱/۸۹	۰/۱۸

آبشویی نیترات ($NLNO_3^-$) نیز به‌عنوان یکی از مسیرهای مهم تلفات نیتروژن، در محصولات جالیزی مقادیر بالاتری نسبت به گندم نشان داد. بیشترین مقدار آبشویی نیترات در گوجه‌فرنگی با ۸۲/۵۵ g N-eq مشاهده شد، در حالی که این مقدار برای پیاز، هندوانه و گندم به‌ترتیب ۵۰/۷۸، ۳۷/۹۱ و ۲۸/۵۰ g N-eq بود .این نتایج بیانگر خطر بالاتر آلودگی منابع آب زیرزمینی در سیستم‌های تولید محصولات جالیزی است، به‌ویژه در منطقه‌ای که وابستگی شدیدی به منابع آب زیرزمینی دارد. اگرچه آبشویی آمونیوم ($NLNH_4^+$) سهم کمتری از ردپای نیتروژن کل را به خود اختصاص داد، اما مقادیر آن در پیاز) ۱۲/۴۸ (g N-eq و گوجه‌فرنگی) ۲۰/۲۸ (g N-eq نشان می‌دهد که حذف این مسیر می‌تواند منجر به کم‌برآوردی فشار نیتروژنی شود.

تحلیل ردپای نیتروژن به ازای عملکرد (NF/Y) تفاوت‌های اساسی در کارایی محیط‌زیستی محصولات را آشکار ساخت. پیاز با مقدار ۰/۰۴کمترین ردپای نیتروژن عملکردمحور را نشان داد، در حالی که این مقدار برای گندم، گوجه‌فرنگی و هندوانه به‌ترتیب ۰/۳۸، ۰/۰۷ و ۰/۰۶ گزارش شد .این نتایج بیانگر آن است که پیاز با وجود عملکرد اقتصادی از نظر استفاده کارآمد از نیتروژن، سازگاری بیشتری با شرایط منطقه دارد، در حالی که گندم، از نظر زیست‌محیطی فشار بالاتری وارد می‌کند.

شاخص ردپای نیتروژن اقتصادی (Nfv) نیز تفاوت‌های مهمی بین محصولات نشان داد. مقدار Nfv برای گندم برابر با ۱/۸۹ بود که به‌مراتب بالاتر از گوجه‌فرنگی (۰/۳۳)، هندوانه (۰/۳۲) و پیاز (۰/۱۸) است .این یافته نشان می‌دهد که گندم در ازای ارزش اقتصادی تولیدشده، هزینه محیط‌زیستی نیتروژنی بالاتری تحمیل می‌کند، در حالی که پیاز تعادل مناسب‌تری بین منافع اقتصادی و فشار محیط‌زیستی برقرار کرده است. این نتایج نشان می‌دهد که عملکرد پایین گندم موجب افزایش شدت ردپای نیتروژن در واحد محصول شده و از دیدگاه کارایی زیست‌محیطی، این محصول در شرایط اقلیمی منطقه نسبت به محصولات جالیزی عملکرد ضعیف‌تری داشته است.

نتایج ردپای نیتروژن بر مبنای واحد محصول تولیدی نشان داد که شدت آلودگی نیتروژنی بین محصولات اختلاف بسیار قابل‌توجهی دارد. گندم با وجود ردپای نیتروژن پایین در واحد سطح، به دلیل عملکرد بسیار پایین (۱/۸۸ تن در هکتار)، بالاترین ردپای نیتروژن محصول‌محور را ثبت کرد، به‌طوری‌که مقدار NF/Y برای این محصول برابر با ۰/۳۸ kg N-eq t^{-1} بود. در مقابل، پیاز با عملکرد ۳۴/۸۵ تن در هکتار دارای ردپای نیتروژن محصول‌محور بسیار پایین‌تری ۰/۰۴ kg N-eq t^{-1} بود، که نشان‌دهنده توزیع تلفات نیتروژن بر حجم بالاتری از محصول تولیدی است. گوجه‌فرنگی و هندوانه نیز با عملکردهای ۲۹/۴۹ و ۲۸/۶۲ تن در هکتار، مقادیر میانی ردپای نیتروژن به‌ترتیب ۰/۰۷ و ۰/۰۶ kg N-eq t^{-1} را نشان دادند.

این نتایج نشان می‌دهد که تفسیر ردپای نیتروژن صرفاً بر مبنای واحد سطح می‌تواند گمراه‌کننده باشد، زیرا محصولی مانند گندم با فشار نیتروژنی نسبتاً کمتر در هکتار، در مقیاس محصول‌محور به یکی از ناکارآمدترین گزینه‌ها از نظر زیست‌محیطی تبدیل می‌شود. این

موضوع به‌ویژه در مناطق خشک مانند سیستان و بلوچستان اهمیت دارد، زیرا تولید محصول با عملکرد پایین منجر به تمرکز تلفات نیتروژن در حجم محدودی از تولید می‌شود. در مقابل، محصولات جالیزی، به‌ویژه پیاز، اگرچه دارای مصرف نهاده بالاتر هستند، اما به دلیل عملکرد بالاتر، ردپای نیتروژن کمتری به ازای هر تن محصول ایجاد می‌کنند. این یافته بر اهمیت هم‌زمان در نظر گرفتن شاخص‌های عملکردمحور و سطح‌محور در تصمیم‌گیری‌های زراعی تأکید دارد.

تحلیل ردپای نیتروژن بر مبنای واحد ارزش اقتصادی محصول نشان داد که تفاوت میان محصولات بسیار پررنگ‌تر از مقیاس محصول‌محور است .گندم با وجود قیمت نسبتاً بالاتر نسبت به برخی محصولات جالیزی (۰/۲۵ دلار به ازای هر کیلوگرم)، به دلیل عملکرد بسیار پایین و ردپای نیتروژن قابل‌توجه در واحد سطح، بالاترین ردپای نیتروژن اقتصادی را ثبت کرد. به بیان دیگر، مقدار نیتروژن تلف‌شده به ازای هر دلار درآمد حاصل از گندم به‌مراتب بیشتر از سایر محصولات بود. این امر نشان می‌دهد که حتی افزایش قیمت تضمینی گندم نیز نمی‌تواند ناکارآمدی زیست‌محیطی آن را در شرایط اقلیمی منطقه مورد مطالعه جبران کند.

در مقابل، پیاز با قیمت ۰/۱۰ دلار به ازای هر کیلوگرم و عملکرد بالا، کمترین ردپای نیتروژن به ازای واحد ارزش اقتصادی را نشان داد. گوجه‌فرنگی و هندوانه نیز اگرچه قیمت فروش پایین‌تری داشتند (۰/۰۷ و ۰/۰۵ دلار به ازای هر کیلوگرم)، اما به دلیل تولید انبوه، ردپای نیتروژن اقتصادی آن‌ها در سطحی قابل‌قبول باقی ماند. این نتایج نشان می‌دهد که از منظر کارایی نیتروژنی–اقتصادی، محصولات جالیزی در منطقه سیستان و بلوچستان مزیت نسبی قابل‌توجهی نسبت به گندم دارند و سیاست‌های کشاورزی مبتنی بر قیمت، بدون توجه به شدت ردپای نیتروژن، ممکن است به تشدید فشارهای زیست‌محیطی منجر شود.

در مجموع، نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که محصولات جالیزی در استان سیستان و بلوچستان با ردپای نیتروژن بالاتر، تلفات شدیدتر نیتروژن و کارایی محیط‌زیستی پایین‌تری نسبت به گندم همراه هستند. سهم غالب انتشارهای غیرمستقیم و مقادیر بالای انتشار N_2Oو آبشویی نیترات نشان می‌دهد که کاهش ردپای نیتروژن در این سیستم‌ها نیازمند بازنگری جدی در مدیریت کودهای نیتروژنه، بهینه‌سازی مصرف کودهای آلی و حرکت به سمت الگوهای تولید با شدت نهاده کمتر است.

ردپای کربن

نتایج محاسبه ردپای کربن چهار محصول زراعی پیاز، گندم، گوجه‌فرنگی و هندوانه نشان داد که شدت انتشار گازهای گلخانه‌ای به‌طور معناداری بین محصولات متفاوت است و این تفاوت‌ها عمدتاً ناشی از الگوی مصرف نهاده‌ها، شدت انرژی‌بر بودن عملیات مزرعه‌ای و میزان وابستگی به آبیاری است(جدول ۴). ردپای کربن کل در واحد سطح برای گوجه‌فرنگی با مقدار ۴۵۸۴/۰۸ $kg\ CO_2\text{-}eq\ ha^{-1}$ بیشترین مقدار را نشان داد، در حالی که پیاز، گندم و هندوانه به‌ترتیب مقادیر ۳۲۸۳/۱۲، ۳۱۲۸/۲۰و ۳۰۲۷/۳۵ $kg\ CO_2\text{-}eq\ ha^{-1}$را ثبت کردند. این نتایج نشان می‌دهد که محصولات جالیزی، به‌ویژه گوجه‌فرنگی، فشار اقلیمی بیشتری نسبت به محصولات زراعی سنتی مانند گندم به سیستم‌های کشاورزی منطقه وارد می‌کنند.

جدول ۴. نتایج ارزیابی ردپای کربن ($kg\ CO_2\text{-}eq\ ha^{-1}$) چهار محصول زراعی گندم، پیاز، گوجه‌فرنگی و هندوانه در استان سیستان و بلوچستان

منبع انتشار	هندوانه	گوجه فرنگی	گندم	پیاز
نیروی کارگری	۱۱۰/۴۶	۳۵۴/۲۰	۷۵/۱۸	۳۱۲/۵۵
نیتروژن (N)	۶۱۳/۹۵	۱۳۳۶/۸۷	۴۶۱/۵۲	۸۲۲/۳۵
فسفات (P_2O_5)	۵۵/۵۵	۲۷۰/۶۶	۵۲/۴۸	۱۰۴/۶۴
پتاسیم (K_2O)	۱/۶۶	۰	۴/۵۹	۱۲/۷۱
کود دامی	۷۷۹/۵۲	۷۲۹/۶۰	۲۷۱/۵۳	۴۸۰
سوخت دیزل	۲۳۰/۸۳	۲۰۰/۹۰	۳۳۶/۶۱	۱۶۵/۲۳
برق	۰	۰	۴۱۶/۲۳	۳۲۰/۴۲
بذر	۴/۸۸	۱/۲۲	۴۲۷	۹/۷۶
قارچ‌کش	۸/۸۹	۸/۸۹	۰	۱۲/۷۰
علف‌کش	۸/۲۲	۵/۴۸	۰	۲۰/۵۵
آفت‌کش	۲۱/۹۲	۳۶/۹۹	۱/۳۷	۰
ماشین آلات	۲۳/۵۷	۲۲/۵۸	۳۶/۱۹	۲۰/۹۲
آب آبیاری	۱۱۶۷/۹۰	۱۶۱۶/۷۰	۱۰۴۵/۵۰	۱۰۰۱/۳۰
مجموع	۳۰۲۷/۳۵	۴۵۸۴/۰۸	۳۱۲۸/۲۰	۳۲۸۳/۱۲

در میان منابع انتشار، مصرف نیتروژن شیمیایی یکی از مؤلفه‌های غالب ردپای کربن در تمامی محصولات بود. بیشترین سهم انتشار ناشی از نیتروژن در گوجه‌فرنگی با مقدار ۱۳۳۶/۸۷ kg CO_2-eq ha^{-1} مشاهده شد، در حالی که این مقدار برای پیاز، هندوانه و گندم به‌ترتیب ۸۲۲/۳۵، ۶۱۳/۹۵ و ۴۶۱/۵۲ kg CO_2-eq ha^{-1}بود. این الگو نشان می‌دهد که وابستگی بیشتر محصولات جالیزی به کودهای نیتروژنه، نه‌تنها ردپای نیتروژن، بلکه ردپای کربن آن‌ها را نیز به‌طور هم‌زمان تشدید می‌کند و پیوند مستقیم بین مصرف نیتروژن و تغییر اقلیم را برجسته می‌سازد.

کودهای آلی نیز سهم قابل‌توجهی در ردپای کربن داشتند، به‌ویژه در گوجه‌فرنگی و هندوانه که به‌ترتیب مقادیر ۷۲۹/۶۰و ۷۷۹/۵۲ kg CO_2-eq ha^{-1}را نشان دادند. این نتیجه تأیید می‌کند که کودهای آلی، علی‌رغم مزایای بالقوه برای بهبود خصوصیات خاک، در صورت مصرف بالا می‌توانند به یکی از منابع اصلی انتشار کربن در سیستم‌های تولید تبدیل شوند. بنابراین، جایگزینی ساده کود شیمیایی با کود آلی لزوماً به کاهش ردپای کربن منجر نمی‌شود، مگر آنکه با مدیریت بهینه همراه باشد.

مصرف آب آبیاری یکی دیگر از مؤلفه‌های غالب ردپای کربن در تمامی محصولات بود. بالاترین انتشار مرتبط با آب آبیاری در گوجه‌فرنگی با مقدار ۱۶۱۶/۷۰ kg CO_2-eq ha^{-1} مشاهده شد، در حالی که این مقدار برای هندوانه، گندم و پیاز به‌ترتیب ۱۱۶۷/۹۰، ۱۰۴۵/۵۰و ۱۰۰۱/۳۰ kg CO_2-eq ha^{-1}بود. سهم بالای آب آبیاری در ردپای کربن نشان‌دهنده وابستگی شدید تولید محصولات در منطقه به انرژی مورد نیاز برای استخراج و انتقال آب است؛ مسئله‌ای که در شرایط اقلیمی خشک و نیمه‌خشک استان سیستان و بلوچستان اهمیت مضاعفی دارد.

در بخش انرژی فسیلی، مصرف سوخت دیزل سهم قابل‌توجهی در ردپای کربن گندم داشت ۳۳۶/۶۱ kg CO_2-eq ha^{-1} ، که نسبت به پیاز، گوجه‌فرنگی و هندوانه بالاتر بود. این موضوع احتمالاً ناشی از شدت بالاتر عملیات مکانیزه و تردد ماشین‌آلات در تولید گندم است. در مقابل، مصرف برق در پیاز و گندم نقش مهمی ایفا کرد، به‌طوری‌که انتشار ناشی از برق مصرفی در این دو محصول به‌ترتیب ۳۲۰/۴۲و ۴۱۶/۲۳ kg CO_2-eq ha^{-1} گزارش شد، در حالی که در گوجه‌فرنگی و هندوانه عملاً ناچیز بود. این تفاوت بیانگر ناهمگونی سیستم‌های تأمین انرژی در تولید محصولات مختلف است.

سهم نهاده‌هایی مانند بذر، سموم قارچ‌کش، علف‌کش و حشره‌کش در مقایسه با کودها، آب آبیاری و انرژی کمتر بود، اما در برخی محصولات نقش قابل‌توجهی داشتند. به‌عنوان مثال، سهم بالای بذر در ردپای کربن گندم ۴۲۷ kg CO_2-eq ha^{-1}نشان می‌دهد که نهاده‌های اولیه نیز می‌توانند در برخی سیستم‌ها به مؤلفه‌ای تعیین‌کننده تبدیل شوند. همچنین سهم بالاتر حشره‌کش‌ها در گوجه‌فرنگی ۳۶/۹۹ kg CO_2-eq ha^{-1} و هندوانه ۲۱/۹۲ kg CO_2-eq ha^{-1} نشان‌دهنده شدت بیشتر مدیریت آفات در محصولات جالیزی است.

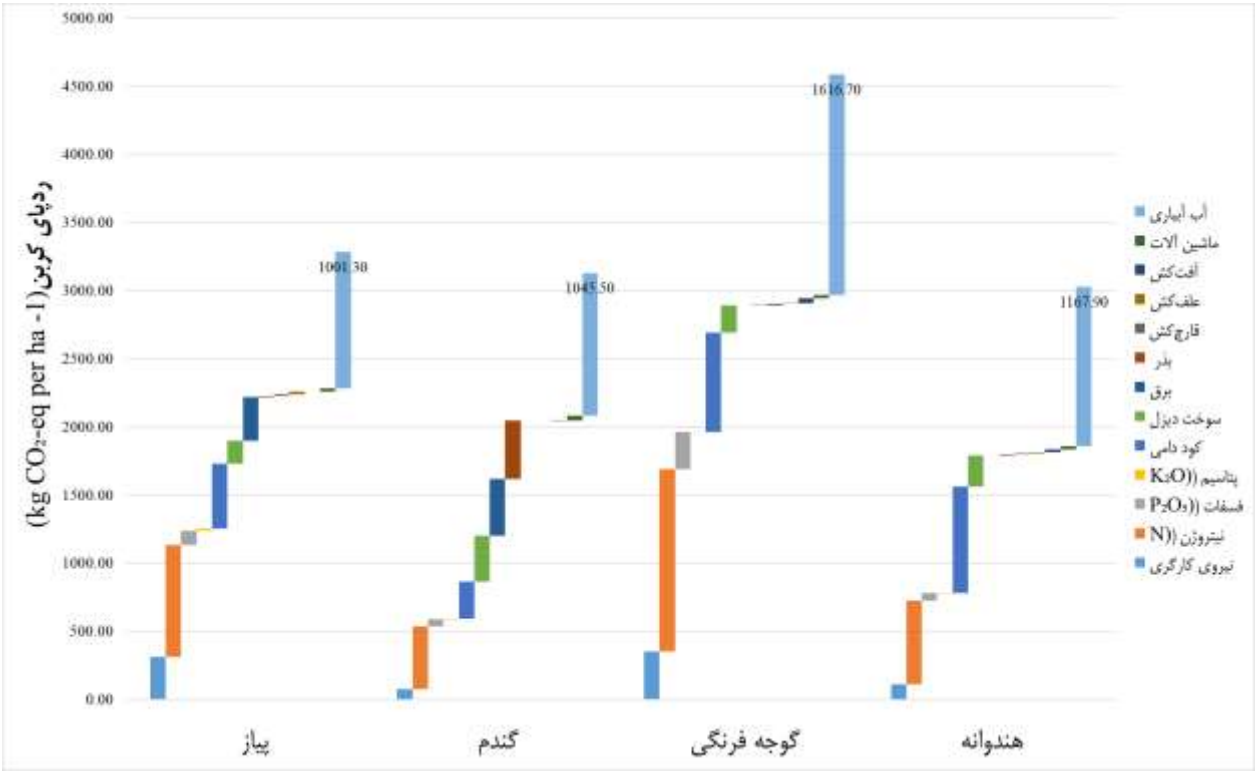
تحلیل ردپای کربن بر مبنای تن محصول تولیدی نیز الگوی متفاوتی نسبت به مقیاس هکتاری نشان داد . گندم با ردپای کربن کل ۳۱۲۸/۲۰ kg CO_2-eq ha^{-1}و عملکرد ۱/۸۸ تن در هکتار، بالاترین ردپای کربن محصول‌محور را ثبت کرد که معادل حدود ۱۶۶۳ kg CO_2-eq t^{-1}است. این مقدار به‌مراتب بیشتر از گوجه‌فرنگی حدود ۱۱۵۵ kg CO_2-eq t^{-1} ، هندوانه حدود ۱۰۶ kg CO_2-eq t^{-1} و پیاز حدود ۹۴ kg CO_2-eq t^{-1} است. اگرچه گوجه‌فرنگی بیشترین ردپای کربن را در واحد سطح داشت، اما عملکرد بالای آن باعث شد که شدت انتشار کربن در واحد محصول به‌طور قابل‌توجهی کاهش یابد.

این نتایج نشان می‌دهد که کارایی تولید نقش تعیین‌کننده‌ای در تفسیر ردپای کربن دارد و محصولات با عملکرد پایین، حتی با ردپای کربن هکتاری متوسط، می‌توانند از منظر اقلیمی بسیار پرهزینه باشند. در این چارچوب، گندم در منطقه مورد مطالعه از نظر ردپای کربن محصول‌محور کم‌بازده‌ترین گزینه محسوب می‌شود، در حالی که پیاز و هندوانه کمترین فشار اقلیمی را به ازای هر تن محصول ایجاد می‌کنند. این یافته‌ها در کنار نتایج ردپای نیتروژن نشان می‌دهد که ارزیابی پایداری محصولات کشاورزی در مناطق خشک باید فراتر از مقیاس هکتاری رفته و به‌طور جدی بر شاخص‌های محصول‌محور تمرکز کند؛ زیرا این شاخص‌ها تصویر واقع‌بینانه‌تری از هزینه محیط‌زیستی واقعی تولید غذا ارائه می‌دهند.

تحلیل ردپای کربن بر مبنای واحد ارزش اقتصادی نیز الگوی مشابهی را با شدت بیشتر نشان داد. گندم، به دلیل ترکیب نامطلوب ردپای کربن بالا در واحد محصول و ارزش اقتصادی محدود تولید در هکتار، بیشترین انتشار کربن به ازای هر دلار درآمد را ایجاد کرد. این بدان معناست که هر واحد ارزش اقتصادی حاصل از تولید گندم با هزینه اقلیمی بالایی همراه است، که این موضوع از منظر سیاست‌های کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای بسیار نگران‌کننده است. حتی در مقایسه با گوجه‌فرنگی که ردپای کربن هکتاری بالاتری داشت، شدت انتشار کربن اقتصادی گندم به‌مراتب بیشتر بود. در مقابل، پیاز و هندوانه کمترین ردپای کربن به ازای واحد ارزش اقتصادی را نشان دادند،

که ناشی از ترکیب عملکرد بالا و بازده اقتصادی مناسب آن‌هاست. گوجه‌فرنگی نیز علی‌رغم ردپای کربن قابل‌توجه در واحد سطح، به دلیل حجم بالای تولید، شدت کربن اقتصادی متوسطی را ثبت کرد. این نتایج نشان می‌دهد که ارزیابی پایداری کشاورزی در مناطق خشک باید به‌طور هم‌زمان سه بعد محیط‌زیستی، تولیدی و اقتصادی را در نظر بگیرد، زیرا محصولی که از نظر سطح زیر کشت یا حتی عملکرد مناسب به نظر می‌رسد، ممکن است در مقیاس ارزش اقتصادی، فشار اقلیمی نامتناسبی ایجاد کند. چنین رویکردی می‌تواند مبنای علمی محکمی برای بازنگری در الگوی کشت و سیاست‌های حمایتی کشاورزی در مناطق کم‌آب فراهم آورد.

الگوی مشابه ردپای نیتروژن در تحلیل ردپای کربن نیز مشاهده شد، هرچند نقش نهاده‌های انرژی‌بر و آب آبیاری در تشدید اختلاف‌ها برجسته‌تر بود. در مقیاس واحد سطح، محصولات جالیزی به‌ویژه گوجه‌فرنگی، بیشترین ردپای کربن را به دلیل مصرف بالای آب آبیاری، سوخت و کود نشان دادند، در حالی که گندم ردپای کربن هکتاری کمتری داشت. با این حال، در مقیاس عملکرد، ردپای کربن گندم به‌شدت افزایش یافت و به بالاترین مقدار در میان محصولات مورد بررسی رسید که بازتاب مستقیم عملکرد پایین آن در شرایط اقلیمی منطقه است. در مقیاس اقتصادی نیز گندم بیشترین انتشار کربن به ازای هر دلار درآمد را ثبت کرد، در حالی که پیاز و هندوانه کمترین شدت کربن اقتصادی را داشتند. این یافته‌ها تأکید می‌کند که سیاست‌های کاهش انتشار و برنامه‌ریزی الگوی کشت در مناطق خشک باید فراتر از مقیاس هکتاری حرکت کرده و هم‌زمان بهره‌وری تولید و بازده اقتصادی را در کنار ملاحظات اقلیمی مدنظر قرار دهند؛ در غیر این صورت، حتی محصولات استراتژیک می‌توانند به منابع اصلی ناکارآمدی زیست‌محیطی تبدیل شوند.



شکل ۲. ردپای کربن در هکتار به ازای نهاده های مصرفی برای پیاز، گندم، گوجه و هندوانه

ردپای نیتروژن بالاتر در محصولات جالیزی، به‌ویژه گوجه‌فرنگی و هندوانه، صرفاً ناشی از افزایش مقدار مصرف کود نیتروژنه نبود، بلکه به برهم‌کنش پیچیده بین شدت مصرف نهاده، رژیم آبیاری، شرایط اقلیمی گرم منطقه و کارایی پایین جذب نیتروژن در دوره‌های اوج رشد مربوط می‌شود. در اقلیم گرم و خشک سیستان و بلوچستان، دمای بالای خاک و شدت تبخیر زیاد، شرایط مناسبی برای افزایش تصعید آمونیاک و تسریع فرآیندهای نیتریفیکاسیون–دنیتریفیکاسیون فراهم می‌کند. این شرایط موجب می‌شود بخشی از نیتروژن مصرفی پیش از جذب گیاه به فرم‌های واکنش‌پذیر زیست‌محیطی تبدیل شود. علاوه بر این، در محصولات جالیزی به دلیل نیاز آبی بالا و دفعات متعدد آبیاری، احتمال انتقال نیترات به لایه‌های عمیق‌تر خاک و افزایش آبشویی نیتروژن نیز بیشتر است. بنابراین، شدت بالاتر ردپای نیتروژن در این محصولات، بازتابی از هم‌زمانی مصرف بالای نهاده و محدودیت کارایی اکولوژیکی سامانه در حفظ نیتروژن است.

اگرچه گندم در مقیاس هکتاری ردپای نیتروژن و کربن پایین‌تری نسبت به محصولات جالیزی نشان داد، اما عملکرد بسیار پایین آن در شرایط اقلیمی منطقه موجب افزایش شدید شدت انتشار در مقیاس محصول‌محور شد. این یافته نشان می‌دهد که کاهش نهاده به‌تنهایی الزاماً به معنای بهبود کارایی زیست‌محیطی نیست، بلکه نسبت بین نهاده مصرفی و زیست‌توده تولیدشده نقش تعیین‌کننده دارد. در سامانه‌های کم‌بازده، حتی مقادیر متوسط انتشار می‌توانند بر حجم محدودی از محصول توزیع شوند و در نتیجه شدت ردپا در واحد محصول افزایش یابد. این مسئله به‌ویژه در مناطق خشک اهمیت بیشتری دارد، زیرا تنش گرمایی، محدودیت آب و افت حاصلخیزی خاک می‌توانند کارایی تبدیل نهاده به محصول را کاهش دهند. بنابراین، نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که ارزیابی پایداری محصولات در مناطق خشک باید هم‌زمان بهره‌وری زیستی و شدت انتشار را مدنظر قرار دهد.

سهم بالای آب آبیاری در ردپای کربن تمامی محصولات نشان‌دهنده وابستگی شدید کشاورزی منطقه به انرژی مورد نیاز برای استخراج، انتقال و توزیع آب است. در شرایط خشک و نیمه‌خشک، محدودیت بارندگی و اتکای گسترده به منابع آب زیرزمینی موجب می‌شود که آب نه‌تنها یک نهاده هیدرولوژیک، بلکه یک نهاده انرژی‌بر نیز محسوب شود. از این منظر، افزایش ردپای کربن در محصولات با نیاز آبی بالا صرفاً به مصرف مستقیم سوخت یا برق محدود نمی‌شود، بلکه بازتابی از پیوند عمیق بین بحران آب و انتشار گازهای گلخانه‌ای در سامانه‌های کشاورزی خشک است. این یافته نشان می‌دهد که بهبود راندمان آبیاری و کاهش تلفات آب می‌تواند هم‌زمان به کاهش فشار بر منابع آب و کاهش ردپای کربن منجر شود.

نتایج نشان داد که کودهای آلی در برخی محصولات سهم قابل‌توجهی در ردپای کربن و نیتروژن داشتند. این موضوع بیانگر آن است که استفاده از کود آلی لزوماً به معنای کاهش اثرات زیست‌محیطی نیست. در شرایط مصرف بالا و مدیریت غیربهینه، کودهای آلی می‌توانند به یکی از منابع اصلی انتشار نیتروژن واکنش‌پذیر و گازهای گلخانه‌ای تبدیل شوند. به‌ویژه در اقلیم‌های گرم، معدنی شدن سریع ماده آلی و آزادسازی تدریجی نیتروژن می‌تواند با نیاز واقعی گیاه هم‌زمان نباشد و بخشی از نیتروژن به مسیرهای اتلاف وارد شود. بنابراین، مزیت زیست‌محیطی کودهای آلی به‌شدت وابسته به زمان مصرف، مقدار کاربرد، کیفیت کود و هماهنگی آن با نیاز تغذیه‌ای گیاه است.

مقایسه ردپای کربن و نیتروژن محصولات زراعی با مطالعات بین‌المللی

نتایج این پژوهش نشان داد که محصولات جالیزی، به‌ویژه گوجه‌فرنگی، دارای ردپای کربن و ردپای نیتروژن بالاتری نسبت به گندم هستند که این موضوع عمدتاً ناشی از مصرف زیاد کودهای نیتروژنه، شدت بالای آبیاری و وابستگی بیشتر این محصولات به نهاده‌های انرژی‌بر است. در پژوهش حاضر، گوجه‌فرنگی بیشترین ردپای کربن را در واحد سطح نشان داد که بیانگر شدت بالای مصرف نهاده‌ها در این محصول است. مطالعات جدید بین‌المللی نیز نتایج مشابهی را گزارش کرده‌اند و نشان داده‌اند که محصولات سبزی و جالیزی به دلیل مصرف زیاد کود نیتروژنه، انرژی و آب، فشار اقلیمی بیشتری نسبت به غلات ایجاد می‌کنند. همچنین گزارش شده است که سهم کود نیتروژنه و انرژی آبیاری در افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای در این محصولات بسیار قابل‌توجه است و معمولاً مهم‌ترین عامل شکل‌گیری ردپای کربن محسوب می‌شود(Yang et al., 2022; Zhang et al., 2022).

در پژوهش حاضر، انتشارهای غیرمستقیم نیتروژن سهم غالبی از ردپای نیتروژن کل را در تمامی محصولات تشکیل دادند و این سهم در گوجه‌فرنگی و هندوانه بیشتر از سایر محصولات بود. این نتیجه نشان می‌دهد که بخش عمده فشار نیتروژنی سامانه‌های تولیدی نه‌تنها ناشی از تلفات مستقیم مزرعه‌ای، بلکه وابسته به فرآیند تولید، حمل‌ونقل و مصرف نهاده‌های کشاورزی است. مطالعات اخیر نیز بیان کرده‌اند که در سامانه‌های تولید سبزیجات، سهم انتشارهای غیرمستقیم نیتروژن به‌ویژه در شرایط مصرف زیاد کودهای شیمیایی و آلی بسیار بالا است. همچنین گزارش شده است که جایگزینی کودهای آلی بدون مدیریت مناسب می‌تواند به افزایش انتشار نیتروژن واکنش‌پذیر و تشدید ردپای نیتروژن منجر شود. این موضوع با نتایج پژوهش حاضر درباره سهم بالای کودهای آلی در افزایش ردپای نیتروژن پیاز و هندوانه همخوانی دارد(Yang et al., 2022; Qasim et al., 2022).

یافته‌های این پژوهش درباره انتشار زیاد آمونیاک، اکسید نیتروژن و آبشویی نیترات در محصولات جالیزی نیز با نتایج مطالعات جدید مطابقت داشت. در این مطالعه، گوجه‌فرنگی بیشترین میزان انتشار NH_3 و N_2O را نشان داد که به مصرف بالای نیتروژن و شرایط گرم و خشک منطقه نسبت داده شد. پژوهش‌های اخیر نشان داده‌اند که سامانه‌های تولید فشرده سبزیجات، به‌ویژه تحت آبیاری شدید، دارای تلفات بالای نیتروژن از طریق دنیتریفیکاسیون، تصعید آمونیاک و آبشویی نیترات هستند. این مطالعات همچنین تأکید می‌کنند که در مناطق خشک، افزایش آبشویی نیترات می‌تواند خطر آلودگی منابع آب زیرزمینی را به‌طور جدی افزایش دهد. نتایج این پژوهش نیز نشان داد که محصولات جالیزی در منطقه مورد مطالعه دارای خطر بالاتر آلودگی نیتروژنی منابع آب زیرزمینی هستند (Qasim et al., 2022; Wang

.et al., 2023)

یکی از مهم‌ترین نتایج این پژوهش آن بود که گندم، علی‌رغم داشتن ردپای هکتاری کمتر، در مقیاس محصول‌محور دارای شدت ردپای بالاتری بود. دلیل اصلی این موضوع عملکرد پایین گندم در شرایط خشک و نیمه‌خشک منطقه بود که موجب تمرکز انتشارها در حجم محدودی از محصول شد. مطالعات اخیر نیز گزارش کرده‌اند که در مناطق خشک، کاهش عملکرد محصولات زراعی می‌تواند شدت انتشار گازهای گلخانه‌ای و ردپای نیتروژن را به ازای هر واحد محصول افزایش دهد، حتی اگر مصرف نهاده‌ها در واحد سطح نسبتاً پایین باشد. این نتایج نشان می‌دهد که ارزیابی صرفاً بر مبنای هکتار ممکن است گمراه‌کننده باشد و محصولات کم‌عملکرد، از نظر شاخص‌های محصول‌محور، ناکارآمدتر ظاهر شوند(Wang et al., 2023; Halpern et al., 2022).

نتایج این پژوهش همچنین نشان داد که سهم کود نیتروژنه در ردپای کربن تمامی محصولات بسیار قابل‌توجه بود و در گوجه‌فرنگی بیشترین مقدار را داشت. مطالعات جدید تأکید کرده‌اند که مدیریت مصرف نیتروژن یکی از مؤثرترین راهکارها برای کاهش ردپای محیط‌زیستی سامانه‌های کشاورزی است. در پژوهش‌های اخیر نشان داده شده است که مدیریت دقیق کود نیتروژن، کاهش مصرف غیرضروری نهاده‌ها و استفاده از فناوری‌های بهینه‌سازی مصرف کود می‌تواند موجب کاهش معنی‌دار انتشار گازهای گلخانه‌ای، اسیدی‌شدن و یوتریفیکاسیون شود. این یافته‌ها با نتایج پژوهش حاضر همخوانی دارد و نشان می‌دهد که مدیریت مصرف نیتروژن در محصولات جالیزی منطقه می‌تواند نقش کلیدی در کاهش ردپای کربن و نیتروژن داشته باشد(Denora et al., 2023; Zhang et al., 2022).

در مجموع، مقایسه نتایج این پژوهش با مطالعات معتبر بین‌المللی نشان می‌دهد که الگوی مشاهده‌شده در استان سیستان و بلوچستان با روندهای جهانی کشاورزی در مناطق خشک و نیمه‌خشک همخوانی دارد. اغلب مطالعات اخیر تأکید می‌کنند که مصرف زیاد کود نیتروژنه، وابستگی شدید به آبیاری و عملکرد پایین محصولات در اقلیم‌های خشک، از مهم‌ترین عوامل افزایش ردپای کربن و نیتروژن هستند. همچنین این مطالعات نشان می‌دهند که استفاده همزمان از شاخص‌های هکتاری، عملکردمحور و اقتصادی برای ارزیابی پایداری سامانه‌های کشاورزی ضروری است و ارزیابی صرفاً بر مبنای واحد سطح نمی‌تواند تصویر دقیقی از کارایی محیط‌زیستی سامانه‌های تولیدی ارائه دهد (Halpern et al., 2022; Denora et al., 2023)

تحلیل حساسیت و ارزیابی عدم قطعیت‌ها

به منظور ارزیابی دقیق‌تر و بومی‌سازی شاخص‌های زیست‌محیطی در شرایط اقلیمی و زیرساختی خاص استان سیستان و بلوچستان، تحلیل حساسیت دوگانه‌ای بر روی ضرایب کلیدی ردپای کربن و نیتروژن انجام شد. این تحلیل به دنبال تبیین این واقعیت است که ضرایب استاندارد بین‌المللی (مانند مراجع IPCC) به دلیل نادیده گرفتن محدودیت‌های فنی منطقه‌ای و اقلیم‌های خشک، ممکن است نرخ واقعی انتشار را کمتر از حد واقعی برآورد کنند.

الف. حساسیت ردپای کربن به شدت انتشار انرژی در آب آبیاری

در محاسبات پایه، ضریب انتشار آب آبیاری بر اساس مدل‌های بین المللی برابر با $kg\ CO_2\text{-}eq\ m^{-3}$ در نظر گرفته شد. با این حال، چاه‌های کشاورزی در منطقه سیستان و بلوچستان به طور عمده به پمپ‌های دیزلی فرسوده و خارج از شبکه برق متکی هستند که مصرف سوختی در حدود ۰/۲ تا ۰/۳ لیتر دیزل به ازای هر مترمکعب آب پمپاژ شده دارند. با در نظر گرفتن شدت کربن سوخت دیزل ($۴/۱\ kg\ CO_2\text{-}eq\ l^{-1}$) ضریب واقعی انتشار آب در این منطقه می‌تواند بین ۰/۸ تا ۱/۱۰ کیلوگرم افزایش یابد.

نتایج تحلیل حساسیت (جدول ۵) بر اساس سه سناریو تعریف شده نشان داد که ردپای کربن کل تمامی محصولات به شدت تحت تأثیر این ضریب قرار دارد. در سناریوی انتشار بالای پمپ‌های دیزلی (سناریوی دوم)، ردپای کربن کل گندم با ۱۲۱٪ افزایش به $CO_2\text{-}$ $۷۰۷۰\ eq\ ha^{-3}$ رسید. محصولات آب‌بر شامل گوجه‌فرنگی و پیاز به ترتیب با ۱۵۵ و ۱۵۷ درصد افزایش، بیشترین حساسیت را نشان دادند. با اعمال این تغییرات بومی، بخش «انرژی آب آبیاری» با پیشی گرفتن از کودهای شیمیایی، به تنهایی سهمی معادل ۶۴ تا ۶۹ درصد از کل ردپای کربن محصولات را به خود اختصاص داد. این یافته مأموریت‌های مدیریتی را از تمرکز صرف بر مدیریت نهاده‌های مغذی، به سمت ضرورت فوری برقی‌کردن چاه‌های کشاورزی و توسعه پمپ‌های خورشیدی سوق می‌دهد.

ب) حساسیت ردپای نیتروژن به پویایی تصعید و آبشویی در اقلیم خشک

به طور مشابه، ضرایب پیش‌فرض تصعید آمونیاک و آبشویی نیترات به دلیل شرایط خاص سیستان (دمای بسیار بالا و بادهای شدید ۱۲۰ روزه که ترمودینامیک آمونیاک را تشدید می‌کند و همچنین بافت سبک و ماسه‌ای خاک که پتانسیل آبشویی را بالا می‌برد) مورد بازنگری

قرار گرفت.

با اعمال سناریوی اقلیمی تعدیل‌شده (ε=۲۵ و σ =۴۰) مشخص شد که ردپای نیتروژن کل هکتاری در گندم ، گوجه‌فرنگی، پیاز و هندوانه به ترتیب۲۳، ۲۹، ۳۱ و ۲۸ درصد افزایش می‌یابد(جدول ۶). محصولات پیاز و هندوانه به دلیل ساختار کشت که نیازمند دورهای آبیاری متوالی و کوددهی سنگین در خاک‌های نفوذپذیر است، بیشترین واکنش را در تلفات نیتروژن نشان دادند. این امر لزوم بازنگری در روش‌های سنتی پخش کود و حرکت به سمت روش‌های تزریق عمقی یا کودآبیاری (Fertigation) را در مناطق خشک بادخیز اثبات می‌کند.

جدول ۵. تحلیل حساسیت ردپای کربن محصولات مورد مطالعه تحت سناریوهای مختلف ضریب انتشار آب آبیاری (کارایی پمپ‌های دیزلی) واحد تمامی مقادیر ردپای کربن در جدول: $kg\ CO_2\text{-}eq\ ha^{-1}$ می‌باشد

محصول	حجم آب مصرفی (M^3ha^{-1})	کل CF در سناریوی پایه (ضریب ۰/۱۷)	کل CF در سناریوی اول (ضریب ۰/۵۰) انتشار متوسط	کل CF در سناریوی دوم (ضریب ۰/۸۰) انتشار بالا	کل CF در سناریوی سوم (ضریب ۱/۱۰) انتشار بحرانی
گندم	۶۱۵۰	۳۱۹۵	۵۲۲۵	۷۰۷۰	۸۹۱۵
گوجه‌فرنگی	۱۲۲۰۰	۴۹۳۹	۸۹۶۳	۱۲۶۲۳	۱۶۲۸۳
پیاز	۱۰۴۰۰	۴۱۷۱	۷۶۰۳	۱۰۷۲۳	۱۳۸۴۳
هندوانه	۸۹۰۰	۴۵۱۰	۷۴۴۷	۱۰۱۱۷	۱۲۷۸۷

جدول ۶. تحلیل حساسیت ردپای نیتروژن محصولات مورد مطالعه بر اساس سناریوی تشدید شرایط اقلیمی منطقه (افزایش تصعید آمونیاک و آبشویی نیترات) واحد تمامی مقادیر ردپای نیتروژن در جدول: $kg\ N\text{-}eq\ ha^{-1}$ می‌باشد

محصول	کل NF در سناریوی پایه (ضرایب استاندارد IPCC)	کل NF در سناریوی بومی (شرایط اقلیمی تشدید شده)	میزان افزایش در سناریوی بومی نسبت به پایه
گندم	۱۵	۱۸/۴۵	+ ۲۳٪
گوجه‌فرنگی	۳۵/۹۲	۴۶/۳۴	+ ۲۹٪
پیاز	۴۴/۷۹	۵۸/۶۸	+ ۳۱٪
هندوانه	۴۹/۴۳	۶۳/۲۷	+ ۲۸٪

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

این مطالعه با بهره‌گیری از چارچوب ردپای نیتروژن و ردپای کربن، تصویری چندبعدی از پیامدهای زیست‌محیطی تولید چهار محصول زراعی اصلی در استان سیستان و بلوچستان ارائه داد و نشان داد که ارزیابی پایداری کشاورزی، به‌شدت وابسته به مقیاس تحلیل است. نتایج به‌وضوح نشان می‌دهد که اتکا به شاخص‌های تک‌بعدی، به‌ویژه در مقیاس واحد سطح، می‌تواند منجر به قضاوت‌های نادرست در خصوص کارایی زیست‌محیطی محصولات شود. محصولاتی که در نگاه سطح‌محور دارای ردپای بالاتری هستند، در مقیاس عملکرد یا اقتصادی می‌توانند عملکردی به‌مراتب کاراتر داشته باشند و بالعکس. این ناهمخوانی مقیاس‌ها بر ضرورت بازتعریف شاخص‌های تصمیم‌سازی در مدیریت کشاورزی مناطق خشک و نیمه‌خشک تأکید می‌کند.

از منظر ردپای نیتروژن، یافته‌ها نشان داد که ناکارآمدی اصلی نه صرفاً در میزان مصرف کود، بلکه در نسبت آن با عملکرد و ارزش اقتصادی محصول نهفته است. گندم، علی‌رغم ردپای نیتروژن کمتر در واحد سطح، در مقیاس تن محصول و به‌ویژه در مقیاس اقتصادی، بیشترین شدت آلودگی نیتروژنی را نشان داد. این مسئله بیانگر آن است که عملکرد پایین، مهم‌ترین عامل تشدید ردپای نیتروژن در سیستم‌های زراعی است و افزایش بهره‌وری نیتروژن (NUE) بدون بهبود عملکرد واقعی محصول، نمی‌تواند منجر به کاهش معنادار فشار زیست‌محیطی شود. بنابراین، تمرکز سیاست‌ها بر کاهش مطلق مصرف کود، بدون توجه به پاسخ عملکردی، ممکن است به کاهش امنیت غذایی و افزایش شدت آلودگی منجر شود.

در مورد ردپای کربن، نتایج نشان داد که مصرف انرژی و آب آبیاری نقش تعیین‌کننده‌ای در شکل‌دهی الگوی انتشار دارد. محصولات جالیزی به دلیل نیاز بالاتر به آبیاری و نهاده‌های انرژی‌بر، در مقیاس سطح دارای ردپای کربن بالاتری بودند، اما عملکرد بالای آن‌ها باعث

شد شدت انتشار در واحد محصول و واحد ارزش اقتصادی کاهش یابد. این یافته به‌طور ضمنی نشان می‌دهد که در شرایط اقلیمی استان سیستان و بلوچستان، بهره‌وری تولید می‌تواند اثرات منفی مصرف بالای نهاده‌ها را تا حدی خنثی کند. با این حال، تداوم چنین الگوهایی بدون مدیریت منابع آب و انرژی، می‌تواند ریسک‌های بلندمدت زیست‌محیطی و اقتصادی را تشدید کند.

بر این اساس، پیشنهاد می‌شود که راهبردهای کاهش ردپای زیست‌محیطی در منطقه، به‌جای تمرکز بر یک نهاده یا یک محصول خاص، بر بهینه‌سازی هم‌زمان عملکرد، مصرف نهاده و ارزش اقتصادی متمرکز شوند. توسعه سامانه‌های آبیاری کاراتر، بهبود زمان‌بندی و شکل مصرف کودهای نیتروژنه، و جایگزینی تدریجی نهاده‌های انرژی‌بر با گزینه‌های کم‌کربن، می‌تواند به کاهش هم‌زمان ردپای نیتروژن و کربن منجر شود. همچنین، استفاده از شاخص‌های ترکیبی مانند ردپا به ازای واحد درآمد، ابزار مؤثرتری برای اولویت‌بندی محصولات در برنامه‌ریزی الگوی کشت نسبت به شاخص‌های مرسوم سطح‌محور فراهم می‌کند.

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که سیاست‌گذاری کشاورزی در مناطق خشک نباید صرفاً بر افزایش تولید یا سطح زیرکشت متمرکز باشد، بلکه باید شدت انتشارهای زیست‌محیطی در واحد محصول و واحد ارزش اقتصادی را نیز در نظر گیرد. برخی محصولات ممکن است در مقیاس هکتاری فشار زیست‌محیطی پایین‌تری داشته باشند، اما به دلیل عملکرد کم، در مقیاس محصول‌محور ناکارآمد باشند. این موضوع اهمیت تغییر رویکرد از ارزیابی سطح‌محور به ارزیابی بهره‌وری‌محور را برجسته می‌کند. در چنین شرایطی، بهبود بهره‌وری آب، افزایش کارایی مصرف نیتروژن، توسعه سامانه‌های آبیاری کم‌مصرف و اصلاح الگوی کشت می‌توانند نقش کلیدی در کاهش هم‌زمان ردپای کربن و نیتروژن ایفا کنند.

با وجود ردپای زیست‌محیطی نسبتاً بالاتر برخی محصولات نظیر گندم در مقیاس محصول‌محور، تصمیم‌گیری درباره الگوی کشت در مناطق خشک باید علاوه بر شاخص‌های زیست‌محیطی، ملاحظات امنیت غذایی، اهمیت راهبردی محصولات و شرایط اجتماعی–اقتصادی منطقه را نیز در بر گیرد.

در نهایت، این مطالعه نشان می‌دهد که دستیابی به کشاورزی پایدار در مناطق خشک، مستلزم عبور از رویکردهای سنتی ارزیابی و پذیرش چارچوب‌های چندمقیاسی و اقتصادی–زیست‌محیطی است. ادغام هم‌زمان ردپای نیتروژن و کربن با شاخص‌های عملکرد و ارزش اقتصادی، می‌تواند مبنای علمی قدرتمندی برای تصمیم‌سازی در سطح مزرعه، برنامه‌ریزی منطقه‌ای و سیاست‌گذاری ملی فراهم کند. پیشنهاد می‌شود مطالعات آینده با لحاظ‌کردن تغییرات اقلیمی، نوسانات قیمت محصولات و سناریوهای مدیریتی، این چارچوب را گسترش داده و مسیرهای عملی کاهش فشار زیست‌محیطی بدون تضعیف امنیت غذایی را شناسایی کنند.

ملاحظات اخلاقی

حامی مالی

حمایت مالی و معنوی این پژوهش توسط دانشگاه ملایر، دانشکده کشاورزی، در قالب پژوهانه سال ۱۴۰۴ نویسنده مسئول تأمین شده است. نویسندگان مراتب سپاس و قدردانی خود را از دانشگاه ملایر به‌دلیل حمایت از اجرای این پژوهش اعلام می‌نمایند.

مشارکت نویسندگان

جمع‌آوری داده‌ها: حسین رضایی تهیه گزارش پژوهش: مجید دکامین؛ تحلیل داده‌ها: مجید دکامین، حسین رضایی، امین ترنجیان نویسندگان به طور مساوی در کلیهٔ مراحل طراحی و انجام پژوهش، گردآوری داده‌ها، تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، تهیه پیشنویس مقاله، بررسی و کنترل نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله مشارکت داشتند.

اعلامیه هوش مصنوعی مولد و فناوری‌های مبتنی بر هوش مصنوعی در فرایند نگارش

در طول آماده‌سازی این اثر، نویسندگان از چت جی پی تی به منظور گرامر و ویرایش متون انگلیسی استفاده کردند. پس از استفاده از این ابزار/خدمت، نویسنده گان مطالب را در صورت نیاز بررسی و ویرایش کرده و مسئولیت کامل محتوای نشریه را بر عهده می‌گیرند.

بیانیه دسترسی به داده‌ها

داده‌هایی پژوهش حاضر از طریق درخواست از نویسندگان قابل دسترسی است.

سپاسگزاری

مقاله بایستی تشکر و قدردانی داشته باشد. نمونه جملات:

از وزارت جهاد کشاورزی برای قرار دادن داده های تولید محصولات زراعی به صورت آنلاین که در اجرای پژوهش به کار رفته است سپاسگزاری می‌شود.
از داوران محترم به خاطر ارائه نظرهای ساختاری و علمی سپاسگزاری می‌شود.

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست. این پژوهش شامل مشارکت انسان‌ها، حیوانات، داده‌های بالینی یا هرگونه فعالیتی که مستلزم اخذ تأییدیه اخلاقی باشد، نبوده است. بنابراین، بر اساس دستورالعمل‌های اخلاق پژوهش در سطح نهادی و بین‌المللی، دریافت تأییدیه از کمیته اخلاق و اخذ کد اخلاق برای این پژوهش ضروری نبوده است.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

منابع

وزارت جهاد کشاورزی ایران (۱۳۹۱). آمارنامه کشاورزی سالانه. از http://www.maj.ir

REFERENCES

Amani, M., Najafabadi, M. O., Mirdamadi, S. M., & Torkashvand, A. M. (2025). Dynamic analysis of the water, food, and energy nexus in minab county: An integrated approach to sustainable water resource management in hormozgan province. Results in Engineering, 27, 106185.

Bai, F., Cai, Q., Zheng, X., Lei, Z., Wang, W., Liang, J., ... & Qi, J. (2025). An integrated framework for reducing construction carbon emissions using real-time monitoring and econometrics. Scientific Reports, 15(1), 34188.

Chen, R., Zhang, R., & Han, H. (2021). Where has carbon footprint research gone?. Ecological Indicators, 120, 106882.

Dekamin, M., Rezaei, H., & Nabavi-Pelesaraei, A. (2025). Balancing profit and planet: A comprehensive analysis of watermelon farming through material flow cost accounting (MFCA). Case Studies in Chemical and Environmental Engineering, 101293.

Dekamin, M., & Kheiralipour, K. (2023). Material and energy flow cost accounting (MEFCA) of grape production in Malayer city.

Dekamin, M., Toranjian, A., & Shafiei, M. (2025). Energy and economic analysis of potato production under furrow and sprinkler irrigation systems using material flow cost accounting. Cleaner Engineering and Technology, 101136.

Dekamin, M., Rezaei, H., & Toranjian, A. (2026). Assessment of the Carbon and Nitrogen Footprints for Wheat, Tomato, Onion, and Watermelon Cultivation in the Sistan and Baluchestan Region. Iranian Journal of Biosystem Engineering.

Denora, M., Candido, V., D'Antonio, P., Perniola, M., & Mehmeti, A. (2023). Precision nitrogen management in rainfed durum wheat cultivation: Exploring synergies and trade-offs via energy analysis, life cycle assessment, and monetization. Precision Agriculture, 24, 2566–2591.

Ding, Y., Li, Y., Zheng, H., Ma, Y., Huang, G., Li, Y., & Shen, Z. (2022). Mapping water, energy and carbon footprints along urban agglomeration supply chains. Earth's Future, 10(4), e2021EF002225.

Elhami, B., Raini, M. G. N., Taki, M., Marzban, A., & Heidarisoltanabadi, M. (2021). Analysis and comparison of energy-economic-environmental cycle in two cultivation methods (seeding and transplanting) for onion production (case study: central parts of Iran). Renewable Energy, 178, 875-890.

Gu, B., Zhang, X., Lam, S. K., Yu, Y., Van Grinsven, H. J., Zhang, S., ... & Chen, D. (2023). Cost-effective mitigation of nitrogen pollution from global croplands. Nature, 613(7942), 77-84.

Halpern, B. S., Frazier, M., Verstaen, J., Rayner, P. E., Clawson, G., Blanchard, J. L., et al. (2022). The environmental footprint of global food production. *Nature Sustainability*, *5*, 1027–1039.

Huang, W., Wu, F., Han, W., Li, Q., Han, Y., Wang, G., ... & Wang, Z. (2022). Carbon footprint of cotton production in China: Composition, spatiotemporal changes and driving factors. Science of the Total Environment, 821, 153407.

Leach, A. M., Galloway, J. N., Bleeker, A., Erisman, J. W., Kohn, R., & Kitzes, J. (2012). A nitrogen footprint

model to help consumers understand their role in nitrogen losses to the environment. Environmental Development, 1(1), 40-66.

Liang, D., Lu, H., Guan, Y., Feng, L., Chen, Y., & He, L. (2023). Further mitigating carbon footprint pressure in urban agglomeration by enhancing the spatial clustering. Journal of Environmental Management, 326, 116715.

Mohammadi, M., Pouryousef, M., & Farhang, N. (2023). Study on germination and seedling growth of various ecotypes of fennel (Foeniculum vulgare Mill.) under salinity stress. Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants, 34, 100481.

Qasim, W., Zhao, Y., Wan, L., Gettel, G. M., Lv, H., Lin, S., & Butterbach-Bahl, K. (2022). The potential importance of soil denitrification as a major N loss pathway in intensive greenhouse vegetable production systems. *Plant and Soil*, *471*, 157–174.

Qin, Y., Li, B., Niu, Z., Huang, W., & Wang, C. (2011). Stepwise decomposition and relative radiometric normalization for small footprint LiDAR waveform. Science China Earth Sciences, 54(4), 625-630.

Rees, W. (2018). Ecological footprint. In Companion to environmental studies (pp. 43-48). Routledge.

Reisinger, A., Ledgard, S. F., & Falconer, S. J. (2017). Sensitivity of the carbon footprint of New Zealand milk to greenhouse gas metrics. Ecological Indicators, 81, 74-82.

Shibata, H., Galloway, J. N., Leach, A. M., Cattaneo, L. R., Cattell Noll, L., Erisman, J. W., ... & Bleeker, A. (2017). Nitrogen footprints: Regional realities and options to reduce nitrogen loss to the environment. Ambio, 46(2), 129-142.

Van Fan, Y., Klemeš, J. J., Lee, C. T., & Perry, S. (2018). Anaerobic digestion of municipal solid waste: Energy and carbon emission footprint. Journal of environmental management, 223, 888-897.

Wang, X., Zhang, Y., Chen, S., Shao, L., Sun, H., & Liu, X. (2023). Assessment of greenhouse gases emissions, global warming potential and net ecosystem economic benefits from wheat field with reduced irrigation and nitrogen management in an arid region of China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *341*, 108197.

Wang, Z. B., Zhang, H. L., Lu, X. H., Wang, M., Chu, Q. Q., Wen, X. Y., & Chen, F. (2016). Lowering carbon footprint of winter wheat by improving management practices in North China Plain. Journal of Cleaner Production, 112, 149-157.

Wang, Z., Bui, Q., Zhang, B., & Pham, T. L. H. (2020). Biomass energy production and its impacts on the ecological footprint: an investigation of the G7 countries. Science of the Total Environment, 743, 140741.

Wiedmann, T., & Minx, J. (2008). A definition of 'carbon footprint'. Ecological economics research trends, 1(2008), 1-11.

Xu, J., Guan, Y., Oldfield, J., Guan, D., & Shan, Y. (2024). China carbon emission accounts 2020-2021. Applied Energy, 360, 122837.

Xu, Q., Hu, K., Yao, Z., & Zuo, Q. (2020). Evaluation of carbon, nitrogen footprint and primary energy demand under different rice production systems. Ecological Indicators, 117, 106634.

Xue, J. F., Pu, C., Liu, S. L., Zhao, X., Zhang, R., Chen, F., ... & Zhang, H. L. (2016). Carbon and nitrogen footprint of double rice production in Southern China. Ecological Indicators, 64, 249-257.

Yan, M., Cheng, K., Luo, T., Yan, Y., Pan, G., & Rees, R. M. (2015). Carbon footprint of grain crop production in China–based on farm survey data. Journal of Cleaner Production, 104, 130-138.

Yang, B., Zhang, T., Zhang, M., & Li, B. (2022). Reactive nitrogen releases and nitrogen footprint during intensive vegetable production affected by partial human manure substitution. *Environmental Science and Pollution Research*, *29*(13), 19572–19582.

Zhang, Y., Liu, X., Wang, J., Chen, S., & Sun, H. (2022). Exploring the environmental impact of crop production in China using a comprehensive footprint approach. *Science of the Total Environment*, *824*, 153898.

Zhou, J., Li, B., Xia, L., Fan, C., & Xiong, Z. (2019). Organic-substitute strategies reduced carbon and reactive nitrogen footprints and gained net ecosystem economic benefit for intensive vegetable production. Journal of Cleaner Production, 225, 984-994.

Ziaei, S. M., Mazloumzadeh, S. M., & Jabbary, M. (2015). A comparison of energy use and productivity of wheat and barley (case study). Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences, 14(1), 19-25.