

Analysis of Physical and Economic Water Productivity Indicators of Major Field Crops in the Dehgolan Plain, Kurdistan Province

Peyman Tahmasebi¹, Mahsa Ghasabi², Hamed Ghaderzadeh³, Bakhtiar Karimi⁴

¹ Ph. D student of Irrigation and Drainage, Water Sciences and Engineering Department, Faculty of Agriculture, University of Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran (Email: p.tahmasebi@agr.basu.ac.ir)

² PhD Scholar, Department of Agricultural Economics, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran. (Email: Mahsa.ghasabi@uok.ac.ir)

³ PhD Scholar, Department of Water Science and Engineering, Kurdistan University, Kurdistan University, Sanandaj, Iran. (Email: Hamedar2002@uok.ac.ir)

⁴ Associate Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Sanandaj, Sanandaj, Iran



10.22125/iwe.2026.582271.1922.

Received:

May 28, 2026

Accepted:

August 9, 2026

Available online:

September 7, 2026

Keywords:

Virtual water

Wheat Yield

Water productivity

Net profit

Potato

Abstract

Evaluating water productivity in agriculture has become increasingly critical due to the depletion of groundwater resources and intensifying pressure on available water supplies. Enhancing water productivity is essential for ensuring water and food security and for maintaining the long-term resilience of agricultural ecosystems. This study investigates and compares the physical and economic water productivity indicators of three major crops wheat Pishgam, potato Jelly and alfalfa in the Dehgolan Plain of Kurdistan Province. A total of 25 farms, covering 68 hectares, were randomly selected and categorized into wheat, potato, and alfalfa production systems. Farm area was measured using GPS devices, whereas irrigation water volume was quantified using an ultrasonic flow meter. Data on energy consumption (electricity and diesel), crop yield (measured through plot harvesting), and other agronomic inputs including seed, fertilizers, pesticides, and machinery were collected from farmers using structured questionnaires. The estimated yields at the end of the 2023–2024 cropping season were also cross-validated with actual farm-gate sales records. The results indicated that physical water productivity (CPD) for wheat, potato, and alfalfa was 1.34, 4.07, and 0.97 kg m⁻³, respectively. Economic water productivity based on gross production value (BPD) was 239.72, 1301.07, and 89.94 thousand IRR m⁻³, while economic water productivity based on net profit (NBPD) was 105.30, 1077.77, and 51.69 thousand IRR m⁻³, respectively. The virtual water (VW) values were calculated as 0.75, 0.25, and 1.03 m³ kg⁻¹ for wheat, potato, and alfalfa. Given these results, the continuation and reinforcement of wheat cultivation are recommended due to its strategic role in national and global food security and its potential to reduce reliance on imports. In contrast, the low water productivity and poor sustainability of alfalfa production suggest a gradual transition toward alternative crops with higher water-use efficiency and greater economic returns. Moreover, potato production supported by precision agriculture, optimized soil and water management, and secure profitability represents a viable and strategic option for sustainable agricultural development in the region.

Corresponding Author: Bakhtiar Karimi

Address: Associate Professor, Department of Water
Science and Engineering, Faculty of Agriculture,
University of Kurdistan, Kurdistan, Iran

Email: : bakhtiar.karimi@uok.ac.ir

1. Introduction

The continuous depletion of groundwater resources, coupled with climate change and escalating competition among water-consuming sectors, has significantly amplified the importance of water use efficiency in agriculture. In Iran, particularly in semi-arid plains such as the Dehgalan plain in Kurdistan province, the pressure on water resources is so severe that safeguarding water and food security necessitates decision-making grounded in water efficiency indicators. Evaluating and comparing water productivity across various crops is not only crucial for optimizing cropping patterns but also essential for ensuring the sustainability of agricultural ecosystems and managing vital water resources. Consequently, this research was undertaken with the objective of analyzing and comparing the physical and economic water productivity indices for three significant agricultural crops: Pishgam wheat, Jelly potato, and alfalfa.

2. Materials and Methods

This study was conducted during the 1403–1404 (2024–2025) crop year in the Dehgalan plain. A total of 25 farms, covering an aggregate area of 68 hectares, were randomly selected and categorized into three groups: wheat farms, potato farms, and alfalfa farms. A GPS device was utilized to determine the precise area of each farm. The volume of water consumed during the cropping period was measured using an ultrasonic flow meter. Data pertaining to production inputs, including energy consumption (electricity and diesel), seeds, chemical fertilizers, pesticides, and agricultural machinery, were collected from farmers through field questionnaires. Actual crop yields were assessed using the harvesting method and subsequently verified against actual sales data from the farms at the end of the growing season. Water productivity indices, including physical productivity (CPD), gross production economic productivity (BPD), net benefit economic productivity (NBPD), and virtual water (VW), were calculated according to standard formulas, and a comparative analysis was performed among the crops.

3. Results

The analysis revealed that the physical water productivity index (CPD) for wheat, potato, and alfalfa were 1.34 kg/m³, 4.07 kg/m³, and 0.97 kg/m³, respectively. This indicates a notably higher performance of potatoes in terms of production per unit of water consumed. The gross production economic productivity index (BPD) was estimated at 239,720 IRR/m³, 1,301,070 IRR/m³, and 89,940 IRR/m³ for wheat, potato, and alfalfa, respectively, underscoring the superior economic value of potato production compared to the other two crops. Furthermore, the net benefit economic productivity index (NBPD) was calculated as 105,300 IRR/m³, 1,077,770 IRR/m³, and 51,690 IRR/m³ for these three crops, again demonstrating the economic advantage of potatoes. The virtual water (VW) index was also found to be 0.75 m³/kg for wheat, 0.25 m³/kg for potato, and 1.03 m³/kg for alfalfa, with the lowest value for potatoes signifying a lower water requirement per unit of product.

4. Conclusion

This research indicated that the Jelly potato variety, due to its high physical and economic productivity, presents a sustainable and profitable option for agricultural development in the Dehgalan plain. The Pishgam wheat variety, as a strategic crop, should be maintained, with efforts focused on enhancing its water use efficiency and reducing reliance on wheat imports. Alfalfa, given its lower efficiency and significant pressure on water resources, should be gradually phased out and replaced with economically and hydrologically suitable alternative crops.

5. Six important references

- 1) Tahmasebi, P., Dalvand, F., Hosseini, S. A., Karimi, B. and Ghadershenas, H. (2025). A Comparative Analysis of Energy Efficiency in Two Sprinkler Irrigation Systems for Wheat Cultivation (Case Study: Dehgolan Plains, Kurdistan). *Water and Soil*, (), - doi: 10.22067/jsw.2025.90134.1439
- 2) Niazmand, R., Moghadamnia, A., Tahmasebi, P., Nikmehr, S., & maroufpoor, E. (2023). Productivity of water and energy use of potato in sprinkler irrigation systems (Case study: Dehgolan Plain, Kurdistan Province). *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 3(4), 116-137. doi: 10.22126/atwe.2024.10298.1106<https://doi.org/10.22126/atwe.2024.10298.1106>
- 3) Kitani, O., Jungbluth, T., Peart, R. M., & Ramdani, A. (1999). CIGR handbook of agricultural engineering. Energy and biomass engineering, 5, 330.
- 4) Zhou, Q., Zhang, Y. and Wu, F., 2021., Evaluation of the most proper management scale on water use efficiency and water productivity: A case study of the Heihe River Basin, China. *Agricultural Water Management*, 246, pp. 106671.
- 5) Noori, H., Ahmadpari, H., Mohamadi, E., Mokhizadeh, V. and Hosseinbor, K., 2020., A foucauldian analysis of" virtual water" concept in terms of sustainable agriculture and food security. In 4th International Conference on Innovative Technologies in Science, Engineering and Technology, Istanbul, Turkey.
- 6) Heydari, N. and Taran, F., 2025. Effect of Climate Change on Wheat Yield and Water Productivity in Iran and the World. *Iranica Journal of Energy & Environment*, 16(2), pp. 253-269.

تحلیل شاخص‌های بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی محصولات عمده زراعی دشت دهگلان استان کردستان

پیمان طهماسبی^۱، مهسا قصابی^۲، حامد قادرزاده^۳، بختیار کریمی^{۴*}

تاریخ ارسال: ۱۴۰۵/۰۲/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۱۸

مقاله پژوهشی

چکیده

بررسی بهره‌وری آب در بخش کشاورزی، با توجه به کاهش منابع آب زیرزمینی و افزایش فشار بر منابع آبی، از اهمیت استراتژیک بالایی برخوردار است و نقش مهمی در تأمین امنیت آبی، غذایی و پایداری اکوسیستم‌های کشاورزی دارد. هدف این پژوهش، تحلیل و مقایسه شاخص‌های بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی سه محصول عمده کشاورزی شامل گندم رقم پیشگام، سیب‌زمینی رقم جیلی و یونجه در دشت دهگلان استان کردستان است. در این مطالعه، ۲۵ مزرعه به مجموع مساحت ۶۸ هکتار، به‌صورت تصادفی انتخاب و در سه گروه مزارع گندم، مزارع سیب‌زمینی و مزارع یونجه طبقه‌بندی شدند. مساحت مزارع با استفاده از دستگاه GPS اندازه‌گیری شد و حجم آب مصرفی به کمک دبی‌سنج اولتراسونیک تعیین گردید. همچنین اطلاعات مربوط به مصرف انرژی (برق و گازوئیل)، عملکرد محصول با روش کیل‌گیری، و سایر داده‌های کشاورزی شامل بذر، کود، سموم و ماشین‌آلات از طریق پرسشنامه از کشاورزان جمع‌آوری شد. همچنین، در پایان فصل زراعی ۱۴۰۴-۱۴۰۳، عملکرد محاسبه‌شده با داده‌های واقعی فروش مزرعه تطبیق داده شد. نتایج حاصل از تحلیل کارایی آب در مزارع گندم، سیب‌زمینی و یونجه، به‌ترتیب، نشان‌دهنده مقادیر ۱/۳۴، ۴/۰۷ و ۰/۹۷ کیلوگرم در هکتار برای شاخص بهره‌وری فیزیکی آب (CPD)، ۲۳۹/۷۲، ۱۳۰۱/۰۷ و ۸۹/۹۴ هزار ریال در مترمکعب برای شاخص بهره‌وری اقتصادی مبتنی بر ارزش ناخالص تولید (BPD)، ۱۰۵/۳۰، ۱۰۷۷/۷۷ و ۵۱/۶۹ هزار ریال در مترمکعب برای شاخص بهره‌وری اقتصادی مبتنی بر سود خالص (NBPD)، ۰/۷۵، ۰/۲۵ و ۱/۰۳ مترمکعب در کیلوگرم برای شاخص آب مجاز (VW) بود. با توجه به نتایج حاصل، پیشنهاد می‌گردد که کشت گندم به‌عنوان محصول استراتژیک در چارچوب امنیت غذایی ملی و جهانی حفظ و تقویت گردد تا وابستگی به واردات کاهش یابد؛ کشت یونجه به دلیل شاخص بهره‌وری آبی بسیار پایین و عدم پایداری منابع آب، به‌صورت تدریجی با محصولات جایگزین با کارایی آبی و ارزش اقتصادی بالاتر جایگزین شود؛ و صادرات سیب‌زمینی با بهره‌گیری از کشاورزی دقیق، مدیریت بهینه منابع آب و خاک، و تضمین سودآوری اقتصادی، به‌عنوان گزینه‌ای پایدار، استراتژیک در چارچوب توسعه کشاورزی پایدار معرفی گردد.

واژه‌های کلیدی: آب مجازی، ارزش ناخالص تولید، بهره‌وری آب، سیب‌زمینی، سود خالص، گندم، یونجه

^۱ دانشجوی دکتری گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان، ایران. ایمیل: peymantahmasebi99@gmail.com

^۲ دانشجوی دکتری گروه اقتصاد کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران. ایمیل: Mahsa.ghasabi@uok.ac.ir

^۳ دانشیار گروه اقتصاد کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران. ایمیل: Hamedar2002@uok.ac.ir

^۴ نویسنده مسئول دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران. ایمیل: bakhtiar.karimi@uok.ac.ir

مقدمه

آب به عنوان بنیادی‌ترین نهاده تولید در بخش کشاورزی، نقشی انکارناپذیر در تأمین امنیت غذایی، پایداری اکوسیستم‌ها و توسعه اقتصادی-اجتماعی مناطق مختلف جهان ایفا می‌کند (طهماسبی، ۱۴۰۳). در شرایط کنونی، محدودیت منابع آب شیرین، افزایش جمعیت، رشد تقاضا برای محصولات کشاورزی و تشدید پیامدهای تغییر اقلیم، ضرورت توجه به مدیریت کارآمد و بهره‌ور منابع آب را بیش‌ازپیش آشکار ساخته است (Biswas et al., 2025). بخش کشاورزی به دلیل مصرف بیش از ۷۰ درصد منابع آب تجدیدپذیر، اصلی‌ترین مصرف‌کننده این منبع مهم به‌شمار می‌رود و هرگونه ناکارآمدی در این بخش، پیامدهای گسترده‌ای بر سایر بخش‌ها و بر پایداری منابع طبیعی خواهد داشت (طهماسبی و گل محمدی قانع، ۱۴۰۴). از این‌رو، افزایش بهره‌وری آب به عنوان راهبردی کلیدی برای مقابله با بحران آب، کاهش فشار بر منابع محدود و حفظ سطح تولید محصولات کشاورزی مطرح می‌شود. بهره‌وری آب نه تنها به معنای کاهش مصرف آب است، بلکه به مفهوم تولید بیش‌تر یا ایجاد ارزش اقتصادی بالاتر با استفاده از مقدار معینی آب مصرفی می‌باشد (Kijne et al., 2003). در این چارچوب، توجه هم‌زمان به ابعاد فیزیکی و اقتصادی بهره‌وری آب، می‌تواند نقش مؤثری در بهبود کارایی سامانه‌های تولید کشاورزی و افزایش رفاه بهره‌برداران داشته باشد. همچنین تداوم تولید کشاورزی و پایداری معیشت در مناطق کم‌آب تنها در صورتی امکان‌پذیر است که بهبود بهره‌وری مصرف آب در اولویت قرار گیرد و پژوهش و توسعه در حوضه مدیریت منابع آب تقویت شود (Cai et al., 2013). بر این اساس، بهره‌وری آب در کشاورزی شاخصی کلیدی برای سنجش میزان محصول یا منافع حاصل از هر واحد آب مصرف‌شده است و معمولاً در دو بعد بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی مورد بررسی قرار می‌گیرد (Kledzik et al., 2017). علاوه بر اهمیت

بررسی شاخص‌های بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی آب در محصولات کشاورزی، مفهوم آب مجازی نیز یکی از موضوعات کلیدی در مدیریت منابع آب به‌شمار می‌رود و به‌طور مستقیم با بهره‌وری آب محصول مرتبط است (Mohamadi et al., 2020).

بهره‌وری فیزیکی آب معمولاً به‌صورت نسبت عملکرد محصول (کیلوگرم یا تن) به حجم آب مصرفی (مترمکعب یا لیتر) تعریف می‌شود و بیان‌گر کارایی فنی استفاده از آب در فرآیند تولید است (Molden et al., 1998; Kijne et al., 2003). این شاخص نشان می‌دهد که یک سامانه زراعی تا چه اندازه قادر است از نهاده آب برای تولید محصول استفاده کند و تحت تأثیر عوامل متعددی نظیر نوع و رقم محصول، شرایط اقلیمی، کیفیت خاک، روش آبیاری و مدیریت مزرعه قرار دارد. در مقابل، بهره‌وری اقتصادی آب با در نظر گرفتن ارزش پولی محصول تولیدی، دیدگاهی جامع‌تر نسبت به کارایی مصرف آب ارائه می‌دهد. این شاخص معمولاً بر اساس سود ناخالص یا سود خالص حاصل از مصرف واحد حجم آب محاسبه می‌شود و امکان ارزیابی اقتصادی الگوهای مختلف کشت را فراهم می‌سازد (Kumar and Van Dam., 2013). سود ناخالص بیان‌گر تفاوت بین ارزش کل تولید و هزینه‌های متغیر است، در حالی که سود خالص با کسر کلیه هزینه‌های تولید، تصویری دقیق‌تر از بازده اقتصادی فعالیت زراعی ارائه می‌دهد. بنابراین، تحلیل بهره‌وری اقتصادی آب بر مبنای سود ناخالص و سود خالص، می‌تواند مبنایی علمی برای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی و سیاست‌گذاری در بخش کشاورزی فراهم آورد. آب مجازی به مقدار کل آب مصرفی یک کالا یا فرآورده کشاورزی در طول فرآیند تولید اطلاق می‌شود تا محصول به مرحله تکامل برسد و شامل جمع کل آب مصرف‌شده در تمامی مراحل زنجیره تولید از آغاز تا پایان است (Noori et al., 2020). میزان آب مجازی مورد نیاز برای تولید هر محصول با توجه به شرایط اقلیمی، فرهنگی، مدیریتی

این دشت به دلیل برخورداری از اراضی حاصلخیز، سابقه طولانی در تولید محصولات زراعی و نقش قابل توجه در تأمین نیازهای غذایی منطقه، جایگاه ویژه‌ای در بخش کشاورزی استان دارد (طهماسبی و همکاران، ۱۴۰۳). با این حال، در سال‌های اخیر، کاهش بارندگی، افزایش برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی و افت سطح سفره‌ها، پایداری تولید کشاورزی در این منطقه را با تهدید مواجه ساخته است (طهماسبی و زارع ابیانه، ۱۴۰۴). استمرار این روند می‌تواند منجر به کاهش عملکرد محصولات، افزایش هزینه‌های تولید و در نهایت، تضعیف معیشت کشاورزان شود (قصابی و همکاران، ۱۴۰۳). در چنین شرایطی، بررسی و ارتقای بهره‌وری آب، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین راهکارهای مدیریت منابع آب در دشت دهگلان، ضرورتی اجتناب‌ناپذیر به‌شمار می‌رود.

گندم (*Triticum aestivum* L.)، یونجه (*Medicago sativa* L.) و سیب‌زمینی (*Solanum tuberosum* L.) به‌عنوان محصولات کلیدی در نظام کشاورزی ایران در نظام کشاورزی دشت دهگلان، از جایگاه ویژه‌ای برخوردارند. گندم محصولی استراتژیک با سهم قابل توجه در تأمین کالری جهانی است و نوسان تولید آن پیامدهای اقتصادی و اجتماعی گسترده دارد. این محصول در بیش از ۲۰۰ میلیون هکتار جهان کشت می‌شود و بیش از ۲۱ درصد انرژی غذایی جمعیت دنیا را تأمین می‌کند. در ایران نیز با توجه به نقش کلیدی در خودکفایی غذایی، بهبود بهره‌وری نهاده‌ها، به‌ویژه آب، اهمیت ویژه‌ای دارد (Heydari and Taran., 2025). یونجه مهم‌ترین گیاه علوفه‌ای کشور است و نقش کلیدی در تأمین نهاده‌های دامی و کاهش هزینه‌های تولید دام دارد. این محصول با سطح زیرکشت حدود ۶۴۰ هزار هکتار و تولید سالانه ۵/۸ میلیون تن، سهم قابل توجهی از نباتات علوفه‌ای کشور را به خود اختصاص داده است (قادرپور و همکاران، ۱۳۹۶). با توجه به نیاز آبی بالا و دوره بهره‌برداری چندساله، ارزیابی بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی آب در کشت یونجه برای پایداری منابع آب و سودآوری

و برنامه‌ریزی منطقه‌ای متفاوت است و همین تفاوت موجب می‌شود که برآورد دقیق آب مجازی در هر منطقه به‌عنوان یک ضرورت علمی در مطالعات بهره‌وری آب مطرح شود (باغبانین و همکاران، ۱۳۹۹). اهمیت تحلیل هم‌زمان بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی آب زمانی آشکارتر می‌شود که بدانیم محصولاتی با عملکرد فیزیکی بالا لزوماً از نظر اقتصادی نیز کارتر نیستند. در بسیاری از موارد، محصولاتی که آب بیش‌تری مصرف می‌کنند، اگرچه ممکن است عملکرد بالایی داشته باشند، اما به دلیل هزینه‌های بالای تولید یا قیمت پایین بازار، از سودآوری کم‌تری برخوردارند. در مقابل، برخی محصولات با عملکرد فیزیکی متوسط، به دلیل ارزش اقتصادی بالاتر، بهره‌وری اقتصادی آب بیش‌تری ایجاد می‌کنند. از این‌رو، اتکای صرف به شاخص عملکرد یا بهره‌وری فیزیکی، می‌تواند منجر به تخصیص غیربهینه منابع آب شود. ترکیب شاخص‌های فیزیکی و اقتصادی، امکان شناسایی محصولات برتر از نظر کارایی مصرف آب را فراهم کرده و زمینه اصلاح الگوی کشت در شرایط محدودیت منابع آبی را مهیا می‌سازد. این رویکرد به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، که با بحران شدید آب مواجه‌اند، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (Hatfield and Dold, 2019; de Jong et al., 2021; Zhou et al., 2021؛ لرمحمدحسینی و همکاران، ۱۴۰۳؛ قدمی فیروزآبادی و همکاران، ۱۴۰۲).

سفره‌های آب زیرزمینی در بسیاری از کشورها از جمله ایران، به‌عنوان یکی از منابع اصلی تأمین آب آبیاری مزارع کشاورزی شناخته می‌شوند (السادات هدایتی و همکاران، ۱۴۰۴). کمبود منابع آب سطحی همراه با عواملی همچون افزایش جمعیت، توسعه شهرنشینی و گسترش مزارع شیلات، منجر به بهره‌برداری بیش‌از حد از این منابع آبی، به‌ویژه در استان کردستان، شده است. دشت دهگلان در استان کردستان، یکی از مناطق کلیدی کشاورزی غرب ایران است که اقتصاد محلی آن به شدت به فعالیت‌های زراعی وابسته است و بیش از ۹۶۵ حلقه چاه مجاز و غیرمجاز در آن فعال می‌باشند (طهماسبی و همکاران، ۱۴۰۴).

۰/۳، و ۲/۸۵ کیلوگرم در مترمکعب گزارش شد. همچنین، حداکثر بهره‌وری اقتصادی آب شاخص NBPD برای گندم، جو، ذرت دانه‌ای، کنجد، کلزا و هندوانه به ترتیب برابر ۱۰۷۳۳/۶، ۴۰۹۴۱/۶، ۸۱۷۲/۰۷، ۴۵۷۱۴/۲، ۱۲۰۱۰/۸۰ و ۵۵۰۰۰ ریال در مترمکعب و حداقل آن‌ها به ترتیب برابر ۷۳۲/۷۰، ۲۷۷۹۷/۴۰، ۵۳۹۶/۶۰، ۴۰۹۸۳/۶۰، ۸۶۷۲/۸۰ و ۲۸۷۵۱/۳۹ ریال در مترمکعب گزارش شده است.

اسدی و همکاران (۱۴۰۰)، به بررسی بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی آب آبیاری محصولات گندم، جو، کلزا و ذرت علوفه‌ای در مزارع تحقیقاتی استان البرز طی سال‌های زراعی ۱۳۹۱-۱۳۹۹ پرداختند. نتایج نشان داد که میانگین شاخص CPD برای گندم، جو، کلزا و ذرت علوفه‌ای آبی به ترتیب برابر ۰/۵۶، ۰/۵۱، ۰/۳۳ و ۲/۸ کیلوگرم در مترمکعب بوده است. همچنین، میانگین بهره‌وری اقتصادی براساس شاخص BPD برای این محصولات به ترتیب ۸۹۹۶/۸، ۱۰۴۳۱/۸، ۱۸۷۵۰ و ۵۹۱۵/۹ ریال در مترمکعب و شاخص NBPD به ترتیب ۱۱۹۱/۱، ۱۰۷۵۰، ۷۲۹۱/۷ و ۱۳۱۲/۲ ریال در مترمکعب آب گزارش شد. یافته‌ها بیانگر آن است که ذرت علوفه‌ای بالاترین بهره‌وری فیزیکی آب و جو بالاترین بهره‌وری اقتصادی آب را در بین محصولات مورد بررسی به خود اختصاص داده‌اند که این امر اهمیت توجه هم‌زمان به شاخص‌های فیزیکی و اقتصادی آب در برنامه‌ریزی الگوی کشت را نشان می‌دهد.

توکلی و همکاران (۱۴۰۰) بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی آب محصولات زراعی و باغی استان سمنان را تحت سامانه‌های آبیاری سطحی ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که بر اساس شاخص BPD، محصول پسته با ۴۸۶۹ تومان در مترمکعب بالاترین مقدار بهره‌وری اقتصادی آب را داشته و انگور با ۳۰۲۲ تومان در مترمکعب در رتبه بعدی قرار گرفته است، در حالی که

اقتصادی ضروری است. سیب‌زمینی نیز به‌عنوان یکی از محصولات با ارزش اقتصادی بالا، نقش قابل توجهی در افزایش درآمد کشاورزان و ایجاد اشتغال در مناطق روستایی دارد. این محصول با تولید سالانه بیش از ۳۷۰ میلیون تن، پس از گندم و برنج، سومین محصول زراعی جهان از نظر حجم تولید محسوب می‌شود (FAO², 2021). عملکرد بالای سیب‌زمینی در واحد سطح و جایگاه آن در سبد غذایی خانوارها، موجب گسترش کشت این محصول در بسیاری از مناطق کشور شده است (طهماسبی و همکاران، ۱۴۰۴). با این حال، نیاز آبی نسبتاً زیاد و حساسیت بالای سیب‌زمینی به مدیریت آبیاری، اهمیت بررسی بهره‌وری فیزیکی آب و پیامدهای آن بر کیفیت خاک و مصرف نهاده‌ها را دوچندان می‌کند (Kowalczyk, 2019). تفاوت گندم، یونجه و سیب‌زمینی از نظر مصرف آب، عملکرد فیزیکی و ارزش اقتصادی، ضرورت تحلیل هم‌زمان بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی آب را برجسته می‌کند. چنین تحلیلی امکان بهینه‌سازی تخصیص منابع آب و ارائه مبنای علمی برای تصمیم‌گیری‌های سیاستی، افزایش سودآوری کشاورزان و ارتقای پایداری کشاورزی را فراهم می‌آورد.

طی سال‌های اخیر، پژوهش‌های متعددی با هدف برآورد محتوای آب مجازی و تحلیل شاخص‌های بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی آب در محصولات زراعی انجام شده است. به‌عنوان مثال:

میرزایی و همکاران (۲۰۲۰) به بررسی بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی آب محصولات زراعی در شهرستان دهلران طی سال‌های زراعی ۱۳۹۱-۱۳۹۶ پرداختند. نتایج نشان داد که حداکثر میزان بهره‌وری فیزیکی آب شاخص CPD برای محصولات گندم، جو، ذرت دانه‌ای، کنجد، کلزا و هندوانه به ترتیب برابر ۰/۸۷، ۲/۴، ۰/۷۶، ۰/۲۶، ۰/۴۲ و ۵/۵ کیلوگرم در مترمکعب بوده و حداقل آن‌ها به ترتیب برابر ۰/۰۵، ۱/۶۳، ۰/۶۵، ۰/۲۳،

² Food and Agriculture Organization of the United Nations.



کمترین مقادیر BPD به محصولات جو، یونجه و گندم به ترتیب برابر ۳۷۹، ۳۹۹ و ۴۵۷ تومان در مترمکعب اختصاص یافت. همچنین، مقایسه شاخص NBPD برای ذرت علوفه‌ای نشان داد که کاربرد آبیاری قطره‌ای نواری (تیپ) موجب افزایش ۲/۱۴ برابری NBPD نسبت به آبیاری سطحی شده است، در حالی که شاخص‌های CPD و NBPD برای گندم و جو حتی با آبیاری تیپ بهبود معناداری نداشته‌اند.

زارعی قورخودی و همکاران (۱۴۰۱)، بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی آب را در اراضی تحت کشت مرکبات و شالیزاری استان مازندران که به روش‌های نوین آبیاری (قطره‌ای و کم‌فشار) آبیاری می‌شدند، بررسی کردند. نتایج نشان داد که میانگین شاخص CPD در اراضی مرکبات و شالیزاری به ترتیب برابر ۵/۸ و ۰/۷۶ کیلوگرم در مترمکعب بوده است. همچنین، میانگین شاخص BPD برای این اراضی به ترتیب ۲۶۱ و ۱۷۵ هزار ریال در مترمکعب و میانگین شاخص NBPD به ترتیب ۲۰۹ و ۱۲۷ هزار ریال در مترمکعب آب گزارش شد. به‌طور کلی، نتایج براساس تمامی شاخص‌های بهره‌وری نشان داد که کشت مرکبات، چه از لحاظ عملکرد محصول و چه از لحاظ هزینه اجرایی، دارای برتری نسبی نسبت به کشت شالیزاری است. علاوه بر این، تحلیل میزان آب مجازی محصولات در دشت‌های مورد مطالعه نشان داد که مقدار آب مصرف‌شده برای تولید محصولات شالیزاری، به‌ویژه در مرحله آماده‌سازی و رشد، بیش‌تر از میزان آب مصرفی محصولات مرکبات بود.

Bonou-Zin et al. (2019) با محاسبه شاخص‌های مصرف انرژی، انرژی مخصوص و بهره‌وری انرژی گندم در استان پنجاب هند به ترتیب ۱/۴ و ۹/۲۷ مگاژول در کیلوگرم و ۰/۱۰ کیلوگرم در مگاژول گزارش کردند.

علیخانی‌محور و همکاران (۱۴۰۳)، اثر روش‌های مختلف کم‌آبیاری شامل آبیاری کامل، کم‌آبیاری تنظیم‌شده و آبیاری ناقص ریشه را در سطوح ۷۵ و ۵۵ درصد بر بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی آب آبیاری گیاه

آفتاب‌گردان بررسی کردند. بر اساس شاخص CPD، بیش‌ترین بهره‌وری فیزیکی آب مربوط به تیمار آبیاری ناقص ریشه در سطح ۷۵ درصد بود که مقدار آن ۱/۳ کیلوگرم در مترمکعب گزارش شد. همچنین، بر اساس شاخص BPD، بیش‌ترین بهره‌وری اقتصادی آب آبیاری بر عملکرد دانه مربوط به تیمار آبیاری ناقص ریشه در سطح ۷۵ درصدتعلق داشت و مقدار آن ۴۱۴/۶ هزار ریال در مترمکعب بود. نتایج نشان داد که تیمار آبیاری ناقص ریشه در سطح ۷۵ درصد، ضمن صرفه‌جویی در مصرف آب، موجب افزایش همزمان CPD و BPD شده و دارای مزیت نسبی نسبت به سایر تیمارها است.

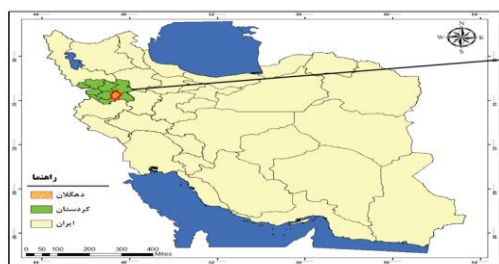
اسلامی و همکاران (۱۴۰۳)، نقش اصلاح الگوی کشت را در ارتقای بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی آب در دشت قادراآباد- مادرسلیمان استان فارس بررسی کردند. نتایج این مطالعه نشان داد که اجرای الگوی کشت بهینه سبب صرفه‌جویی ۲۶ درصدی مصرف آب نسبت به الگوی فعلی شد. شاخص CPD و NBPD کل دشت به ترتیب از ۲/۵۶ به ۲/۸۴ کیلوگرم در مترمکعب و از ۵۹۶۰۷ به ۸۳۰۸۶ ریال در مترمکعب ارتقا یافت. این نتایج نشان می‌دهد که تمرکز بر اصلاح الگوی کشت و افزایش بهره‌وری آب می‌تواند راهبردی مؤثر برای همافزایی بین دینفعان حوضه آب و مدیریت پایدار منابع آب در بخش کشاورزی باشد.

Mubarak et al. (2025)، مطالعه‌ای بر روی کشت برنج نشاء مستقیم و برنج نشاء شده تحت سه روش آبیاری شامل آبیاری غرقابی سنتی، اشباع و متناوب‌تر- خشک نشان دادند که برنج نشاء مستقیم عملکرد بهتری دارد. نتایج این مطالعه حاکی از آن بود که بهره‌وری آب در برنج نشاء مستقیم بین ۱۱ تا ۲۵ درصد بالاتر بود و نشان‌دهنده کارایی بیش‌تر آن در مصرف آب است. همچنین، تحلیل اقتصادی نیز نشان داد که برنج نشاء مستقیم بازده اقتصادی بالاتری دارد و سود به ازای هر واحد سرمایه‌گذاری در آن برابر ۲/۲ بود، در حالی که این مقدار برای برنج نشاء شده ۱/۴۸ بود.

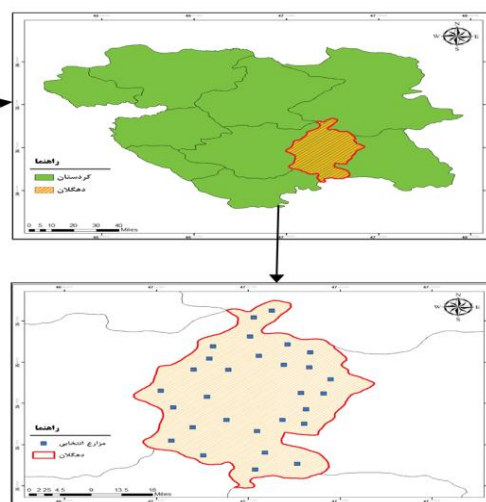
مواد و روش‌ها

محدوده منطقه مطالعاتی

شهرستان دهگلان با مساحت ۱۷۵۰ کیلومتر مربع، یکی از دشت‌های حاصل‌خیز استان کردستان به‌شمار می‌رود؛ که نقش مهمی در رشد اقتصادی و کشاورزی استان دارد. این دشت در ۴۵ کیلومتری شرق شهر سنندج واقع شده و به عنوان قطب کشاورزی مکانیزه غرب کشور محسوب می‌شود. از نظر جغرافیایی، دشت



هدف اصلی این پژوهش، تحلیل جامع آب مجازی و بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی آب در تولید محصولات عمده زراعی دشت دهگلان استان کردستان با تمرکز بر سه محصول غالب و عمده (گندم، سیب‌زمینی و یونجه) منطقه است. در این راستا، تلاش می‌شود با محاسبه شاخص‌های عملکرد، بهره‌وری فیزیکی آب، بهره‌وری اقتصادی آب بر مبنای سود ناخالص و سود خالص، وضعیت فعلی مصرف آب در تولید این محصولات مورد ارزیابی قرار گیرد. همچنین، مقایسه این شاخص‌ها میان



شکل (۱): موقعیت مکانی استان کردستان، دشت دهگلان و مزرعه‌های مورد مطالعه در دشت دهگلان

دهگلان در عرض جغرافیایی ۳۵ تا ۳۵/۵ درجه شمالی و طول جغرافیایی ۴۷/۷ تا ۴۷/۲ درجه شرقی واقع شده است. متوسط بارش سالانه این شهرستان بین ۳۵۲ تا ۳۹۶ میلی‌متر است و ارتفاع آن از سطح دریا ۱۸۷۶ متر است (نیازمند و همکاران، ۱۴۰۲). توپوگرافی دشت دهگلان ملایم است و دامنه تغییرات ارتفاع آن ۳۱۹ متر است. حداکثر ارتفاع این دشت ۲۰۵۰ متر و حداقل ارتفاع آن ۱۷۳۱ متر است. در این دشت، حدود ۱۹ هزار هکتار زمین زیر کشت محصولات زراعی است. گندم، سیب‌زمینی و یونجه سه محصول عمده تولیدی مزارع دشت‌های دهگلان هستند (طهماسبی و همکاران، ۱۴۰۳). نقشه موقعیت مکانی و جغرافیایی استان کردستان، دشت دهگلان و مزارع منتخب در شکل (۱) نشان داده شده است

محصولات مختلف، امکان شناسایی الگوی کشت بهینه و ارائه پیشنهادهایی برای بهبود مدیریت منابع آب و افزایش سودآوری فعالیت‌های زراعی را فراهم می‌سازد. نتایج این پژوهش می‌تواند به‌عنوان ابزاری کاربردی برای سیاست‌گذاران، برنامه‌ریزان بخش کشاورزی و کشاورزان منطقه مورد استفاده قرار گیرد و در نهایت، به تحقق اهداف توسعه پایدار کشاورزی و حفاظت از منابع آب در دشت دهگلان کمک نماید.

نحوه جمع آوری داده‌ها

در دشت دهگلان، ۲۵ مزرعه به مجموع مساحت ۶۸ هکتار به‌طور تصادفی و پراکنده، از بین مزارع کشاورزان انتخاب گردید. مزارع تحت کشت سه محصول عمده گندم آبی (رقم پیشگام)، سیب‌زمینی (رقم جیلی) و یونجه در سال زراعی ۱۴۰۳-۱۴۰۴ که همه مزارع تحت پوشش سامانه آبیاری بارانی، کلاسیک با آبیاش‌های متحرک قرار داشتند. این پژوهش بر پایه داده‌های میدانی یک سال زراعی (۱۴۰۳-۱۴۰۴) انجام شد. انتخاب یک سال زراعی با هدف مقایسه شاخص‌های بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی آب بین محصولات مختلف تحت شرایط اقلیمی، مدیریتی و اقتصادی یکسان صورت گرفت تا اثر تغییرات بین‌سالی ناشی از نوسانات اقلیمی، بارندگی و قیمت بازار بر نتایج مقایسه‌ای به حداقل برسد. علاوه بر ملاحظات ذکر شده، همکاری کشاورز از مسایل مهمی است که لازم بود، مورد توجه قرار گیرد. منظور از همکاری، مشارکت کامل کشاورزان در ارائه اطلاعات مربوط به عملیات زراعی، مدیریت آبیاری، مصرف نهاده‌ها و فراهم نمودن امکان بازدیدهای میدانی و بررسی اطلاعات بود. به‌منظور افزایش قابلیت اعتماد داده‌ها، اطلاعات ارائه‌شده توسط کشاورزان در طول بازدیدهای میدانی با شواهد موجود و وضعیت واقعی مزارع تطبیق داده شد و در موارد دارای ابهام، اطلاعات از طریق مصاحبه مجدد و بررسی متقابل اصلاح یا حذف گردید. منبع آب آبیاری مزارع مورد مطالعه، آبخوان ممنوعه دشت دهگلان است که کشاورزان برای بهره‌برداری از آن، از موتورپمپ‌های چاه‌های عمیق استفاده می‌کردند. منبع تامین انرژی موتورپمپ‌ها، انرژی الکتریسیته (برق) بود. مساحت هر کدام از مزرعه‌های مورد مطالعه، به‌وسیله دستگاه GPS (مدل Etrex Vista, Garmin, Lenexa, USA) بادقت زیر ۳ متر در حالت سامانه تقویت منطقه وسیع، اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری حجم آب مصرفی مزارع مورد مطالعه، از دستگاه دبی‌سنج اولتراسونیک^۲

(مدل UF5000, Adak, Tabriz, Iran) استفاده شد. با استفاده از دستگاه مذکور، دبی خروجی الکتروپمپ‌ها (دبی ورودی به مزرعه) در بازه‌های زمانی متفاوت اندازه‌گیری می‌شد و با ثبت مدت‌زمان آبیاری، حجم آب آبیاری در هر نوبت محاسبه می‌شد. در پایان فصل آبیاری، میزان برق مصرفی هر کدام از مزارع مورد مطالعه به تفکیک دوره‌ها از شرکت برق منطقه‌ای استان دریافت شد. برای اندازه‌گیری عملکرد محصولات از روش کیل‌گیری استفاده شد (لاوسن و کیلینگ، ۱۹۹۹). برای این منظور سعی شد که در نقاط مختلف مزرعه، عمل کیل‌گیری به روش کادر اندازه، ۱/۵ متر در ۱/۵ متر برای دو محصول گندم و یونجه و برای محصول سیب‌زمینی ۳ متر در ۳ متر انجام شود. ابعاد کادر نمونه‌برداری متناسب با ویژگی‌های هر محصول انتخاب شد. برای محصولات گندم و یونجه، به دلیل تراکم بالای بوته‌ها و یکنواختی نسبی پوشش گیاهی، از کادر ۱/۵ متر در ۱/۵ متر استفاده شد. در مقابل، برای محصول سیب‌زمینی به دلیل فاصله بیشتر ردیف‌های کشت، تراکم کمتر بوته‌ها و به‌منظور کاهش خطای نمونه‌برداری و افزایش نمایندگی نمونه، کادر ۳ متر در ۳ متر انتخاب گردید. همچنین میزان عملکرد محاسباتی، با میزان عملکرد کل مزرعه (فروش کشاورزان) تدقیق شد. همچنین از کشاورزان، سایر اطلاعات موردنیاز و تکمیلی برای مزارع مورد مطالعه، شامل میزان بذر گندم آبی (رقم پیشگام) کشت شده در مزرعه، کود مصرفی، سموم مصرفی، نیروی کارگری مورد استفاده، ماشین‌های کشاورزی مورد استفاده در مراحل کاشت، داشت و برداشت گردآوری شد. مزارع در سه گروه مزارع گندم، مزارع سیب‌زمینی و مزارع یونجه دسته‌بندی شدند. نهاده‌های ورودی (شامل میزان بذر، کود مصرفی، سموم مصرفی، نیروی کارگری مورد استفاده، ماشین‌های کشاورزی، الکتریسیته مصرف شده و آب مصرفی) مورد استفاده برای تولید هر سه محصول

² Ultrasonic

را نشان می‌دهد. این شاخص به صورت هزار ریال بر مترمکعب بیان شده و از طریق رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

$$BPD = \frac{\text{میزان سود ناخالص}}{\text{میزان آب مصرف شده}} \quad (۲)$$

پ) سود خالص به ازای واحد آب مصرفی (NBPD): می‌توان گفت که یکی از مهم‌ترین معیارهای سنجش بهره‌وری اقتصادی آب کشاورزی است و بیانگر سود خالص حاصل از فروش محصول به ازای حجم آب به مصرف شده برای تولید آن است که به صورت هزار ریال بر متر مکعب اندازه‌گیری می‌شود. در محاسبه این شاخص، به جای استفاده از ارزش ناخالص تولید، از سود خالص تولید استفاده می‌شود، بنابراین تصویر دقیق‌تری از بهره‌وری اقتصادی مصرف آب ارائه می‌دهد. از این رو، NBPD می‌تواند ابزار مناسبی برای برنامه‌ریزی الگوی کشت، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک با محدودیت منابع آب باشد؛ به‌طوری‌که از طریق آن می‌توان منابع محدود آب را به محصولاتی اختصاص داد که با مصرف آب کمتر، سود خالص بیشتری ایجاد می‌کنند. مقدار این شاخص از رابطه (۳) محاسبه می‌شود.

$$NBPD = \frac{\text{میزان سود خالص}}{\text{میزان آب مصرف شده}} \quad (۳)$$

در این پژوهش ارزش ناخالص تولید هر محصول از حاصل‌ضرب عملکرد محصول در قیمت فروش آن محاسبه شد و سود ناخالص برابر با تفاضل ارزش ناخالص تولید و هزینه‌های جاری تولید بود. هزینه‌های تولید در سطح مزرعه به‌طور مستقل برآورد شدند و شامل هزینه‌های کاشت (آماده‌سازی زمین، تهیه بذر، عملیات کاشت، مصرف کود دامی و مرغی)، هزینه‌های

مشخص شدند و در محیط نرم‌افزار اکسل^۴ مورد آنالیز و تحلیل قرار گرفتند

شاخص‌های ارزیابی

(۲) به‌منظور ارزیابی بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی مصرف آب در تولید محصولات کشاورزی، از چند شاخص متداول استفاده شد. این شاخص‌ها امکان مقایسه بهره‌وری مصرف آب در تولید محصولات مختلف را فراهم کرده و ابزار مناسبی برای تحلیل مدیریت منابع آب و ارزیابی الگوی کشت محسوب می‌شوند (نوری خواجه‌بلاغ و همکاران، ۱۳۹۹). برای تعیین شاخص‌های ارزیابی در این پژوهش، از روابط ۱ تا ۴ (احسانی و خالدي، ۱۳۸۲) استفاده شد.

الف) نسبت عملکرد به ازای واحد حجم آب

(CPD^۵): شاخص عملکرد آبی یا نسبت عملکرد به حجم آب مصرفی، یکی از شاخص‌های مهم در ارزیابی بهره‌وری فیزیکی آب در کشاورزی است که میزان محصول تولید شده را به ازای هر واحد حجم آب مصرفی نشان می‌دهد. هرچه این شاخص بیشتر باشد نشان‌دهنده مصرف بهینه آب می‌باشد. این شاخص معمولاً به صورت کیلوگرم بر مترمکعب بیان می‌شود و از طریق رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

$$CPD = \frac{\text{میزان محصول تولید شده}}{\text{میزان آب مصرف شده}} \quad (۱) \quad (۳)$$

ب) ارزش ناخالص تولید محصول به ازای واحد

آب مصرفی (BPD^۶): شاخص BPD یکی از شاخص‌های مهم در ارزیابی بهره‌وری اقتصادی آب است که ارزش ناخالص تولید حاصل از تولید محصول را نسبت به حجم آب به مصرف شده برای تولید محصول

^۶ Benefit Per Drop

^۷ Net Benefit Per Drop

^۴ Excel

^۵ Crop Per Drop

این محصولات نیست، بلکه تحت تأثیر سطح مکانیزاسیون، شدت عملیات زراعی، تکنولوژی کشت، عوامل اقلیمی، ویژگی‌های فیزیولوژیکی و نیازهای کشاورزی، شرایط خاک و زمین، عوامل فرهنگی، و روش آبیاری تعداد دفعات آبیاری قرار دارد. این عوامل به عنوان عوامل کلیدی مؤثر در توزیع ناهمگون نهاده‌ها در این محصولات محسوب می‌شوند. به طوری که از نظر نیروی انسانی، سیب‌زمینی با متوسط ۶۲۸ ساعت کار در هکتار، بالاترین نیاز کارگری را در تمام فرآیند کاشت، داشت و برداشت را دارا بود که این میزان بیش از سه برابر گندم (۱۸۸ ساعت در هکتار) و حدود دو برابر یونجه (۳۱۲ ساعت در هکتار) است. ماهیت کاربر بودن تولید سیب‌زمینی، به‌ویژه در مراحل آماده‌سازی زمین، کاشت غده، مدیریت تغذیه، کنترل آفات و برداشت، علت اصلی این اختلاف محسوب می‌شود. در مقابل، پایین بودن نیاز نیروی کار در گندم به‌طور کلی ناشی از دو عامل اصلی است: نخست، سطح بالای مکانیزاسیون که طی آن عملیات سنگین و زمان‌بر مانند شخم‌زنی، کاشت و برداشت به‌طور کامل توسط ماشین‌آلات پیشرفته انجام می‌شود و جایگزین نیروی انسانی می‌گردد؛ و دوم، سادگی نسبی مراحل زراعی این محصول، زیرا گندم نسبت به سایر محصولات نیازی به عملیات پیچیده و مداوم داشت و برداشت ندارد و با مدیریت کم‌تری می‌توان آن را به بار نشاند، که در مجموع این عوامل باعث کاهش چشم‌گیر وابستگی این محصول به نیروی کار است. الگوی مصرف ماشین‌آلات و سوخت نیز این ساختار را تأیید می‌کند. سیب‌زمینی با ۴۱ ساعت در هکتار کار ماشین و ۱۵۰ لیتر در هکتار سوخت (گازئیل) در هکتار، بیش‌ترین مصرف را دارد، در حالی که یونجه کم‌ترین مصرف سوخت (گازئیل) (۱۲۰ لیتر در هکتار) و ساعات ماشین (۱۵ ساعت در هکتار) را نشان می‌دهد. این امر بیان‌گر شدت عملیات خاک‌ورزی و برداشت در سیب‌زمینی نسبت به سایر محصولات است. در بخش نهاده‌های شیمیایی، گندم با مصرف ۲۶۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار، بالاترین نیاز

داشت (کود، سم، نیروی کار، آب و حامل‌های انرژی)، هزینه‌های برداشت (نیروی کار، ماشین‌آلات و حمل‌ونقل)، بود. افزون بر این، هزینه اجاره زمین و همچنین هزینه‌های مربوط به تعمیر و نگهداری تجهیزات سامانه آبیاری نیز در برآورد هزینه‌های تولید لحاظ شد. اطلاعات مربوط به هزینه‌های تولید و قیمت فروش محصولات نیز از طریق تکمیل پرسشنامه‌های میدانی توسط کشاورزان منطقه گردآوری شد.

ت) آب مجازی (VW⁸): آب یکی از نهاده‌های اساسی در تولید تمامی کالاها، اعم از محصولات کشاورزی و سایر بخش‌های اقتصادی، به شمار می‌رود. آب مجازی به عنوان یکی از شاخص‌های کلیدی در تحلیل مصرف آب، به مقدار آبی اشاره دارد که در تمام مراحل تولید یک محصول کشاورزی یا صنعتی مصرف می‌شود. این مفهوم نخستین بار توسط Allan (۱۹۹۳) مطرح شد و هدف اصلی آن توضیح نقش مبادلات تجاری در انتقال غیرمستقیم آب بین کشورها بود. محاسبه آب مجازی بر پایه نسبت حجم کل آب مصرفی در عملکرد محصولات (رابطه ۴) انجام می‌شود و به عنوان ابزاری کاربردی برای ارزیابی بهره‌وری آب، مدیریت الگوی کشت و پایداری تولید استفاده می‌شود. (Hoekstra, 2003).

$$VW = \frac{\text{میزان آب مصرف شده}}{\text{میزان محصول تولید شده}} \quad (۴)$$

یافته‌ها

بر اساس داده‌های جدول ۱، متوسط مصرف نهاده‌های کشاورزی در تمامی مزارع مورد مطالعه در هر سه محصول گندم، سیب‌زمینی و یونجه در دشت دهگلان دارای تفاوت‌های معناداری بود. این تفاوت‌ها نشان‌دهنده ناهمگنی ساختار مصرفی نهاده‌ای این محصولات می‌باشد. این تفاوت‌ها تنها به دلیل ویژگی‌های فیزیولوژیکی و نیازهای تغذیه‌ای هر یک از

⁸ Virtual Water

است، اما در سیبزمینی به دلیل ماهیت غده‌ای بذر، خود غده به‌عنوان نهاده کاشت استفاده می‌شود که دارای حجم و وزن زیادی نسبت به گندم است. از آنجا که هر بوته سیبزمینی برای شروع رشد و تأمین مواد غذایی ذخیره‌شده نیازمند کاشت یک قطعه از غده است، این امر موجب می‌شود تا وزن کل بذر مصرفی در هکتار برای سیبزمینی به مراتب بیش‌تر از گندم باشد. به‌منظور کاهش اثر عوامل مداخله‌گر، تمامی مزارع مورد مطالعه از دشت دهگلان و از اراضی با شرایط نسبتاً مشابه از نظر خاک، اقلیم و مدیریت زراعی انتخاب شدند. بنابراین، انتظار می‌رود اثر تغییرات ناشی از ویژگی‌های خاک بر نتایج تا حد زیادی کاهش یافته باشد. با این حال، ویژگی‌های فیزیکی خاک به‌عنوان یک متغیر مستقل اندازه‌گیری نشد و این موضوع از محدودیت‌های پژوهش محسوب می‌شود. در مجموع، نتایج جدول (۱) نشان می‌دهد که سیبزمینی محصولی نهاده‌بر و سرمایه‌بر است، گندم ساختاری مصرفی نسبتاً متعادل با اتکای بیش‌تر به کودهای شیمیایی داشت و یونجه اگرچه از نظر نهاده‌های شیمیایی کم‌مصرف‌تر بود، اما از نظر مصرف آب و انرژی الکتریسیته برای پمپاژ در سطح بالایی قرار داشت. این تفاوت‌های ساختاری، پایه‌ای ضروری برای سنجش دقیق بهره‌وری آب، بررسی شدت مصرف نهاده‌ها و ارزیابی میزان پایداری نظام‌های تولیدی در دشت دهگلان فراهم می‌آورد. لازم به ذکر است که مزارع یونجه مورد مطالعه در سال استقرار نبودند و در سال زراعی مورد بررسی در مرحله بهره‌برداری قرار داشتند. از این‌رو، در سال مورد مطالعه عملیات کاشت و مصرف بذر انجام نشد و نهاده بذر در محاسبات مربوط به همان سال زراعی منظور نگردید.

تغذیه‌ای را به کودهای ازته داشت، در حالی که سیبزمینی علاوه بر مصرف ۱۷۰ کیلوگرم نیتروژن، از تنوع بیش‌تری در ترکیب نهاده‌های تغذیه‌ای (پتاسیم، گوگرد، ریزمغذی‌ها و کود مرغی) بهره‌می‌برد. مصرف ۶۰۰۰ کیلوگرم در هکتار کود مرغی در سیبزمینی و ۱۵۰۰۰ کیلوگرم بر هکتار کود حیوانی (دامی) در گندم نشان می‌دهد که ساختار تغذیه‌ای این محصولات از نظر نوع کود مصرفی نیز متفاوت بودند. یونجه به دلیل تثبیت زیستی نیتروژن، کم‌ترین مصرف کود ازته (۵۵ کیلوگرم) را داشت که از منظر پایداری خاک یک مزیت نسبی محسوب می‌شود. از نظر مصرف سموم شیمیایی، سیبزمینی بیش‌ترین میزان قارچ‌کش (۲/۵ کیلوگرم در هکتار)، علف‌کش (۲ کیلوگرم در هکتار) و حشره‌کش (۲ کیلوگرم در هکتار) را مصرف می‌کند که نشان‌دهنده حساسیت بالای این محصول به بیماری‌ها و آفات و در نتیجه افزایش هزینه‌های حفاظتی بود. در حوضه انرژی، بالاترین مصرف الکتریسیته مربوط به یونجه با ۶۹۰۱ کیلووات ساعت در هکتار است که این امر ناشی از نیاز آبی بالا و دفعات متعدد آبیاری این محصول چندچین در طول فصل زراعی است. سیبزمینی و گندم به‌ترتیب ۵۵۶۹ و ۱۹۹۱ کیلووات ساعت در هکتار مصرف برق داشته‌اند. این اختلاف، ساختار متفاوت نیاز آبی محصولات را منعکس می‌کند؛ به‌گونه‌ای که یونجه با ۱۳۴۴۲ مترمکعب آب در هکتار، پرمصرف‌ترین محصول از نظر آب است، در حالی که گندم با ۴۴۹۲ مترمکعب در هکتار کم‌ترین مصرف را دارد. تفاوت چشم‌گیر در الگوی مصرف بذر این دو محصول ریشه در ماهیت متفاوت بذر و نیازهای بیولوژیکی آن‌ها دارد؛ به‌طوری که در گندم بذر بسیار ریز و سبک است و مقدار کمی از آن برای کشت کافی

جدول (۱): میانگین مصرف نهاده‌ها در تولید سه محصول عمده زراعی در واحد هکتار از مزارع دشت دهگلان

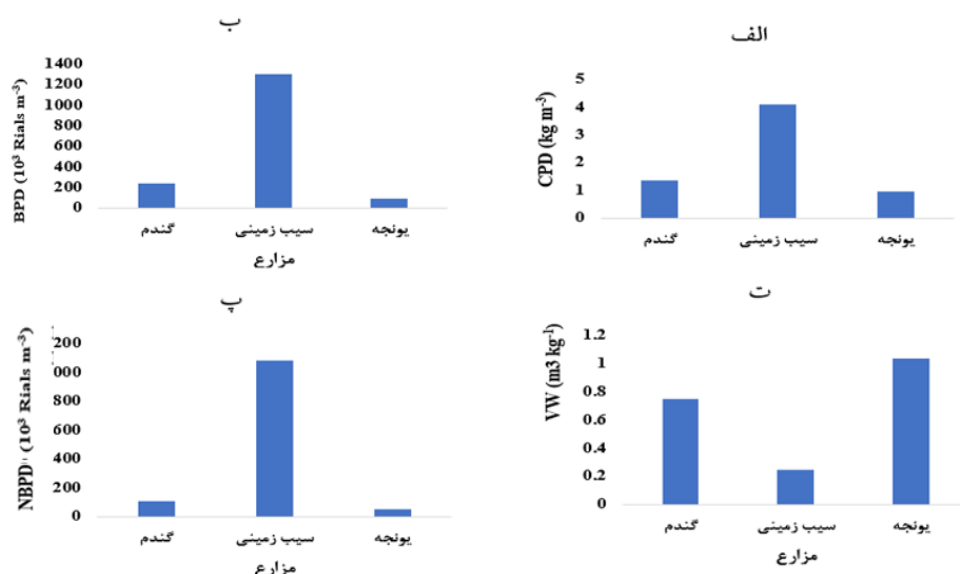
نیاهه	واحد	گندم	سیب‌زمینی	یونجه
نیروی انسانی	ساعت	۱۸۸	۶۲۸	۳۱۲
ماشین آلات	ساعت	۱۲	۴۱	۱۵
سوخت فسیلی	لیتر	۱۳۲	۱۵۰	۱۲۰
کود پتاسیم	کیلوگرم	۰	۵۰	۰
کود فسفات	کیلوگرم	۱۲۰	۰	۴۵
کود نیتروژن	کیلوگرم	۲۶۰	۱۷۰	۵۵
گوگرد	کیلوگرم	۰	۱۰	۰
کود مرغی	کیلوگرم	۰	۶۰۰۰	۰
کود حیوانی	کیلوگرم	۱۵۰۰۰	۰	۶۰۰۰
ریزمغذی	کیلوگرم	۰	۹۵	۰
قارچ‌کش	کیلوگرم	۱	۲/۵	۰
علف‌کش	کیلوگرم	۱/۵	۲	۰
حشره‌کش	کیلوگرم	۱/۵	۲	۰
الکتریسته مصرفی	کیلووات- ساعت	۱۹۹۱/۱۵	۵۵۶۹/۱۷	۶۹۰۱/۴۴
بذر مصرفی	کیلوگرم	۴۰۰	۴۰۰۰	۰
آب مصرفی	(مترمکعب)	۴۴۹۲/۴۷	۱۰۳۲۹/۹۶	۱۳۴۴۲/۱۲
عملکرد	کیلوگرم	۶۰۰۰	۴۲۰۰۰	۱۳۰۰۰

محصول گندم ۶۷۷۳/۷۷ مترمکعب، سیب‌زمین ۱۲۴۵۱/۱۲ مترمکعب و یونجه ۱۴۸۱۳/۱۵ مترمکعب محاسبه شد. همان‌گونه که در جدول ۱ میزان آب مصرفی مزارع ارائه شده به‌طور متوسط مزارع مورد مطالعه کم‌تر از نیاز آبی آب دریافت کرده‌اند. اختلاف

نتایج پژوهش نشان داد بیش‌ترین عملکرد برای محصول سیب‌زمینی با میانگین ۴۲۰۰۰ کیلوگرم در هر هکتار و کم‌ترین عملکرد برای محصول گندم با میانگین ۶۰۰۰ کیلوگرم در هر هکتار بود. با توجه به داده‌های هواشناسی به کمک نرم‌افزار کراپ‌وات نیاز آبی سه

مصرف با ماهیت چندچین بودن یونجه و نیاز آبی مستمر آن در طول دوره رشد سازگار است. چنین اختلافی بیانگر آب‌بر بودن ساختار تولید یونجه است که در شرایط افت سطح آب‌های زیرزمینی می‌تواند فشار قابل توجهی بر منابع آبی منطقه وارد کند. در مقابل، گندم کم‌آب‌برترین محصول بوده؛ موضوعی که در تحلیل‌های مبتنی بر بهره‌وری منابع آب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از بعد قیمتی، سیب‌زمینی بالاترین قیمت فروش را در میان محصولات مذکور به خود اختصاص داد که همراه با عملکرد بالاتر، ارزش تولید در واحد سطح آن را به‌طور معناداری افزایش می‌دهد. در مقابل، اگرچه گندم از ثبات نسبی قیمت ناشی از سیاست‌های حمایتی تضمین خرید از سوی دولت برخوردار است، اما سطح پایین عملکرد نشان می‌دهد که برتری اقتصادی آن بیش‌از آن‌که متکی بر کارایی فنی باشد، به چارچوب‌های حمایتی وابسته است. نکته قابل توجه آن است که ارزیابی صرف بر اساس عملکرد فیزیکی نمی‌تواند مبنای مناسبی برای تصمیم‌گیری در خصوص الگوی کشت باشد. به‌عنوان مثال، اگرچه گندم از نظر عملکرد در رتبه پایین‌تری قرار دارد، اما به دلیل نقش راهبردی در امنیت غذایی، همواره تحت حمایت سیاست‌های دولتی نظیر قیمت تضمینی و خرید حمایتی قرار می‌گیرد. در مقابل، سیب‌زمینی اگرچه از نظر فیزیکی و قیمتی مزیت دارد، اما نوسانات بازار و ریسک‌های قیمتی می‌تواند بر پایداری درآمدی آن اثرگذار باشد. این نتایج به‌طور کلی بیانگر آن است که ارزیابی محصولات تنها بر اساس عملکرد فیزیکی کافی نیست و باید نقش آن‌ها در امنیت غذایی، شرایط منابع آب و سیاست‌های حمایتی نیز در تحلیل الگوی کشت مدنظر قرار گیرد.

مشاهده‌شده بین نیاز آبی برآوردشده توسط مدل CropWat و حجم آب آبیاری اندازه‌گیری‌شده در مزارع، ناشی از تفاوت بین شرایط نظری مدل و شرایط واقعی بهره‌برداری است. مدل CropWat نیاز آبی گیاه را بر اساس شرایط استاندارد اقلیمی و ضرایب گیاهی برآورد می‌کند، در حالی که حجم آب آبیاری اندازه‌گیری‌شده متأثر از مدیریت آبیاری، زمان‌بندی آبیاری، بارندگی‌های فصل رشد و ذخیره رطوبت خاک است. بنابراین، انتظار برابری کامل بین این دو مقدار وجود ندارد و اختلاف مشاهده‌شده لزوماً بیانگر کم‌آبیاری یا ناکارآمدی مدیریت آبیاری نیست. بنابراین عملکرد محصول تولید شده عملکرد محصول عواملی هم‌چون نوع محصول یا رقم محصول (گندم، سیب‌زمینی و یونجه دارای نیازهای رشدی و فیزیولوژیکی متفاوتی هستند؛ یونجه به‌عنوان یک گیاه چندساله و علوفه‌ای، ممکن است سازگاری بیش‌تری با شرایط محیطی داشته باشد)، مدیریت بهره‌برداران مزرعه (روش‌های مختلف مدیریت مزرعه، مانند زمان‌بندی آبیاری، نوع کود مصرفی و مبارزه با آفات و بیماری‌ها، می‌تواند بر کارایی انرژی تأثیرگذار باشد)، شرایط آب و هوایی (شرایط آب و هوایی مختلف می‌تواند بر رشد گیاهان و مصرف انرژی تأثیر بگذارد) و مباحث اقتصادی و حاشیه سود محصول در نتیجه همه این عوامل هر سال بسته به شرایط می‌تواند کاملاً متفاوت روی عملکرد محصول تأثیر داشته باشند که به این پدیده رخداد اثر سال گویند (طهماسبی و زارع ایبانه، ۱۴۰۴). مصرف آب، یونجه با بیش‌از ۱۳۴۴۲ مترمکعب در هکتار، پرمصرف‌ترین محصول از نظر آب مصرفی در میان گزینه‌های مورد بررسی در سال زراعی مذکور بود؛ به‌طوری‌که میزان آب مصرفی آن تقریباً ۳، برابر گندم (۴۴۹۲ مترمکعب در هکتار) و حدود ۱/۳۰ برابر سیب‌زمینی (۱۰۳۲۹ مترمکعب در هکتار) برآورد می‌شود. این سطح بالای



شکل (۲): مقایسه شاخص‌های بهره‌وری فیزیکی CPD (الف)، بهره‌وری اقتصادی بر پایه ارزش ناخالص تولید BPD (ب)، بهره‌وری اقتصادی بر پایه سود خالص NBPDP (پ)، و شاخص آب مجازی VW (ت)، برای محصولات گندم، سیب‌زمینی و یونجه در دشت دهگلان

بازده اقتصادی آن ارائه شود. نتایج شکل (۲ ب)، نشان داد که بیش‌ترین ارزش ناخالص به ازای واحد آب مصرفی (BPD) مربوط به سیب‌زمینی ۱۳۰۱/۰۷ هزار ریال در مترمکعب محاسبه شد و محصولات گندم به میزان ۲۳۹/۷۳ و یونجه ۴۲/۵۱ هزار ریال در مترمکعب در رتبه‌های بعدی را به خود اختصاص داده بودند. همچنین بیش‌ترین سود خالص به ازای واحد آب مصرفی (NBPDP) مربوط به سیب‌زمینی با مقدار ۱۰۷۷/۷۷ هزار ریال در مترمکعب و محصول گندم و یونجه به ترتیب به میزان ۱۰۵/۳۱ و ۲۴/۴۳ هزار ریال در مترمکعب در رتبه‌های بعدی بودند شکل (۲ پ). به‌طور کلی، ارزش ناخالص تولید در یک نظام کشاورزی عمدتاً تحت تأثیر عملکرد محصول و قیمت فروش آن در بازار قرار دارد، در حالی که سود خالص علاوه بر این عوامل به ساختار هزینه‌های تولید نیز وابسته است. هزینه‌هایی نظیر بذر، کود، سموم، نیروی انسانی، انرژی و آب‌ها از مهم‌ترین هزینه‌های متغیر تولید محسوب می‌شوند، در حالی که هزینه‌های ثابت مانند استهلاک ماشین‌آلات و تجهیزات، اجاره زمین، مالیات و سایر

نمودار شاخص‌های CPD، BPD، NBPDP و VW

در شکل ۲ ارائه شده است.

نتایج ارزیابی شاخص‌های بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی آب در محصولات مورد مطالعه نشان‌دهنده تفاوت‌های قابل توجه میان گندم، سیب‌زمینی و یونجه است و مطابق شکل ۲، (الف) متوسط شاخص بهره‌وری به ازای هر مترمکعب آب (CPD) نشان می‌دهد که بالاترین بهره‌وری به مربوط به مزارع سیب‌زمینی تعلق دارد و مقدار آن برابر با ۴/۰۲ کیلوگرم در مترمکعب است. پس از مزارع سیب‌زمینی، مزارع گندم با ۱/۳۴ کیلوگرم در مترمکعب و مزارع یونجه با ۰/۹۶ کیلوگرم در مترمکعب در رتبه‌های بعدی جای می‌گیرند. این تفاوت می‌تواند تحت تأثیر عواملی هم-چون سطح آگاهی کشاورزان نسبت به اصول صحیح آبیاری، که بر مدت و تعداد نوبت‌های آبیاری در طول فصل زراعی اثر می‌گذارد، اندازه اراضی، سطح دسترسی به منابع آبی و نوع تجهیزات مورد استفاده در آبیاری باشد. در برآورد ارزش اقتصادی گندم، علاوه بر محصول اصلی، ارزش کاه نیز لحاظ شده تا ارزیابی دقیق‌تری از

هزینه‌های مدیریتی نیز می‌توانند بر میزان سود خالص تولید تأثیرگذار باشند. از این رو، مدیریت بهینه نهاده‌ها، کاهش ضایعات تولید و استفاده از روش‌های کارآمد مدیریتی می‌تواند نقش مهمی در افزایش بازده اقتصادی آب در نظام‌های تولید کشاورزی ایفا کند. از سوی دیگر، شاخص آب مجازی (Virtual Water) به مقدار کل آبی گفته می‌شود که برای تولید یک محصول کشاورزی، به‌طور مستقیم و غیرمستقیم مصرف می‌شود. همچنین ابزاری قدرتمند در سنجش پایداری سامانه‌های تولید کشاورزی، فراتر از صرفاً مقایسه میزان مصرف آب، به ارزیابی روابط پیچیده بین مصرف آب، بهره‌وری و اثرات اکولوژیک و اقتصادی می‌پردازد. لازم به ذکر است که مفهوم آب مجازی مورد استفاده در این پژوهش، صرفاً به آب آبیاری مصرف‌شده در مرحله تولید مزرعه محدود بوده است؛ بنابراین، نتایج ارائه‌شده باید در چارچوب ارزیابی آب آبی مصرفی در مزرعه تفسیر شوند و قابل تعمیم به مفهوم جامع ردپای آب که شامل آب سبز، آب خاکستری و سایر مراحل زنجیره تولید است، نیستند. تحلیل داده‌ها شکل (۲) نشان داد که محصول یونجه با میانگین $1/02$ مترمکعب آب مجازی به ازای هر کیلوگرم تولید، به‌طور قابل توجهی بالاترین شدت آب‌بری را در میان محصولات مورد مطالعه نشان می‌دهد. این رقم، نه تنها نشان‌دهنده نیاز آبی ذاتی گیاه یونجه، بلکه بازتابی از روش‌های آبیاری (میزان آب و نوع فرآیند آبیاری توسط کشاورزان و بهره‌برداران) و محدودیت‌های موجود در بهینه‌سازی مصرف آب در این محصول است. از طرف دیگر میزان آب مجازی به عوامل اقلیمی (میزان بارندگی موثر، دما، رطوبت نسبی، تابش خورشیدی و باد)، خاک‌شناسی (نوع خاک، بافت خاک، عمق خاک و محتوای عالی خاک)، فرآوری و بسته‌بندی (فرآوری محصول و بسته‌بندی آن) و بهره‌برداری (روش آبیاری، زمان آبیاری، مقدار آب آبیاری، روش‌های حفاظتی خاک، مدیریت علف‌های هرز و رقم بذر محصول) بستگی دارد. بنابراین میزان آب مجازی گیاه

یونجه به این دلیل که گیاه چند ساله و نیاز به آبیاری مکرر دارد و این موضوع در مناطق خشک و نیمه‌خشک از اهمیت بیش‌تر برخوردار است، سامانه ریشه‌ای (یونجه دارای سامانه ریشه‌ای عمیق است که به آن امکان می‌دهد آب را از لایه‌های پایین‌تر خاک جذب کند. با این حال، این سامانه ریشه‌ای عمیق نیز به آبیاری کافی نیاز دارد تا بتواند به‌طور کامل توسعه یابد و عملکرد مطلوبی داشته باشد)، چندچین بودن گیاه یونجه (یونجه یک گیاه با رشد سریع و زیاد است که برای تولید زیست‌توده (Biomass) بالا، نیاز به آب زیادی دارد)، کیفیت علوفه (برای تولید علوفه‌ای با کیفیت بالا، یونجه باید در شرایط بهینه آبیاری شود. یعنی به نیاز آبی میزان آب دریافت کند زیرا کمبود آب می‌تواند باعث کاهش کیفیت علوفه و کاهش ارزش غذایی آن شود) آب مجازی بیش‌تری را داشت. در مقابل، محصول گندم $0/75$ و سیب‌زمینی $0/25$ مترمکعب در کیلوگرم به-ترتیب با آب مجازی به‌مراتب پایین‌تر، پتانسیل قابل توجهی برای دستیابی به سطوح بالاتر بهره‌وری آبی و کاهش اثرات منفی بر منابع آب محدود منطقه دارند. تحلیل عمیق‌تر نشان می‌دهد که شدت آب‌بری بالای یونجه، علاوه بر اثرات زیست‌محیطی، می‌تواند پیامدهای اقتصادی نیز داشته باشد. افزایش هزینه‌های تولید ناشی از مصرف بالای آب، کاهش حاشیه سود کشاورزان در اثر استفاده زیاد از انرژی‌های وابسته (الکتریسیته و سوخت فسیلی گازئیلی) جهت پمپاژ آب و افزایش وابستگی به منابع آبی محدود را در پی دارد. این در حالی است که کشت محصولات با آب مجازی پایین‌تر، می‌تواند با کاهش هزینه‌های تولید و افزایش رقابت‌پذیری، به بهبود وضعیت اقتصادی کشاورزان و توسعه پایدار بخش کشاورزی کمک کند. بنابراین، اتخاذ رویکردی جامع و یکپارچه در مدیریت منابع آب، که شامل بازنگری در الگوی کشت، ترویج روش‌های آبیاری نوین با راندمان کاربرد بالاتر، توسعه ارقام مقاوم به خشکی و ارزیابی دقیق اثرات زیست‌محیطی و اقتصادی،

و شاهنظری (۱۴۰۴) نیز در استان مازندران بهره‌وری آب گندم و یونجه را به‌ترتیب ۱/۱۹ و ۰/۶۶ کیلوگرم در مترمکعب گزارش کرده‌اند. افزون بر این، نتایج معتقد و سیدان (۱۴۰۳) در استان همدان نشان داد که سیب‌زمینی بالاترین بهره‌وری فیزیکی آب را هم در سامانه‌های نوین و هم سنتی داراست؛ به‌طوری‌که بهره‌وری آب (CPD) آن به‌ترتیب ۳/۹۶ و ۲/۸۷ کیلوگرم در مترمکعب بوده است. همچنین، یافته‌های اسلامی و همکاران (۱۴۰۳) در دشت قادراآباد- مادرسلیمان نیز برتری نسبی سیب‌زمینی (۴/۱۲ کیلوگرم در مترمکعب) را نسبت به گندم (۰/۸۲) و یونجه (۱/۲۰) تأیید می‌نماید. به‌طور کلی، مرور مطالعات انجام‌شده بیان‌گر آن است که اگرچه مقادیر مطلق بهره‌وری آب با توجه به شرایط اقلیمی، نوع سامانه‌های آبیاری و مدیریت مزرعه‌ای متغیر است، اما الگوی برتری نسبی محصولات از منظر بهره‌وری مصرف آب در اغلب مناطق مورد بررسی کشور مشاهده شده و نتایج این پژوهش نیز با این الگو هم‌خوانی دارد؛ به‌گونه‌ای که سیب‌زمینی بالاترین و یونجه پایین‌ترین بهره‌وری مصرف آب را نشان می‌دهد.

بحث و نتیجه‌گیری

تحلیل هم‌زمان شاخص‌های بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی آب نشان داد که میان ابعاد مختلف بهره‌وری در محصولات مورد بررسی، هم‌راستایی قابل توجهی وجود دارد؛ به‌طوری‌که محصولاتی که از نظر تولید فیزیکی به‌ازای واحد آب مصرفی عملکرد مطلوب‌تری دارند، در شاخص‌های اقتصادی مبتنی بر آب نیز وضعیت بهتری را نشان می‌دهند. این هم‌سویی بیان‌گر آن است که ارزیابی بهره‌وری آب صرفاً بر پایه یک شاخص منفرد نمی‌تواند تصویر دقیقی از کارایی نظام تولید ارائه دهد و به‌کارگیری رویکردی تلفیقی شامل شاخص‌های فیزیکی و اقتصادی، درک جامع‌تری از بازدهی محصولات در شرایط محدودیت منابع آب و امنیت غذایی فراهم کرده است. از سوی دیگر، بررسی شاخص آب مجازی نیز این نتیجه را تقویت می‌کند.

امری ضروری است. در نهایت، استفاده از رویکرد آب مجازی به عنوان ابزاری برای سیاست‌گذاری مبتنی بر شواهد، می‌تواند به تخصیص بهینه منابع آبی، افزایش پایداری سامانه‌های تولید کشاورزی و تضمین امنیت غذایی در بلندمدت منجر شود. این رویکرد نیازمند همکاری بین‌رشته‌ای بین متخصصان کشاورزی، اقتصاد، محیط‌زیست و سیاست‌گذاران است تا راه‌کارهای عملی و موثری برای کاهش آب مجازی و ارتقای پایداری کشاورزی ارائه شود. این تفاوت در آب مجازی، مستقیماً با شاخص‌های بهره‌وری محصول مرتبط بوده و نشان‌دهنده آن است که کاهش آب مجازی می‌تواند منجر به افزایش بهره‌وری اقتصادی و کاهش ردپای اکولوژیک شود. در نهایت یافته‌ها نشان می‌دهد که یونجه در شرایط فعلی دشت دهگلان از منظر تولید به‌ازای واحد آب مصرفی عملکرد مطلوبی ندارد و در صورت تشدید محدودیت منابع آب، تداوم کشت آن می‌تواند با محدودیت‌های جدی مواجه شود. نتایج به‌دست‌آمده با یافته‌های مطالعات پیشین نیز هم‌خوانی دارد. به‌عنوان مثال، طهماسبی و همکاران (۱۴۰۴) بهره‌وری آب سیب‌زمینی را در اراضی شرق شهرستان دهگلان، تحت سامانه‌های آبیاری بارانی کلاسیک با آب‌پاش‌های متحرک و ویلمو (لوله‌چرخ‌دار)، به‌ترتیب ۴/۶۹ و ۳/۸۵ کیلوگرم در مترمکعب گزارش نمودند که با مقادیر به‌دست‌آمده در تحقیق حاضر قابل مقایسه است. رحمتی و همکاران (۱۴۰۵)، طی پژوهشی در دشت قروه در استان کردستان میزان بهره‌وری آب را برای محصول گندم در مزارعی که به سامانه‌های آبیاری بارانی کلاسیک ثابت با آب‌پاش متحرک CE (منبع انرژی توزیع آب الکتریسیته) و CD (منبع انرژی توزیع آب در سطح مزرعه انرژی سوخت فسیلی گازی) به‌ترتیب ۱/۴۷ و ۱/۳۱ کیلوگرم در هکتار به‌دست آمد. همچنین، طهماسبی و زارع ابیانه (۱۴۰۴) مقدار بهره‌وری آب یونجه را در پایاب سد مخزنی سورال استان کردستان حدود ۱/۱۸ کیلوگرم در مترمکعب و غلامی و همکاران (۱۳۹۴) در دشت قزوین در دامنه ۰/۲۰ تا ۱/۷۶ کیلوگرم در مترمکعب گزارش کردند. نوری خواجه‌بلاغ

که هم‌زمان از مصرف آب کم‌تر و بازده اقتصادی بالاتری برخوردارند. همچنین با توجه به این‌که راندمان سامانه‌های آبیاری بارانی دشت دهگلان کم‌تر از استاندارد است (فریابی و همکاران، ۲۰۱۱)، بنابراین ضرورت دارد باید محصولاتی کشت شوند که دارای بیش‌ترین بهره‌وری آب باشند تا از لحاظ عملکرد و شاخص‌های ارزیابی آب مصرفی توجیه کرد. چنین رویکردی می‌تواند علاوه بر کاهش برداشت از منابع آب زیرزمینی، کارایی تخصیص آب در بخش کشاورزی را بهبود بخشیده و منافع اقتصادی بیش‌تری برای کشاورزان فراهم کند. در این چارچوب، توسعه کشت محصولاتی جایگزین می‌تواند به‌عنوان راهبردی کارآمد در مدیریت تقاضای آب مطرح شود. با توجه به استراتژیک خواندم گندم و سیاست‌های دولت برای محصولات استراتژیک پیشنهاد می‌شود محصول گندم بیش‌تر کشت گردد زیرا اهمیت راهبردی آن در تأمین امنیت غذایی کشور، جایگاه ویژه‌ای برای آن در سیاست‌های کشاورزی ایجاد کرده است. با این حال، نتایج مربوط به گندم نیازمند تفسیر محتاطانه‌تری است. هرچند این محصول در مقایسه با سایر گزینه‌ها پایین‌ترین عملکرد در واحد سطح و مقادیر متوسطی از شاخص‌های بهره‌وری مبتنی بر آب را نشان می‌دهد، از این‌رو، تصمیم‌گیری درباره کاهش یا جایگزینی کشت گندم را نمی‌توان صرفاً بر مبنای شاخص‌های فنی و اقتصادی انجام داد؛ بلکه باید در چارچوب ملاحظات کلان امنیت غذایی، خودکفایی و ثبات عرضه تحلیل شود. بنابراین، سیاست‌های اصلاح الگوی کشت باید به‌گونه‌ای طراحی شوند که ضمن ارتقای بهره‌وری آب، اهداف امنیت غذایی نیز به‌طور هم‌زمان تأمین گردد.

تقدیر و تشکر

نویسندگان از دانشگاه کردستان به‌دلیل حمایت مالی و از مدیر وقت گروه علوم مهندسی آب به‌دلیل

براساس نتایج به‌دست آمده برای سه محصول عمده مزارع زراعی (گندم، سیب‌زمینی و یونجه) دشت دهگلان، استان کردستان و مقایسه آن با نتایج سایر پژوهش‌ها، دارای هم‌خوانی بوده که اختلافات جزئی متاثر از اقلیم، شرایط محیط و نوع سامانه‌های آبیاری و نحوه مراحل کاشت، داشت و برداشت که نهفته در آداب و رسوم مردمان منطقه دارد می‌باشد. با توجه به اعداد به‌دست آمده محصول سیب‌زمینی با میانگین $4/07$ کیلوگرم در مترمکعب داری بیش‌ترین بهره‌وری فیزیکی (CPD) آب بود. از لحاظ شاخص بهره‌وری اقتصادی مبتنی بر ارزش ناخالص تولید (BPD) و بهره‌وری اقتصادی مبتنی بر سود خالص (NBPD) به‌ترتیب با میانگین $1301/07$ و $1077/77$ هزار ریال در مترمکعب دارای بیش‌ترین مقدار بود. و در نهایت کم‌ترین میزان با میانگین $0/25$ مترمکعب آب در کیلوگرم آب مجازی (VW) را در میان محصولات مورد بررسی را داشت. در مجموع، اگرچه سیب‌زمینی در زمره محصولات نسبتاً آب‌بر قرار می‌گیرد، اما به دلیل عملکرد بسیار بالا در واحد سطح و ثبت برترین مقادیر در شاخص‌های مختلف بهره‌وری آب، کارآمدترین محصول در میان گزینه‌های مورد بررسی در دشت دهگلان به‌شمار می‌رود. بنابراین، با توجه به شرایط منطقه و مقایسه انجام‌شده، کشت سیب‌زمینی نسبت به دیگر محصولات ارجحیت داشته و از اولویت بالاتری برخوردار است. همچنین تفاوت چشم‌گیر در میزان آب مورد نیاز برای تولید هر کیلوگرم محصول، به‌ویژه مقدار بالاتر آب مجازی یونجه در مقایسه با گندم و سیب‌زمینی، نشان می‌دهد که برخی محصولات به‌صورت ساختاری فشار بیش‌تری بر منابع آب وارد می‌کنند. در شرایطی که دشت دهگلان با محدودیت منابع آب زیرزمینی مواجه است، استمرار کشت محصولات آب‌بر با بازده اقتصادی پایین می‌تواند پایداری تولید را در بلندمدت با مخاطره روبه‌رو سازد. بر این اساس، اصلاح الگوی کشت در مناطق کم‌آب مستلزم اولویت‌بخشی به محصولاتی است

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع

ندارد.

فراهم سازی تجهیزات و امکانات مورد نیاز برای اجرای این پژوهش، قدردانی می کنند.

ملاحظات اخلاقی

حامی مالی

حمایت مالی این پژوهش توسط دانشگاه کردستان، دانشکده کشاورزی به عنوان پژوهانه (پژوهشی) برای تمام نویسندگان صورت گرفته است.

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

تمام نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده اند و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست.

منابع

احسانی، مهرزاد، و خالدی، هومن، ۱۳۸۲. بهره‌وری آب کشاورزی. کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران (وزارت نیرو). تهران.

اسلامی، امیر، شیروانیان، عبدالرسول، و زارعیان، غلامرضا، ۱۴۰۳. تأثیر اصلاح الگوی کشت بر بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی آب آبیاری محصولات زراعی در استان فارس (بررسی موردی: دشت قادرآباد- مادرسلیمان). تحقیقات مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی، ۲۵ (۹۴). صص. ۱۷-۳۸.

اسدی، هرمز، محمودی، مریم، و زارع، شجاعت، ۱۴۰۰. تعیین سودآوری و بهره‌وری اقتصادی آب کشاورزی در تولید محصولات زراعی. نشریه آبیاری و زهکشی/ایران، ۱۵ (۶). صص. ۱۴۰۴-۱۴۱۱.

باغبانیان، مصطفی، امام‌وردی، قدرت‌الله، قادرزاده، حامد، دامن کشیده، مرجان، و امین‌رشتی، ناریس، ۱۳۹۹. بررسی آب مجازی و شاخص‌های بهره‌وری آب کشاورزی در محصولات عمده زراعی (مطالعه موردی: شهرستان سقز استان کردستان). نشریه آبیاری و زهکشی/ایران، ۱۴ (۳). صص. ۱۰۴۶-۱۰۵۴.

توکلی، علیرضا، حکم‌آبادی، حسین، نادری عارفی، علی، و حجتی، علی، ۱۴۰۰. بررسی مزیت نسبی محصولات کشاورزی استان سمنان با محوریت بهره‌وری آب. نشریه علوم آب و خاک، ۲۵ (۴). صص. ۶۳-۸۱.

رحمتی، ثنا، طهماسبی، پیمان، کریمی، بختیار، ۱۴۰۵. بهره‌وری مصرف آب و انرژی در سامانه آبیاری بارانی کلاسیک ثابت برای محصول گندم (مطالعه موردی: دشت قره). فناوری‌های پیشرفته در بهره‌وری آب، ۶ (۱). صص. ۴۴-۶۴.

زارعی قورخودی، علیرضا، شاهنظری، علی، و داداشی، پریشان، ۱۴۰۱. ارزیابی شاخص‌های بهره‌وری آب در تولید محصولات زراعی و باغی در غرب و مرکز استان مازندران و رتبه‌بندی دشت‌های مطالعاتی. نشریه آبیاری و زهکشی/ایران، ۱۶ (۳). صص. ۶۵۷-۶۶۹.

طهماسبی، پیمان، ۱۴۰۳. اصول مدیریت منابع آب. انتشارات قلم محقق، صص. ۱-۳.

طهماسبی، پیمان، دالوند، فاطمه، حسینی، سید ابولفضل، کریمی، بختیار، و قدرشناس، هیرش، ۱۴۰۳. بررسی مقایسه‌ای کارایی انرژی دو سامانه آبیاری بارانی در کشت گندم (مطالعه موردی: دشت‌های دهگلان، استان کردستان). آب و خاک، ۳۸ (۶). صص. ۶۸۳-۶۹۷.

طهماسبی، پیمان و زارع ابیانه، حمید، ۱۴۰۴. مقایسه بهره‌وری انرژی در سامانه‌های آبیاری سطحی و بارانی در کشت گندم و یونجه (مطالعه موردی: پایاب سد مخزنی سورال استان کردستان). *فناوری‌های پیشرفته در بهره‌وری آب*. ۵(۲). صص. ۷۲-۹۳.

طهماسبی، پیمان و زارع ابیانه، حمید، ۱۴۰۴. اثر تغییرات کاربری اراضی بر نوسان سطح آب زیرزمینی: مطالعه موردی دشت قروه- دهگلان. *پژوهش آب در کشاورزی*. ۳۹(۳). صص. ۲۶۱-۲۷۷.

طهماسبی، پیمان، زارع ابیانه، حمید، اکبری پارسا، موسی، و طهماسبی، کیوان، ۱۴۰۴. تحلیل کارایی انرژی در دو سامانه آبیاری بارانی در تولید سیب‌زمینی دشت‌های دهگلان استان کردستان. *نشریه آبیاری و زهکشی ایران*. ۱۶(۶). ۱۰۳۱-۱۰۱۹.

طهماسبی، پیمان و گل‌محمدی قانع، پگاه، ۱۴۰۴. تحلیل چالش‌ها و راه‌کارهای مدیریتی و مشارکتی انتقال مدیریت آبیاری در شبکه‌های آبیاری استان کردستان. *نشریه مدیریت آب در کشاورزی*. (e238487). doi: 10.22034/wmaj.2026.561315.1283

علیخانی مهوار، حجت، بابازاده، حسین، قدمی فیروزآبادی، علی، و سرائی تبریزی، مهدی، ۱۴۰۳. ارزیابی بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی آب تحت شرایط کم‌آبیاری تنظیم شده و کم‌آبیاری ناقص ریشه گیاه آفتابگردان. *نشریه آبیاری و زهکشی ایران*. ۱۸(۴). صص. ۶۵۵-۶۶۵.

غلامی، زینب، ابراهیمیان، حامد، و نوری، حمیده، ۱۳۹۴. بررسی بهره‌وری انرژی آب و بهره‌وری اقتصادی انرژی در سامانه‌های آبیاری بارانی و سطحی در شرایط بهره‌برداری از آب زیرزمینی (مطالعه موردی: دشت قزوین). *مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی*. ۱۶(۳). صص. ۳۱-۴۴.

قادرپور، امید، رفیعی، شاهین، و شریفی، محمد، ۱۳۹۶. تجزیه و تحلیل و مدل‌سازی انرژی و هزینه تولید یونجه با بهره‌گیری از سامانه استنتاج فازی - عصبی تطبیقی در شهرستان بوکان. *مهندسی بیوسیستم ایران*. ۴۸(۱). صص. ۱۷۹-۱۹۰.

قدمی فیروزآبادی، علی، عباسی، فریبرز، جوزی، مهدی، ابوالپور، بهروز، کوهی چله کران، نادر، اسلامی، امیر، ورجاوند، پیمان، و ناصری، ابوالفضل، ۱۴۰۲. بررسی حجم آب کاربردی، بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی آب در باغات انجیر کشور. *علوم و مهندسی آبیاری*. ۴۶(۲). صص. ۱۰۳-۱۱۸.

قصابی، مهسا، اسعدی، محمدعلی، قادرزاده، حامد، و حاجی‌رحیمی، محمود، ۱۴۰۳. تأثیر سیاست‌های انگیزشی مالی بر الگوی مصرف آب و الگوی کشت محصولات زراعی (مطالعه موردی: دشت دهگلان در استان کردستان). *نشریه آبیاری و زهکشی ایران*. ۱۸(۲). صص. ۲۷۱-۲۸۰.

لرمحمدحسینی، محبوبه، طالب نژاد، رضوان، نوشادی، مسعود، و سپاسخواه، علیرضا، ۱۴۰۳. بررسی اولویت کشت بادام و گردو از دیدگاه آب مصرفی و بهره‌وری آب در منطقه اسفندقه استان کرمان. *نشریه آبیاری و زهکشی ایران*. ۱۸(۵). صص. ۸۳۵-۸۴۶.

- معتقد، مهسا، و سیدان، سیدمحسن، ۱۴۰۳. تحلیل بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی آب در محصولات عمده زراعی شهرستان همدان با رویکرد کاهش ریسک مدیریت آبیاری. ۱۳(۳). صص. ۱-۱۶.
- نوری خواجه‌بلاغ، رسول، و شاهنظری، علی، ۱۴۰۴. مقایسه شاخص‌های بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی محصولات عمده زراعی در شهرستان‌های استان مازندران. نشریه مدیریت آب در کشاورزی. ۱۲(۱). صص. ۶۷-۸۰.
- نیازمند، رویا، مقدم‌نیا، آرمان، طهماسبی، پیمان، نیک مهر، سامان، و معروف پور، عیسی، ۱۴۰۲. بهره‌وری مصرف آب و انرژی محصول سیب‌زمینی در سامانه‌های آبیاری بارانی (مطالعه موردی: دشت دهگلان استان کردستان). فناوری‌های پیشرفته در بهره‌وری آب. ۳(۴). صص. ۱۱۶-۱۳۷.
- هدایتی، سمیرالسادات، بهمنی، امید، طهماسبی، پیمان، دالوند، فاطمه، و حسینی، سید ابوالفضل، ۱۴۰۴. بررسی تغییرات مکانی- زمانی ویژگی‌های کیفی آب مورد استفاده در بخش کشاورزی دشت ملایر. مجله علوم ومهندسی آبخیزداری/ایران. ۱۹(۶۸). صص. ۷۸-۹۲.
- Allan, J.A., 1993. Fortunately, There Are Substitutes for Water Otherwise Our Hydro political Futures Would Be Impossible. Priorities for Water Resources Allocation and Management, Overseas Development Administration, London, The United Kingdom, pp. 13-26.
- Biswas, A., Sarkar, S., Das, S., Dutta, S., Choudhury, M. R., Giri, A. and Paul, D., 2025. Water scarcity: A global hindrance to sustainable development and agricultural production—A critical review of the impacts and adaptation strategies. *Cambridge Prisms: Water*, 3, e4.
- Cai, X., Molden, D., Mainuddin, M., Sharma, B., Ahmad, M. U. D. and Karimi, P., 2013. Producing more food with less water in a changing world: assessment of water productivity in 10 major river basins. *Water, food and poverty in river basins*, pp. 280-300.
- De Jong IH, Arif SS, Gollapalli PK, Neelam P, Nofal ER, Reddy KY, Röttcher K, and Zohrabi N., 2021. Improving agricultural water productivity with a focus on rural transformation. *Irrigation and Drainage*, 70(3), pp. 446-458.
- Hatfield, J. L. and Dold, C., 2019. Water-use efficiency: advances and challenges in a changing climate. *Frontiers in plant science*, 10, 103.
- Heydari, N. and Taran, F., 2025. Effect of Climate Change on Wheat Yield and Water Productivity in Iran and the World. *Iranica Journal of Energy & Environment*, 16(2), pp. 253-269.
- Kijne, J. W., Barker, R. and Molden, D., 2003. Water productivity in agriculture: limits and opportunities for improvement. pp. 332.
- Kledzik, R., Kropkowski, M., Dudek, S., Kuśmierk-Tomaszewska, R. and Źarski, J., 2017. Evaluation of economic efficiency of irrigation in corn for grain production in 2005-2016. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich*.
- Kowalczyk, Z., 2019., Life cycle assessment (LCA) of potato production. In *E3S Web of Conferences*, 132, pp. 2003.
- Kumar, M. D. and van Dam, J. C., 2013. Drivers of change in agricultural water productivity and its improvement at basin scale in developing economies. *Water International*, 38(3), pp. 312-325.
- Lawson, M. J. and Keeling, A. A., 1999. Production and physical characteristics of composted poultry carcasses. *British Poultry Science*, 40(5), pp. 706-708.
- Mohamadi, E., Ahmadpari, H., Mohammadrezapour, O., Haghayeghi Moghadam, S.A. and Haghghatju, P., 2020. Investigation of virtual water status of livestock products in different.
- Molden, D. J., Sakthivadivel, R., Perry, C. J. and De Fraiture, C., 1998. Indicators for comparing performance of irrigated agricultural systems, 20.



Mubarak, T., Jehangir, I. A., Hussain, A., Dar, E. A., Shah, Z. A., Lone, A. H., Salim Mir, M., EI-Hendawy., Mattar, M. A. and Salem, A., 2025. Yield and water productivity of rice as influenced by crop establishment and irrigation methods under temperate environment. *Scientific Reports*, 15(1), pp. 29494

Noori, H., Ahmadpari, H., Mohamadi, E., Mokhizadeh, V. and Hosseinbor, K., 2020., A foucauldian analysis of " virtual water" concept in terms of sustainable agriculture and food security. In *4th International Conference on Innovative Technologies in Science, Engineering and Technology, Istanbul, Turkey*.

Zhou, Q., Zhang, Y. and Wu, F., 2021., Evaluation of the most proper management scale on water use efficiency and water productivity: A case study of the Heihe River Basin, China. *Agricultural Water Management*, 246, pp. 106671.