



Comparison of energy productivity in surface and sprinkler irrigation systems for Wheat and Alfalfa cultivation (case study: downstream lands of Soural reservoir dam, Kurdistan Province)

Peyman Tahmasebi¹ , and Hamid Zare Abyaneh^{2✉}

1. Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamadan, Iran. E-mail: p.tahmasebi@agr.basu.ac.ir
2. Corresponding author, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamadan, Iran. E-mail: zare@basu.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 13 February 2025

Received in revised form 06

April 2025

Accepted 23 May 2025

Available online 22 June 2025

Keywords:

water productivity,

specific energy,

Alfalfa,

dam downstream,

human resources.

ABSTRACT

Objective: The objective of this study was to examine the energy consumption patterns in the production of irrigated wheat and alfalfa in the downstream lands of the Soural Reservoir Dam in Kurdistan Province. The study also aimed to analyze key energy indicators such as energy ratio, specific energy, and energy productivity based on the type of irrigation systems and input usage.

Method: In this study, 37 farms with a total area of 76 hectares were selected. The farms were categorized into systems 1 and 2 for wheat cultivation, and systems 3 and 4 for alfalfa. Systems 1 and 3 were equipped with surface irrigation systems, while systems 2 and 4 utilized fixed classic sprinkler irrigation systems with movable sprinklers, all operating under gravity-fed water sources. Data on total input consumption were collected through questionnaires administered to farmers in the region during the 2020–2021 cropping season.

Results: The results indicated that in wheat cultivation systems, the highest energy consumption was associated with chemical fertilizers, especially nitrogen fertilizers. In alfalfa systems, irrigation water in system 3 and chemical fertilizers in system 4 were the dominant energy-consuming inputs. The total energy inputs for systems 1 to 4 were 29733.16, 46347.05, 52054.7, and 39147.48 MJ/ha, respectively, while the corresponding output energies were 66,450, 96,000, 189,600, and 229,100 MJ/ha. The calculated energy ratios were 2.32, 2.07, 3.64, and 5.85, and the specific energy values were 6.32, 6.81, 3.25, and 2.69 MJ/kg, respectively. Energy productivity was measured at 0.12, 0.10, 0.29, and 0.37 kg/MJ for the four systems, respectively.

Conclusion: The findings revealed that high nitrogen fertilizer uses in wheat farms and excessive water consumption in alfalfa farms significantly increased energy input levels. Moreover, delays in water release to farmers were identified as a major challenge in irrigation management in the area. To enhance energy productivity and reduce environmental impacts, it is recommended to educate farmers on efficient energy and resource management practices.

Cite this article: Tahmasebi, P., & Zare Abyaneh, H. (2025). Comparison of energy productivity in surface and sprinkler irrigation systems for Wheat and Alfalfa cultivation (case study: downstream lands of Soural reservoir dam, Kurdistan Province). *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 5 (2), 72-93. <https://doi.org/10.22126/atwe.2025.11936.1160>



© The Author(s)

<https://doi.org/10.22126/atwe.2025.11936.1160>

Publisher: Razi University.

Introduction

Increasing energy productivity in the agricultural sector is one of the key issues in sustainable natural resource management and reducing production costs. The high consumption of agricultural inputs, particularly chemical fertilizers and irrigation water, has a direct impact on the amount of energy input in production systems. In this context, comparing energy productivity in different irrigation systems can play a significant role in optimizing energy consumption and improving water resource management. This study aims to examine the energy consumption patterns in irrigated wheat and alfalfa production in the downstream lands of the Soural Reservoir Dam in Kurdistan Province and compare the energy productivity of surface and sprinkler irrigation systems.

Method

This field study was conducted on 37 farms covering a total area of 76 hectares in the downstream lands of the Soural Dam. The studied farms were categorized into four groups based on crop type and irrigation system:

- ✓ Systems 1 and 2: Wheat farms equipped with surface and fixed-classic sprinkler irrigation systems with movable sprinklers, utilizing gravitational energy.
- ✓ Systems 3 and 4: Alfalfa farms equipped with surface and fixed-classic sprinkler irrigation systems with similar energy supply characteristics.

The required data, including the amount of input (consumed) and output (produced) energy in each system, were collected through in-person questionnaires from farmers during the 2019–2020 cropping season. To enhance data accuracy, information regarding water consumption and other inputs was verified and refined through consultations with relevant organizations such as the Kurdistan Regional Water Authority and agricultural experts. Energy indices, including total input and output energy, energy ratio, specific energy, and energy productivity, were calculated.

Results

The results of this study indicated that the consumption of chemical fertilizers, particularly nitrogen, in wheat farms and irrigation water in alfalfa farms had the greatest impact on increasing energy input. The total input and output energy for different systems were calculated as follows:

- ✓ Wheat: System 1 (29,733.16 MJ/ha input, 66,450 MJ/ha output) and System 2 (46,347.05 MJ/ha input, 96,000 MJ/ha output).
- ✓ Alfalfa: System 3 (52,054.70 MJ/ha input, 189,600 MJ/ha output) and System 4 (39,147.48 MJ/ha input, 229,100 MJ/ha output).

The energy ratios in the studied systems were calculated as 2.32, 2.07, 3.64, and 5.85, respectively. Additionally, the specific energy and energy productivity indices were estimated as 6.32, 6.81, 3.27, and 2.69 MJ/kg and 0.12, 0.10, 0.29, and 0.37 kg/MJ, respectively.

An analysis of these indices revealed that in wheat farms, energy productivity was higher in System 1 than in System 2, due to farmers' belief that increasing nitrogen fertilizer use would enhance yield. However, the grain yield of wheat in System 2 was approximately 1.40 times

higher than in System 1. on alfalfa farms, System 4 had higher energy productivity than System 3, primarily due to the significantly higher water consumption in System 3, which was 2.4 times that of System 4. One of the major challenges in irrigation management in this region was the delay in water release to farmers, which led to reduced productivity and increased resource wastage. This issue underscores the importance of implementing educational programs and optimizing energy consumption.

Conclusions

Based on the findings of this study, crop type and irrigation system have a significant impact on energy consumption and efficiency. In wheat farms, optimizing fertilizer input can lead to reduced energy input and improved system efficiency. on alfalfa farms, water management plays a crucial role in enhancing energy productivity. Additionally, implementing educational programs for farmers on energy and resource management can have a significant impact on improving efficiency and reducing environmental effects. Therefore, it is recommended that policymakers and agricultural planners emphasize modern water management techniques and agricultural input optimization to improve energy productivity and ensure the sustainability of agricultural production in the region.

Author Contributions

authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Data Availability Statement

Data Availability Statement

Ethical Considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Funding

Not applicable.

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest.



مقایسه بهره وری انرژی در سامانه های آبیاری سطحی و بارانی در کشت گندم و یونجه (مطالعه موردی: پایاب سد مخزنی سورال استان کردستان)

پیمان طهماسبی^۱، و حمید زارع ابیانه^۲✉

۱. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران. رایانامه: p.tahmasebi@agr.basu.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران. رایانامه: zare@basu.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۲۵ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۱/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۰۲ تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۴/۰۱	هدف: هدف از این مطالعه، بررسی الگوی مصرف انرژی در تولید محصولات گندم آبی و یونجه در اراضی پایاب سد مخزنی سورال در استان کردستان و تحلیل شاخص های انرژی نظیر نسبت انرژی، انرژی ویژه و بهره وری انرژی باتوجه به نوع سامانه های آبیاری و نهاده های مصرفی است. روش پژوهش: در پژوهش حاضر، ۳۷ مزرعه به مجموع مساحت ۷۶ هکتار، انتخاب شدند. مزارع مورد مطالعه به سامانه های ۱ و ۲ برای گندم و سامانه های ۳ و ۴ برای یونجه گروه بندی شدند. سامانه های ۱ و ۳ مجهز به سامانه آبیاری سطحی و سامانه های ۲ و ۴ مجهز به سامانه آبیاری بارانی کلاسیک ثابت با آبپاش های متحرک، با منبع انرژی ثقل بودند. اطلاعات مورد نیاز، شامل کل نهاده های مصرفی (ورودی)، در قالب پرسشنامه از کشاورزان دشت مذکور در طول فصل زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ استخراج شدند. یافته ها: نتایج نشان داد که بیشترین مصرف انرژی در نظام زراعی گندم مربوط به کودهای شیمیایی، به ویژه کود نیتروژن، و در نظام زراعی یونجه، مربوط به آب آبیاری در سامانه ۳ و کود شیمیایی در سامانه ۴ بوده است. مجموع انرژی ورودی مزارع به ترتیب ۲۹۷۳۳/۱۶، ۴۶۳۴۷/۰۵، ۵۲۰۵۴/۷ و ۳۹۱۴۷/۴۸ و کل انرژی خروجی ۶۶۴۵۰، ۹۶۰۰۰، ۱۸۹۶۰۰ و ۲۲۹۱۰۰ مگا ژول در هکتار بود. شاخص های نسبت انرژی به ترتیب ۲/۳۲، ۲/۰۷، ۳/۶۴ و ۵/۸۵ و انرژی ویژه به ترتیب ۶/۳۲، ۶/۸۱، ۳/۲۵ و ۲/۶۹ مگا ژول در هکتار محاسبه شد. بهره وری انرژی به ترتیب ۰/۱۲، ۰/۱۰، ۰/۲۹ و ۰/۳۷ کیلوگرم در مگا ژول به دست آمد. نتیجه گیری: نتایج نشان داد که مصرف زیاد کود نیتروژنی در مزارع گندم و آب آبیاری در مزارع یونجه منجر به افزایش قابل توجه انرژی ورودی شده است. همچنین، تأخیر در رهاسازی آب به کشاورزان از جمله چالش های اصلی مدیریت آبیاری در منطقه محسوب می شود. به منظور افزایش بهره وری انرژی و کاهش آثار زیست محیطی، آموزش کشاورزان در زمینه مدیریت بهینه انرژی و مصرف منابع پیشنهاد می شود.

استناد: طهماسبی، پیمان؛ و زارع ابیانه، حمید. (۱۴۰۴). مقایسه بهره وری انرژی در سامانه های آبیاری سطحی و بارانی در کشت گندم و یونجه (مطالعه موردی: پایاب

سد مخزنی سورال استان کردستان). *فناوری های پیشرفته در بهره وری آب*، ۵ (۲)، ۷۲-۹۳.

<http://doi.org/10.22126/atwe.2025.11936.1160>



مقدمه

باتوجه به خشک‌سالی‌های اخیر، کاهش میزان بارندگی و افزایش دمای جهانی ناشی از گرمایش زمین، اهمیت آب به طور فزاینده‌ای موردتوجه قرار گرفته است. این شرایط باعث می‌شود که امنیت غذایی و تأمین آن، که به‌طور مستقیم به کشاورزی آبی وابسته است، به یکی از چالش‌های اساسی بشر تبدیل شود (سرن و ییلدیریم^۱، ۲۰۲۵). همچنین آب، به‌عنوان اصلی‌ترین نهاده کشاورزی، کمبود آن در مناطق خشک و نیمه‌خشک، محدودیت‌های توسعه کشاورزی را تشدید می‌کند (ریحانی و خاشعی سیکویی، ۱۳۹۴). انرژی در کشاورزی به‌عنوان عامل کلیدی در افزایش بهره‌وری، بهینه‌سازی فرآیندهای تولید و کاهش هزینه‌ها نقش اساسی دارد. از انرژی برای آبیاری، عملیات مکانیزه و فرآوری محصولات استفاده می‌شود که درنهایت بر کار آبی تولید، پایداری منابع و کاهش اثرات زیست‌محیطی تأثیرگذار است (پنگ و همکاران^۲، ۲۰۲۴). بخش کشاورزی به‌عنوان یک سامانه پیچیده، ارتباط تنگاتنگی با منابع انرژی برقرار می‌کند (کس^۳، ۲۰۲۴) زیرا تولید محصولات کشاورزی به انرژی ورودی و خروجی مزارع بستگی دارد (طهماسبی و همکاران، ۱۴۰۳). کشاورزی، هم تولیدکننده و هم مصرف‌کننده بزرگ انرژی است (ناصری^۴، ۲۰۲۴). ازاین‌رو بخش کشاورزی و انرژی دو بخش به‌هم‌پیوسته و تأثیرگذار بریکدیگرند و توسعه پایدار هریک از این دو بخش، بر دیگری تأثیر مستقیم دارد (شی و همکاران^۵، ۲۰۲۴). انرژی به‌عنوان یکی از ارکان اساسی در سامانه‌های تولیدی، نقش اساسی در فرآیندهای تولیدی ایفا می‌کند. برای دستیابی به تولید پایدار، ضروری است که مصرف انرژی به‌دقت ارزیابی و مدیریت شود (تاکی و همکاران^۶، ۲۰۱۸). تحلیل دقیق مصرف انرژی در هر مرحله تولید، امکان شناسایی بخش‌های پرمصرف را فراهم کرده و با اعمال راهکارهای بهینه‌سازی، کارایی انرژی را افزایش می‌دهد. این فرآیند نه‌تنها موجب کاهش هزینه‌ها و افزایش بهره‌وری اقتصادی می‌شود، بلکه با کاهش مصرف انرژی، اثرات زیست‌محیطی نامطلوب را نیز کاهش خواهد داد (طهماسبی و همکاران، ۱۴۰۳). ازاین‌رو، تحلیل انرژی به‌عنوان ابزاری راهبردی در جهت دستیابی به تولید پایدار و بهره‌ور در کشاورزی و سایر بخش‌های تولیدی شناخته می‌شود. علاوه بر این، ارزیابی انرژی نهاده‌ها، ابزاری کلیدی در طراحی، مدل‌سازی و تحلیل عملکرد سامانه‌های کشاورزی محسوب شده و توسط پژوهشگران در سراسر جهان مورد استفاده قرار می‌گیرد (کیتانی^۷، ۱۹۹۹). ابعاد مزارع، میزان مکانیزاسیون و نوع محصول زراعی از عوامل مؤثر بر میزان مصرف انرژی در کشاورزی محسوب می‌شوند. به همین دلیل، سامانه‌های مختلف تولید محصولات کشاورزی الگوهای متنوعی از مصرف انرژی را ارائه می‌دهند (محمدی و همکاران^۸، ۲۰۱۴؛ و واحدی و ظریف‌نشاط^۹، ۲۰۲۱). انرژی در بخش کشاورزی از منظر نحوه مصرف (مستقیم و غیرمستقیم) و نوع منبع (تجدیدپذیر و تجدیدنپذیر) به چهار دسته طبقه‌بندی شده است. انرژی مستقیم که داخل مزرعه مصرف می‌شود (شامل سوخت ماشین‌آلات و الکترومپم‌ها، آب آبیاری و الکتریسیته)، انرژی غیرمستقیم که صرف تولید نهاده‌های کشاورزی (شامل کود، سم، بذر و ماشین‌آلات)؛ انرژی تجدیدپذیر (شامل نیروی انسانی، آب، کود حیوانی و بذر) می‌شود؛ و انرژی تجدیدنپذیر (شامل سوخت‌های فسیلی و انرژی مورد استفاده در تولید سموم، کودهای شیمیایی و ماشین‌آلات) که با مصرف آن‌ها منابع طبیعی محدود می‌گردد (احمدبیک و همکاران^{۱۰}، ۲۰۲۳). در

1. Şeren and Yildirim

2. Peng et al

3. Kiss

4. Nasser

5. Shi et al

6. Taki et al

7. kitani

8. Mohammadi et al

9. Vahedi & Zarifneshat

10. Ahmadbeyki et al

فرآیند تولید محصولات کشاورزی، نهاده‌های انرژی مصرفی همچون سوخت، برق، ماشین‌آلات، بذر، کود و سموم سهم قابل توجهی در مصرف انرژی کل نهاده دارند (همدانی و همکاران^۱، ۲۰۱۱). در ایران، انرژی مستقیم مصرفی در بخش کشاورزی حدود ۲۰۴/۳۷ پتاژول برآورد شده، که ۳/۵ درصد از کل انرژی فسیلی و برق کشور را شامل می‌شود. این میزان انرژی صرف مواردی مانند آبیاری، ماشین‌آلات و تجهیزات کشاورزی می‌شود (وزارت نیرو، ۱۳۸۴). با این وجود، به دلیل افزایش استفاده از نهاده‌های کشاورزی (کود، سم، بذر و غیره) و ادوات ماشین‌آلات، مصرف انرژی در این بخش رو به افزایش است. از این رو باتوجه به مطالب ذکر شده انرژی و آب به عنوان دو نهاده مهم و اصلی در تولیدات کشاورزی، نقش اساسی در تضمین امنیت غذایی و بهبود کیفیت زندگی انسان‌ها دارند (هان و همکاران^۲، ۲۰۲۰). بنابراین برای دستیابی به پایداری منابع، مدیریت هماهنگ این سه منبع (انرژی، آب و غذا) امری ضروری است (پورواتو و همکاران^۳، ۲۰۲۱). به این لحاظ درک صحیح و ارزیابی بهره‌وری آب و انرژی در سامانه‌های آبیاری، امکان مدیریت کارآمدتر و بهینه‌سازی این منابع محدود و ارزشمند را فراهم می‌آورد (غلامی و همکاران، ۱۳۹۴). در این راستا سامانه‌های پیشرفته آبیاری به منظور بهره‌برداری بهینه از منابع آب، پیشرفت قابل توجهی داشته‌اند. علاوه بر این، آگاهی از میزان مصرف آب و انرژی، بهره‌وری آن‌ها و تحلیل این منابع در سامانه‌های آبیاری تحت بارانی، و مقایسه آن‌ها با سایر سامانه‌ها، امری ضروری به شمار می‌آید (طهماسبی و همکاران، ۱۴۰۳).

گندم به عنوان یک محصول استراتژیک، نقش مهمی در امنیت غذایی و اقتصاد ملی دارد (حیدری و تاران^۴، ۲۰۲۵) و با کشت سالانه در بیش از ۲۰۰ میلیون هکتار از اراضی کشاورزی جهان، به گسترده‌ترین محصول زراعی تبدیل شده است که تغذیه بیش از ۲۱ درصد جمعیت دنیا را تأمین می‌کند (سنبتا و ورکو^۵، ۲۰۲۳). از سوی دیگر، یونجه که به عنوان (ملکه علوفه‌ها) شناخته می‌شود، به طور گسترده به عنوان یک گیاه علوفه‌ای ارزشمند کشت می‌گردد (رحمان و همکاران^۶، ۲۰۲۵). در ایران، این محصول حدود ۶۴۰ هزار هکتار از اراضی زراعی را به خود اختصاص داده که معادل ۵/۴۱ درصد از کل سطح زیر کشت محصولات زراعی و ۶۲/۸ درصد از کل سطح زیر کشت نباتات علوفه‌ای کشور است. تولید سالانه یونجه نیز حدود ۵/۸ میلیون تن برآورد گردیده که ۷/۸۸ درصد از کل تولید محصولات زراعی و ۳۱/۷ درصد از تولید نباتات علوفه‌ای را تشکیل داده است (قادرپور و همکاران، ۱۳۹۶). باتوجه به نقش اساسی گندم و یونجه در امنیت غذایی و اقتصاد ملی، سیاست‌گذاری در حوضه آب و انرژی باید به این دو محصول توجه ویژه‌ای داشته باشد. از این رو، یونجه و گندم به عنوان دو گیاه مورد بررسی در این تحقیق انتخاب شده‌اند، زیرا هر کدام جایگاه مهمی در نظام کشاورزی ایران دارند.

ادبیات موضوع و پیشینه پژوهش

در مناطق خشک و نیمه‌خشک که بارندگی کم است اکثر آب مورد نیاز گیاه از آب زیرزمینی و از طریق آب چاه تأمین می‌شود که این امر ممکن است موجب فرونشست زمین گردد (گودرزی و همکاران^۷، ۲۰۲۳).

بایزیدی و کاکای (۱۴۰۰) نشان دادند که برداشت بی‌رویه از آبخوان، منجر به کسری تجمعی ۱۷/۴ میلیون متر مکعبی آب آبخوان شده است.

1. Hamedani et al
2. Han et al
3. Purwanto et al
4. Heydari and Taran
5. Senbeta & Worku
6. Goodarzi et al
7. Rahman et al

قهرودی تالی و همکاران (۱۴۰۲) نشان دادند که افت شدید سطح آب زیرزمینی در دشت دهگلان طی سال‌های ۱۳۹۲ تا ۱۴۰۰ منجر به فرونشست سالانه ۶ سانتی‌متری زمین شده است که پیامدهای جبران‌ناپذیری از جمله تخریب زیرساخت‌ها و کاهش بهره‌وری کشاورزی را به همراه دارد.

فرونشست زمین که ناشی از برداشت بیش از حد آب‌های زیرزمینی است، می‌تواند باعث آسیب‌های گسترده‌ای مانند شکست جاده‌ها، تخریب مناطق مسکونی و آسیب به خطوط راه‌آهن و تأسیسات آب و گاز شود. تحقیقات نشان می‌دهند که استخراج بیش از حد از آبخوان‌ها منجر به کاهش سطح آب زیرزمینی، کاهش کیفیت آب و در نهایت آسیب به این منابع ارزشمند می‌گردد (گودزی و همکاران، ۱۴۰۴). در این راستا احداث سدها یکی از راهکارهای مؤثر در مدیریت پایدار منابع آب محسوب می‌شود، زیرا امکان ذخیره‌سازی آب در دوره‌های پربارش و تأمین آن در دوره‌های کم‌آبی را فراهم می‌سازد. این فرآیند نه تنها تعادل چرخه هیدرولوژیکی را حفظ می‌کند، بلکه با بهبود بهره‌وری در بخش کشاورزی، از افت بیش‌تر آبخوان‌ها جلوگیری کرده و در صورت مدیریت اصولی، به پایداری محیط‌زیست کمک می‌نماید. سد مخزنی سورال، واقع در سه کیلومتری جنوب غربی روستای سورال در شهرستان دهگلان استان کردستان، با اهداف تأمین آب کشاورزی احداث شده است. این سد با ارتفاع ۴۵ متر و طول تاج ۲۴۰ متر، ظرفیت ذخیره‌سازی تقریبی ۱۱ میلیون مترمکعب آب را داراست؛ به علاوه، اراضی پایاب آن شامل بیش از ۱۲۰۰ هکتار از زمین‌های زراعی مرغوب با کیفیت بالا که به دلیل آلوده نشدن به عناصر کشاورزی اکثر زمین‌ها بکر می‌باشد که با سامانه‌های آبیاری تحت فشار تجهیز شده‌اند. احداث این سد نقشی کلیدی در توسعه کشاورزی منطقه ایفا کرده و با تأمین منابع آب پایدار، زمینه افزایش تولیدات زراعی و بهبود معیشت کشاورزان را فراهم آورده است. همچنین، سد سورال با ایجاد فرصت‌های شغلی در بخش‌های مرتبط با کشاورزی و آبزی‌پروری، به رونق اقتصادی منطقه نیز سهم بسزایی داشته است.

اراضی پایین‌دست سد مخزنی سورال، به‌طور عمده از سامانه‌های آبیاری بارانی کلاسیک ثابت با آبیاش‌های متحرک بهره‌برداری می‌شد. علاوه بر این، در برخی مزارع، سامانه‌های آبیاری سطحی و آبیاری بارانی کلاسیک نیمه‌ثابت نیز به‌کار گرفته شده بود. سامانه‌های آبیاری بارانی کلاسیک ثابت با آبیاش‌های متحرک به‌منظور راندمان بالای آبیاری، در اراضی پایاب سد سورال به‌کار گرفته شده بود به دلیل ارزیابی نکردن و نبود مدیریت صحیح بهره‌وری بالا محقق نشده است. همچنین حدود ۱۵ هکتار از اراضی پایاب سد مذکور از سامانه‌های آبیاری سطحی که بیش‌از به‌عنوان روش اصلی آبیاری در این دشت استفاده می‌شد، آب موردنیاز این اراضی از حقایبه محیط‌زیست سد تأمین می‌گردید. سامانه‌های کلاسیک ثابت با آبیاش‌های متحرک معمولاً نیاز به انرژی قابل‌توجهی دارند و در این منطقه، نیروی ثقل (شیب) به‌عنوان منبع اصلی انرژی برای انتقال و توزیع آب در داخل مزارع مذکور مورد استفاده قرار گرفته می‌شد. انرژی نقش بسیار مهمی در حوضه کشاورزی و سامانه‌های آبیاری دارد (غلامی و همکاران، ۱۳۹۴). در واقع، توزیع انرژی در سامانه‌های آبیاری، یکی از اجزای اساسی سامانه‌های آبیاری تحت فشار به‌شمار می‌آید. با توجه به محدودیت‌های موجود در منابع انرژی و افزایش مداوم هزینه‌های تولید، ارتقاء بهره‌وری انرژی در بخش کشاورزی به یک نیاز ضروری و اجتناب‌ناپذیر تبدیل شده است. برای دستیابی به مدیریت بهینه منابع انرژی، شناخت دقیق الگوهای مصرف انرژی در سامانه‌های آبیاری، اولین گام برای بهبود کارایی و کاهش هدررفت منابع ارزشمند است (طهماسبی و همکاران، ۱۴۰۳). امنیت غذایی و تولید کشاورزی از جمله چالش‌های عمده‌ای هستند که بشریت با آن‌ها مواجه است و به‌طور مستقیم به انرژی وابسته‌اند. برای مواجهه با این چالش‌ها، لازم است راه‌کارهایی جهت کاهش مصرف انرژی، افزایش بهره‌وری و بهره‌گیری از منابع انرژی تجدیدپذیر در بخش کشاورزی ارائه شود. بهره‌وری انرژی در کشاورزی زمانی به حداکثر می‌رسد که سامانه‌های آبیاری مزارع، علاوه بر عملکرد هیدرولیکی مناسب، از مصرف بهینه انرژی نیز برخوردار باشند (سانچز ساتیل و کانو ارتگا، ۲۰۲۱). مطالعات مختلفی در مورد توازن انرژی در سامانه‌های زراعی به انجام رسیده است که در ادامه به تعدادی از آن‌ها اشاره شده است.

۱. مطالعات داخلی

طهماسبی و همکاران (۱۴۰۳) با بررسی مقایسه‌ای کارایی انرژی دو سامانه آبیاری بارانی کلاسیک ثابت با آبیاش‌های متحرک و لوله چرخ‌دار در کشت گندم آبی به ترتیب کل انرژی ورودی و انرژی خروجی ۶۹۱۸۹/۰۴ و ۸۵۹۴۳/۹۷ مگاژول در هکتار، و ۱۱۰۷۰۰ و ۱۵۰۱۰۰ مگاژول در هکتار محاسبه کرده بودند. بر این اساس مقادیر شاخص کارایی انرژی مصرفی در دو سامانه به ترتیب ۱/۶۰ و ۱/۷۵ درصد محاسبه شده بود.

اوجاقلو و همکاران (۱۴۰۲) در بررسی تأثیر مدیریت آبیاری بر شاخص‌های بهره‌وری مصرف آب گیاه یونجه در استان زنجان، میانگین حجم آب مصرفی در مزارع یونجه را حدود ۱۴۲۵۰ مترمکعب در هکتار گزارش کردند. همچنین، میانگین شاخص بهره‌وری مصرف آب معادل ۰/۷۹ کیلوگرم بر مترمکعب، و شاخص‌های بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی آب به ترتیب ۱۶/۱ و ۸/۹ هزار ریال بر مترمکعب به دست آوردند.

عاشوری و همکاران (۱۴۰۲) با ارزیابی میزان مصرف آب و انرژی در مزارع شبکه قزوین دریافتند که در تمامی محدوده‌های زراعی درجه دو، بالاترین سهم مصرف انرژی مستقیم مربوط به سوخت دیزل بوده که ۴۰ درصد از کل انرژی مصرفی را به خود اختصاص داده بود. در بخش انرژی غیرمستقیم نیز، کود نیتروژن با سهم ۲۰ درصدی، به عنوان اصلی‌ترین نهاده انرژی بر شناسایی شد.

قدیمی‌فیروزآبادی و اکبری (۱۴۰۲) تأثیر انواع سامانه‌های آبیاری بر میزان مصرف آب و عملکرد محصول گندم را در استان همدان بررسی کردند. نتایج پژوهش نشان داد که میانگین حجم آب مصرفی در سامانه‌های آبیاری قطره‌ای، بارانی و سطحی به ترتیب ۴۱۵۳، ۴۰۹۰ و ۵۹۱۸ مترمکعب در هکتار بوده است. همچنین، میزان عملکرد محصول در سامانه آبیاری قطره‌ای ۵۵۸۱ کیلوگرم در هکتار گزارش شد، درحالی‌که این مقدار برای سامانه‌های آبیاری بارانی و سطحی به ترتیب ۴۳۸۱ و ۳۰۰۰ کیلوگرم در هکتار اندازه‌گیری شد.

بهرامی‌بوانی و همکاران (۱۳۹۳) نشان دادند که در اهواز، مصرف انرژی در سامانه آبیاری تحت فشار بیش‌تر از سطحی است، اما با مدیریت صحیح، مصرف آب ۶۷ درصد کاهش می‌یابد. بهره‌وری انرژی در سامانه تحت فشار کمی پایین‌تر از آبیاری سطحی است.

۲. مطالعات خارجی

قاسمی‌مبتکر و همکاران^۱ (۲۰۲۲) در پژوهشی به ارزیابی شاخص‌های مصرف انرژی و آب در تولید علوفه هیدروپونیک در منطقه مرکزی ایران (اصفهان) پرداختند. این مطالعه که بر اساس پرسش‌نامه‌های شفاهی انجام شد، نشان داد که کل انرژی مصرفی برای تولید یک تن علوفه هیدروپونیک برابر با ۵۰۶۰/۴۰ مگاژول بوده است. همچنین، نسبت بهره‌وری انرژی و نسبت انرژی به ترتیب ۰/۲۰ و ۰/۳۳ کیلوگرم در مگاژول برآورد کردند.

باتوجه به اهمیت مصرف آب و انرژی در کشاورزی و سهم بالای آن‌ها در تولید محصولات زراعی، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، استفاده از سامانه‌های آبیاری تحت فشار، از جمله سامانه آبیاری بارانی کلاسیک ثابت با آبیاش‌های متحرک، در این سال‌ها رایج شده است. با این حال، در ارتباط با روند مصرف انرژی در این سامانه‌ها مطالعات کافی وجود ندارد؛ بنابراین، هدف این مطالعه بررسی روند مصرف انرژی و شاخص‌های انرژی در تولید محصولات گندم و یونجه با استفاده از سامانه آبیاری بارانی کلاسیک و مقایسه آن با سامانه آبیاری سطحی بود.

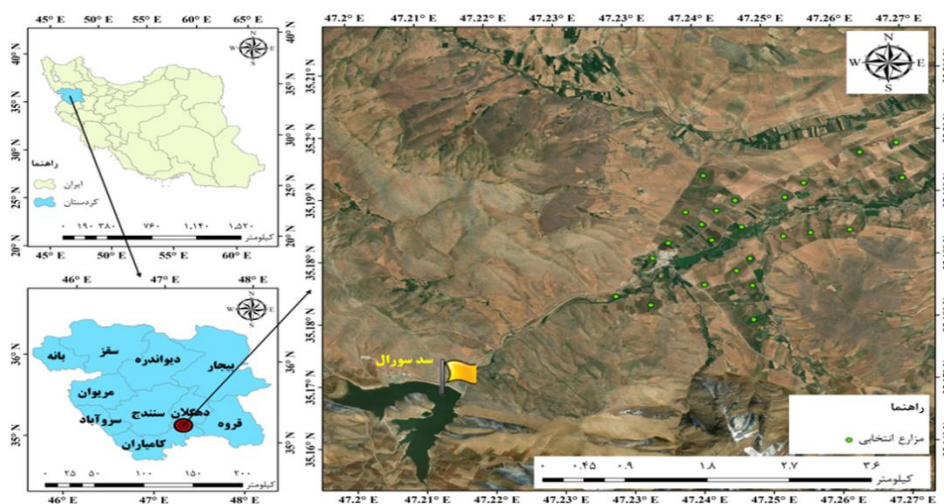
روش پژوهش

۱. ویژگی‌های مکانی و جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

سد مخزنی سورال و زمین‌های پایاب آن به‌عنوان یکی از مناطق استراتژیک کشاورزی مکانیزه در غرب ایران، نقش مهمی در اقتصاد و کشاورزی استان کردستان ایفا می‌کند. این منطقه در فاصله ۳ کیلومتری جنوب غربی روستای سورال و ۲۶ کیلومتری شرق شهرستان دهگلان قرار دارد و با مختصات جغرافیایی بین ۳۵/۱۷ تا ۳۵/۲۰ درجه شمالی و ۴۷/۲۲ تا ۴۷/۲۸ درجه شرقی مشخص شده است. ارتفاع این ناحیه از سطح دریا ۱۸۹۰ متر است و میانگین بارندگی سالانه آن در بازه زمانی ۱۳۹۰ تا ۱۴۰۰ بین ۴۵۵ تا ۶۰۰ میلی‌متر متغیر بوده است. مساحت اراضی زیر کشت در این منطقه حدود ۱۲۵۰ هکتار است که شامل محصولات عمده‌ای مانند گندم، سیب‌زمینی، یونجه، پیاز و گوجه‌فرنگی می‌شود. نوع سامانه آبیاری مورد استفاده در این اراضی، سامانه‌های آبیاری سطحی و سامانه آبیاری بارانی از نوع کلاسیک ثابت با آبپاش‌های متحرک است که با استفاده از انرژی نیروی جاذبه (ثقل) نیاز آبی محصولات را تأمین می‌کند. همچنین در دشت مذکور، ۳۷ مزرعه به‌طور تصادفی و پراکنده با مجموع مساحت ۷۹ هکتار انتخاب شدند. این مزارع در چهار گروه بر اساس جدول (۱) دسته‌بندی گردیده‌اند. شکل (۱) نیز موقعیت جغرافیایی سد مخزنی سورال و مزارع انتخابی را در سطح کشور، به ویژه در استان کردستان، شهرستان دهگلان و مناطق پایین‌دست آن به تصویر می‌کشد.

جدول ۱. نام‌گذاری مزارع مورد مطالعه

مزارع	
سامانه (۱)	سامانه آبیاری بارانی کلاسیک ثابت با آبپاش‌های متحرک با منبع تأمین انرژی ثقل در مزارع گندم آبی
سامانه (۲)	سامانه آبیاری سطحی با منبع تأمین انرژی ثقل در مزارع گندم آبی
سامانه (۳)	سامانه آبیاری بارانی کلاسیک ثابت با آبپاش‌های متحرک با منبع تأمین انرژی ثقل در مزارع یونجه
سامانه (۴)	سامانه آبیاری سطحی با منبع تأمین انرژی ثقل در مزارع یونجه



شکل ۱. موقعیت مزارع، سد مخزنی سورال، منطقه مورد مطالعه، شهرستان دهگلان، استان کردستان.

۲. روش جمع آوری داده‌ها و ثبت اطلاعات

برای این تحقیق، اطلاعات لازم شامل جزئیات مربوط به عملیات زراعی، نوع و مقدار نهاده‌های مصرفی و عملکرد محصولات گندم آبی (گونه پیشگام) و یونجه، از طریق مراجعه مستقیم به کشاورزان منطقه و تکمیل پرسش‌نامه‌ها به صورت حضوری در سال زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ گردآوری شد. برای تأیید صحت داده‌ها، اطلاعات به دست آمده با آمار و داده‌های موجود در سازمان جهاد کشاورزی استان کردستان و همچنین مشورت با کارشناسان و متخصصان کشت گندم و یونجه در منطقه بررسی و تأیید گردید. تجربیات کشاورزان نیز با داده‌های کارشناسان مقایسه شد تا از دقت اطلاعات اطمینان حاصل شود. پس از جمع‌آوری داده‌ها، میانگین‌گیری برای هر پارامتر انجام شد تا نتایج دقیق‌تری به دست آید. یکی از بخش‌های مهم این تحقیق، استفاده از ضرایب هم‌ارزی انرژی بود که برای مقایسه منابع مختلف انرژی، از جمله سوخت، بذر و سایر نهاده‌ها به کار رفت. این ضرایب به ما کمک کردند تا تمام انرژی‌ها را به یک واحد معادل تبدیل کنیم و در نتیجه، مقایسه‌ای دقیق و جامع بین مصرف انرژی برای تولید محصولات گندم و یونجه و دیگر نهاده‌ها انجام دهیم. در مرحله بعد، داده‌های مربوط به انرژی ورودی و خروجی برای تولید این محصولات تجزیه و تحلیل شدند تا میزان انرژی مصرفی و الگوهای مصرف آن بهتر درک شود. در این مزارع، گندم آبی و یونجه به عنوان محصولات کشت شده مورد استفاده قرار گرفتند. لازم به ذکر است که محصول یونجه به مدت سه سال کشت و بهره‌برداری می‌گردید؛ بنابراین به همین دلیل، از محاسبه بذر مصرفی در نهاده‌های ورودی صرف نظر گردید.

جدول ۲. هم‌ارزی انرژی برای نهاده‌های ورودی و خروجی محصول گندم و یونجه (کیتانی، ۱۹۹۹)

انرژی نهاده یا ستانده	واحد	معادل انرژی (مگاژول در واحد)
انرژی نهاده ورودی		
نیروی انسانی	ساعت	۱/۹۶
تراکتور	ساعت	۱۳۸
ماشین‌ها	ساعت	۶۲/۷۰
کمپاین	ساعت	۱۱۶
سوخت گازوئیل	لیتر	۵۶/۳۱
نیتروژن	کیلوگرم	۶۶/۱۴
فسفات	کیلوگرم	۱۲/۴۴
کود حیوانی	کیلوگرم	۰/۳۰
آفت کش	کیلوگرم	۱۲۰
آب آبیاری	مترمکعب	۱/۰۲
الکتریسیته مصرفی	کیلووات ساعت	۱۱/۹۳
بذر گندم آبی	کیلوگرم	۱۴/۷۰
بذر یونجه	کیلوگرم	۲۸/۱۰
انرژی نهاده خروجی		
دانه گندم آبی	کیلوگرم	۱۴/۷۰
کاه و کلش	کیلوگرم	۱۲/۵۰
یونجه با رطوبت ۱۵٪	کیلوگرم	۳/۶۰

۳. نهاده‌های مصرفی (ورودی) و تولیدی (خروجی)

مصرف نیروی انسانی در فرآیندهای مختلف کشاورزی، شامل شخم‌زنی، تسطیح زمین، مرزبندی، دیسک‌زنی، آبیاری، کاشت بذر، کودپاشی، سم‌پاشی، برداشت محصول و حمل و نقل، از طریق ثبت دقیق ساعات کاری کارگران و رانندگان تراکتور و ماشین‌ها تعیین گردید. به منظور محاسبه میزان انرژی مصرفی ناشی از این فعالیت‌ها، ساعات کاری ثبت شده با استفاده از ضریب استاندارد ۱/۹۶ مگاژول به ازای هر ساعت کار، به انرژی معادل تبدیل شد. انواع ادوات و ماشین‌آلات کشاورزی به عنوان یکی از عوامل

کلیدی در ارزیابی مصرف انرژی نقش اساسی داشتند. در این پژوهش، مدت زمان فعالیت انواع ماشین‌آلات و ادوات کشاورزی، از مرحله کاشت تا برداشت و حمل و نقل، به‌دقت ثبت شد تا تأثیر آن‌ها بر کل مصرف انرژی در فرآیندهای زراعی به‌طور جامع تحلیل گردد. مقدار سوخت مصرفی (گازوئیل) در هر یک از ماشین‌آلات کشاورزی، شامل عملیات شخم‌زنی، آبیاری، کوددهی، سم‌پاشی، برداشت و حمل و نقل محصولات گندم تا سیلو و یونجه به خرمن و انبار، به‌دقت اندازه‌گیری شد. سپس، با استفاده از ضرایب معادل انرژی سوخت، مقادیر به واحد مگاژول در هکتار تبدیل گردید. محاسبه دقیق این شاخص‌ها نقش مهمی در تحلیل کارایی انرژی و بررسی الگوی مصرف منابع در سامانه‌های کشاورزی ایفا می‌کند. کودهای شیمیایی، به‌ویژه نیتروژن و فسفر، که از عوامل اصلی در کشاورزی مدرن به‌شمار می‌روند، در این پژوهش مورد ارزیابی قرار گرفتند و میزان مصرف آن‌ها در مزارع محاسبه گردید. این کودها با فراهم آوردن مواد مغذی ضروری برای گیاهان، تأثیر چشمگیری بر رشد و عملکرد محصولات کشاورزی دارند. علاوه بر این، در تمامی مزارع گندم از کود دامی استفاده شده بود که مقدار مصرف آن نیز به‌دقت ثبت و در نهایت، برای محاسبه انرژی مصرفی این نهاده‌ها، از ضرایب معادل‌سازی انرژی به مگاژول در هکتار استفاده شد. سموم شیمیایی برای کنترل آفات و بیماری‌ها در فرآیندهای کشاورزی به‌طور جامع مورد تحلیل قرار گرفت. این ترکیبات شیمیایی که به‌عنوان نهاده‌های ضروری در نظر گرفته می‌شوند، در انجام فعالیت‌های متنوع کشاورزی مانند مقابله با آفات و بیماری‌ها در دوران رشد گیاهان تأثیر قابل‌توجهی دارند و به‌طور مستقیم بر بهره‌وری و کیفیت محصول اثر می‌گذارند. یکی از نهاده‌های اصلی که در این مطالعه به‌طور دقیق محاسبه شد، آب مصرفی برای آبیاری مزارع بود. آب موردنیاز در دشت پایاب سورال از سد سورال تأمین می‌شود و با دبی ۱ لیتر در ثانیه برای هر هکتار اختصاص داده شده است. این آب به‌منظور تأمین نیاز آبی شبکه آبیاری بارانی در این مزارع استفاده می‌شود. برای ایجاد فشار مناسب در شبکه آبیاری، از نیروی ثقل بهره‌برداری شده و به‌این‌ترتیب، هیچ‌گونه نیروی الکتریکی در مزارع مورد مطالعه قرار نگرفته است. علاوه بر آن، میزان بذر مصرفی برای هر محصول نیز به‌دقت در هر هکتار محاسبه گردید و برای تعیین میزان انرژی مصرفی، از ضریب تبدیل خاص استفاده شده و مقدار انرژی بذر به مگاژول در هکتار محاسبه شد. در نهایت، عملکرد دانه‌های گندم آبی، کاه و کلش و یونجه، در واحد هکتار، ثبت و به‌عنوان نهاده‌های خروجی برای آنالیز شاخص‌های ارزیابی مورد بررسی قرار گرفت.

۴. سنجه‌های ارزیابی انرژی

باتوجه به معادل‌سازی انرژی نهاده‌های مصرفی و تولیدی، شاخص‌های انرژی محاسبه گردید. این شاخص‌ها به‌منظور مقایسه کارایی سامانه‌های مورد مطالعه قرار گرفتند. محاسبات مربوط به این شاخص‌ها با استفاده از روابط ۱ تا ۴ صورت گرفت. (کعب و همکاران^۱، ۲۰۲۴) تمامی داده‌های ثبت‌شده در طول فرآیند زراعی به‌طور گسترده در نرم‌افزار Excel وارد و محاسبات لازم از طریق آن انجام شد. علاوه بر این، سهم هر یک از انواع انرژی‌ها شامل انرژی‌های مستقیم (مانند نیروی انسانی، سوخت دیزل، برق و آب آبیاری)، انرژی‌های غیرمستقیم (شامل سایر نهاده‌های ورودی به جز انرژی‌های مستقیم)، انرژی‌های تجدیدپذیر (که شامل نیروی انسانی و بذر می‌شود) و انرژی‌های تجدیدناپذیر (که شامل سایر نهاده‌ها به‌جز انرژی‌های تجدیدپذیر است) محاسبه و ارزیابی گردید.

$$\text{نسبت انرژی} = \frac{\text{مگاژول در هکتار (مقدار انرژی خروجی)}}{\text{مگاژول در هکتار (مقدار انرژی ورودی)}} \quad (۱)$$

$$(2) \quad (\text{مگاژول در هکتار}) \text{ انرژی ورودی} - (\text{مگاژول در هکتار}) \text{ انرژی خروجی} = (\text{مگاژول در هکتار}) \text{ انرژی خالص}$$

$$(3) \quad \text{بهره وری انرژی مصرفی} = \frac{(\text{کیلوگرم در هکتار}) \text{ عملکرد محصول}}{(\text{مگاژول در هکتار}) \text{ انرژی ورودی}}$$

$$(4) \quad (\text{مگاژول در هکتار}) \text{ انرژی ورودی} = \frac{(\text{مگاژول در هکتار}) \text{ انرژی ورودی}}{(\text{کیلوگرم در هکتار}) \text{ عملکرد محصول}}$$

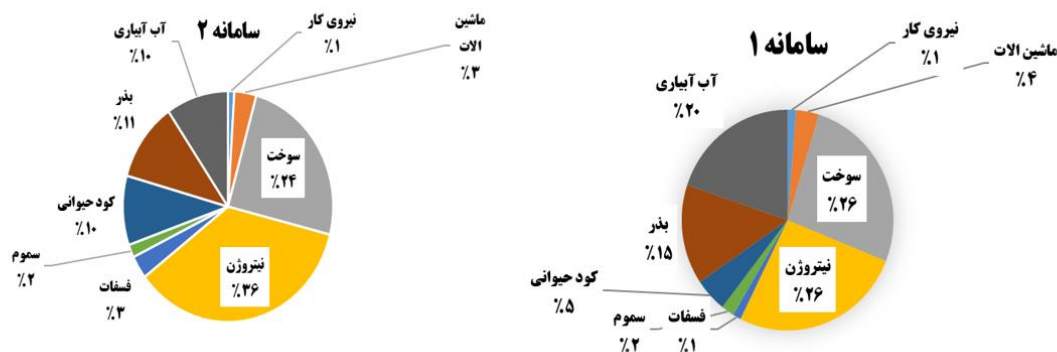
یافته های پژوهش

۱. ارزیابی و تجزیه و تحلیل انرژی ورودی و خروجی

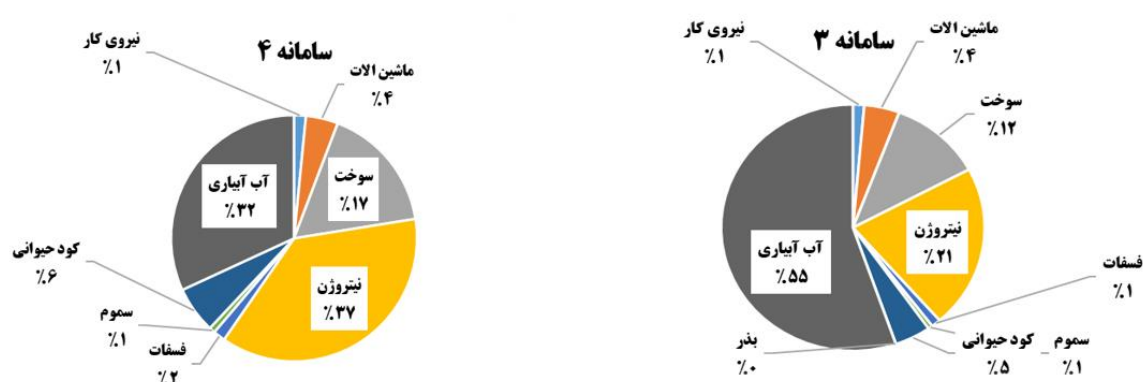
مقدار انرژی نهاده های ورودی (مصرفی) در مزارع انتخابی پایاب سد مخزنی سورال واقع استان کردستان برای تولید محصولات گندم آبی و یونجه در چهار سامانه مذکور در جدول (۳) ارائه شد. همچنین شکل های (۲) و (۳) سهم هر یک از نهاده های مصرفی (ورودی) را برای تولید محصولات موردنظر در هر سامانه را به تفکیک نمایش می دهد.

جدول ۳. میزان مصرف انرژی نهاده های مصرفی برای تولید محصولات گندم آبی و یونجه (مگاژول در هکتار)

انرژی نهاده ها	گندم آبی		یونجه	
	سامانه ۱	سامانه ۲	سامانه ۳	سامانه ۴
ورودی ها				
نیروی انسانی	۳۸۸/۰۸	۴۵۳/۷۴	۷۵۰/۶۸	۶۰۹/۵۶
ماشین آلات	۱۰۶۰	۱۵۶۸/۱۰	۱۵۶۸/۱۰	۱۵۶۵۶
سوخت	۷۴۶۳/۴۰	۱۱۳۷۴/۶۲	۶۱۹۴/۱	۶۵۳۱/۹۶
کود نیتروژنه	۷۹۳۶/۸۰	۱۶۵۳۵	۱۱۵۷۴/۵۰	۱۴۵۵۰/۸۰
کود فسفره	۳۷۳/۲۰	۱۴۹۲/۸۰	۶۲۲	۶۲۲
کود حیوانی	۱۵۰۰	۴۵۰۰	۲۴۰۰	۲۴۰۰
آفت کش	۶۰۰	۸۴۰	۳۰۰	۳۰۰
بذر گندم	۴۴۱۰	۵۱۴۵	-	-
آب آبیاری	۶۰۰۱/۶۸	۴۴۳۷/۷۹	۲۷۸۶۷/۴۲	۲۹۹۰۷/۴۲
کل انرژی ورودی	۲۹۷۳۳/۱۶	۴۶۳۴۷/۰۵	۵۲۰۵۴/۷۰	۳۹۱۴۷/۴۶
خروجی ها				
دانه گندم آبی	۵۱۴۵۰	۷۳۵۰۰	-	-
کاه و کلش	۱۵۰۰۰	۲۲۵۰۰	-	-
یونجه	-	-	۱۸۹۶۰۰	۲۲۹۱۰۰
کل انرژی خروجی	۶۶۴۵۰	۹۶۰۰۰	۱۸۹۶۰۰	۲۲۹۱۰۰



شکل ۲. سهم هریک از نهاده‌ها مصرفی، در تولید گندم آبی سامانه (۱) و سامانه (۲)



شکل ۳. سهم هریک از نهاده‌ها مصرفی، در تولید یونجه سامانه (۳) و سامانه (۴)

متوسط انرژی مصرفی کل و یا به عبارتی متوسط انرژی کل ورودی به مزارع دو سامانه (۱) و (۲)، به ترتیب $29733/16$ و $46347/05$ مگاژول در هکتار محاسبه شد. که تقریباً سامانه (۲)، $1/5$ برابر بیش‌تر از سامانه (۱) انرژی مصرفی داشت. تفاوت اساسی در میزان مصرف انرژی بین دو سامانه مورد بررسی محصول گندم آبی، عمدتاً به دلیل افزایش تقاضا برای نیروی کارگری، مصرف کودهای شیمیایی و مصرف سوخت بالاتر ماشین‌آلات کشاورزی در سامانه (۲) بازمی‌گردد. در مراحل ابتدایی تجهیز مزارع به سامانه آبیاری بارانی، به دلیل نبود مدیریت بهینه، عدم تجربه کافی کشاورزان و بهره‌برداران، و همچنین خرابی‌های مکرر و شکستگی تجهیزات سامانه‌های موجود در قطعه‌های زراعی پایاب سد سورال، نیاز به نیروی انسانی برای تعمیر، نگهداری و بهره‌برداری از این سامانه‌ها به‌طور قابل توجهی افزایش یافته بود. علاوه بر این، در سامانه (۲)، به دلیل کاربرد گسترده‌تر تجهیزات کشاورزی و افزایش استفاده از نهاده‌هایی همچون کودهای شیمیایی و دامی، میزان انرژی مصرفی به طرز چشم‌گیری افزایش یافت. زیرا اکثر کشاورزان بر این باور بودند که افزایش مصرف نهاده‌های کودی و انجام عملیات‌های متعدد زراعی، از جمله پخش گسترده کود دامی و استفاده بیش‌تر از آن‌ها، منجر به بهبود عملکرد نهایی محصولات می‌شود. در مقابل، در مزارعی که از سامانه آبیاری سطحی بهره می‌بردند سامانه (۱)، به دلیل راندمان پایین‌تر این روش آبیاری و استفاده محدودتر از نهاده‌های زراعی در مقایسه با سامانه (۲)، میزان مصرف انرژی ورودی کم‌تر گزارش شد. علاوه بر این، نبود انگیزه کافی در میان بهره‌برداران و کشاورزان در مزارع مجهز به سامانه (۱)، ناشی از عدم بازدهی اقتصادی مناسب به دلیل عملکرد پایین محصولات نهایی گندم آبی، سبب کاهش استفاده از نهاده‌های مؤثر بر عملکرد گردید. این عوامل در مجموع موجب تفاوت‌های چشم‌گیر در میزان مصرف انرژی نهاده‌های مصرفی و بهره‌وری زراعی بین دو سامانه مورد بررسی در سال زراعی $1399-1400$ شدند. طبق اطلاعات ارائه‌شده در شکل ۲، بیش‌ترین میزان مصرف انرژی در سامانه (۱) به‌ترتیب مربوط به سوخت (گازوئیل مصرفی ماشین‌آلات) و کودهای

شیمیایی با ۲۶/۶۹ درصد (معادل ۷۹۳۶/۸۰ مگاژول در هکتار)، و سپس آب آبیاری با ۲۰/۱۸ درصد (معادل ۶۰۰۱/۶۷ مگاژول در هکتار) بوده است. بذر مصرفی نیز با ۱۴/۸۳ درصد (معادل ۴۴۱۰ مگاژول در هکتار) و کود دامی با ۵/۰۴ درصد (معادل ۱۵۰۰ مگاژول در هکتار) در رتبه های بعدی قرار داشتند. علاوه بر این، مصرف انرژی ماشین آلات با ۳/۵۶ درصد (معادل ۱۰۶۰ مگاژول در هکتار) و نیروی کارگری با ۱/۳۰ درصد (معادل ۳۸۸/۰۸ مگاژول در هکتار) کمترین میزان انرژی مصرفی را به خود اختصاص داده بودند. در مقابل سامانه (۲)، بیشترین سهم مصرف انرژی به نیز هم مانند سامانه (۱) کودهای شیمیایی تعلق داشت که معادل ۳۸/۸۸ درصد (معادل ۱۸۰۲۷/۲۷ مگاژول در هکتار) از کل انرژی مصرفی را به خود اختصاص داد. پس از آن، مصرف سوخت ماشین آلات با ۲۴/۵۵ درصد (معادل ۱۱۳۷۴/۷۴ مگاژول در هکتار) و بذر مصرفی با ۱۱/۱۰ درصد (معادل ۵۱۴۵/۴۵ مگاژول در هکتار) قرار داشت. همچنین، مصرف کود حیوانی ۹/۷۰ درصد (معادل ۴۵۰۰ مگاژول در هکتار) و آب آبیاری ۹/۵۷ درصد (معادل ۴۴۳۷/۳۷ مگاژول در هکتار) سهم بعدی را داشتند. مشابه با سامانه (۱)، انرژی مصرفی ماشین آلات با ۳/۳۸ درصد (معادل ۱۵۶۸/۶۸ مگاژول در هکتار) و نیروی کارگری با ۰/۹۷ درصد (معادل ۴۵۳/۷۴ مگاژول در هکتار) کمترین سهم انرژی مصرفی را در طول فصل زراعی داشتند. همچنین، در میان کودهای شیمیایی مصرفی، کود نیتروژن بیشترین میزان انرژی مصرفی را در هر دو سامانه (۱ و ۲) به خود اختصاص داده بود.

متوسط انرژی مصرفی دو سامانه (۳) و (۴)، در محصول یونجه به ترتیب ۵۲۰۵۴/۷۰ و ۳۹۱۴۷/۴۸ مگاژول در هکتار بود. به طوری که سامانه (۳)، ۱/۳۳ برابر بیش تر از سامانه (۴) انرژی مصرفی داشت. از دلایل اصلی تفاوت در مصرف انرژی ورودی بین دو سامانه مذکور، به میزان مصرف آب آبیاری و کودهای شیمیایی مربوط می شد. علاوه بر این، ممکن است یکی از دلایل دیگر این تفاوت، این باشد که کشاورزان برای جبران کاستی ها ناشی از عدم مدیریت صحیح و عملکرد نامناسب سامانه آبیاری سطحی، اقدام به افزایش مصرف نهاده های کشاورزی در سامانه (۳) کرده باشند. در سامانه های آبیاری سطحی، به دلیل طراحی و عملکرد خاص این سامانه ها، توزیع آب در سطح مزرعه ممکن است یکنواخت نباشد و برخی از نقاط گیاهان آب بیشتری نسبت به سایر نقاط سطح کشت دریافت کنند. این نابرابری در توزیع آب می تواند منجر به هدررفت آب و افزایش مصرف این نهاده شود. علاوه بر این، در آبیاری سطحی، به دلیل پایین بودن راندمان کاربرد آبیاری، مقدار زیادی آب هدر می رود. این اتلاف آب عمدتاً به دلیل نفوذ عمیق آب در خاک، نشت آب از کانال های آب و متناسب نبودن ابعاد و شکل مزارع با مقدار آب و نحوه آبیاری است که مقدار زیادی آب هدر می رود که در مزارع مذکور این عوامل کاملاً مشهود بود (جلیلی و همکاران، ۱۳۹۸). بر اساس اطلاعات ارائه شده در شکل ۳، بیشترین میزان مصرف انرژی در سامانه (۳) به ترتیب به آب مصرفی (آب آبیاری) اختصاص دارد که معادل ۵۵/۲۸ درصد (۲۹۹۰۷/۴۲ مگاژول در هکتار) از کل انرژی مصرفی را شامل می شود. پس از آن، کودهای شیمیایی با ۲۲/۵۴ درصد (۱۲۱۹۶/۵۰ مگاژول در هکتار) و سوخت گازوئیل با ۱۱/۴۵ درصد (۶۱۹۴/۱۰ مگاژول در هکتار) قرار دارند. سایر نهاده ها شامل کود حیوانی با ۴/۴۳ درصد (۲۴۰۰ مگاژول در هکتار)، ماشین آلات با ۴/۳۳ درصد (۲۳۴۶ مگاژول در هکتار)، نیروی انسانی با ۱/۳۸ درصد (۷۵۰/۶۸ مگاژول در هکتار) و در نهایت سموم شیمیایی با ۰/۵۴ درصد (۳۰۰ مگاژول در هکتار) هستند که به ترتیب سهم کمتری از مصرف انرژی ورودی را به خود اختصاص داده اند. در سامانه (۴)، بیشترین سهم از مصرف انرژی ورودی به کودهای شیمیایی اختصاص داشت که معادل ۳۸/۷۵ درصد (۱۵۱۷۲/۸۰ مگاژول در هکتار) از کل انرژی مصرفی را شامل می شود. پس از آن، مصرف آب آبیاری با ۳۱/۸۷ درصد (معادل ۱۲۴۷۷/۱۵ مگاژول در هکتار) و سوخت گازوئیل با ۱۶/۶۸ درصد (معادل ۶۵۳۱/۹۶ مگاژول در هکتار) قرار دارند. سایر نهاده ها شامل کود حیوانی با ۶/۱۳ درصد (معادل ۲۴۰۰ مگاژول در هکتار)، ماشین آلات با ۴/۲۳ درصد (معادل ۱۶۵۶ مگاژول در هکتار)، نیروی انسانی با ۱/۵۵ درصد (معادل ۶۰۹/۵۶ مگاژول در هکتار) و در نهایت سموم شیمیایی با ۰/۷۶ درصد (معادل ۳۰۰ مگاژول در هکتار) بودند که کمترین سهم از مصرف انرژی ورودی در تولید محصول یونجه در مزارع پایاب سد را به خود اختصاص دادند. در مزارع سامانه (۳) که از آبیاری سطحی استفاده می شود، آب آبیاری بیشترین سهم از مصرف انرژی را به خود اختصاص داد. این امر به دلیل دسترسی کشاورزان به منابع آب زیاد از پایاب سد است، زیرا این مزارع از مقدار آبی که به محیط زیست اختصاص داده شده بود استفاده می کرد. همچنین به دلیل تراکم بالای گیاه یونجه، آب به کندی در سطح مزرعه حرکت کرده و مدت زمان رسیدن آب به انتهای مزرعه (زمان آبیاری) افزایش یافته بود. این موضوع موجب

افزایش زمان آبیاری و در نتیجه افزایش حجم آب عبوری به واحد سطح مزرعه می‌شود. همچنین، به دلیل کمبود دانش کشاورزان، کود شیمیایی به‌طور سطحی پخش شده و با حرکت آب، کود به انتهای مزرعه منتقل می‌شود و به این علت که از تجمع آن در مناطق خاص جلوگیری شود کود شیمیایی کمتر به نسبت مزارع (۴) در مزرعه مصرف می‌شد. در مقابل، در سامانه (۴) که از آبیاری بارانی کلاسیک ثابت با آبپاش‌های متحرک استفاده می‌شود، بیش‌ترین سهم مصرف انرژی ورودی مربوط به کودهای شیمیایی است. زیرا در این روش، تلفات ناشی از نفوذ عمقی آب کمتر از سامانه‌های آبیاری سطحی است. این امر به دلیل راندمان بالاتر سامانه‌های آبیاری بارانی است که آب را به‌طور یکنواخت در مزرعه توزیع می‌کنند همچنین چون آب در لابه‌لای گیاه حرکت نکرده و تراکم گیاه هیچ تاثیری در حرکت آب در داخل مزرعه نداشت در نتیجه زمان آبیاری کمتر و در نتیجه حجم آب آبیاری کمتر بود. در این سامانه‌ها، به دلیل توزیع بهینه آب، کشاورزان قادر به استفاده بیش‌تر از کود شیمیایی برای افزایش عملکرد محصول هستند، که منجر به مصرف بالاتر انرژی برای این نهاده در سامانه (۴) می‌شود. میزان مصرف نهاده‌های مربوط به مراحل مختلف کاشت، داشت و برداشت در طول یک فصل آبی تحت تأثیر عوامل مختلفی از جمله نوع محصول، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، طول دوره رشد، شرایط اقلیمی، نوع سامانه آبیاری، موقعیت و نوع منبع آب و همچنین منبع تأمین انرژی قرار دارد. طهماسبی و همکاران (۱۴۰۳)، مجموع انرژی ورودی برای هر هکتار از مزارع گندم آبی در دشت‌های دهگلان را $69189/04$ مگاژول برآورد کردند. تقی‌نژاد و واحدی (۱۴۰۰)، مجموع انرژی خروجی گندم آبی در استان اردبیل $65016/07$ مگاژول در هکتار به دست آوردند. میزان انرژی مصرفی برای تولید گندم آبی و یونجه در مناطق و شرایط مختلف و اقلیم متفاوت است به‌طوری‌که در شرایط منطقه‌ای مشهد در حدود $45367/63$ مگاژول در هکتار (قربانی و همکاران^۱، ۲۰۱۱)، در سیستان و بلوچستان بدون احتساب الکتریسیته مصرفی $32492/97$ مگاژول در هکتار (ضیائی و همکاران، ۱۳۹۲)، در استان اردبیل حدودا $38755/34$ مگاژول در هکتار (تقی‌نژاد و واحدی، ۱۴۰۰)، در ایالات ماماریای ترکیه $20635/50$ مگاژول در هکتار (تیپی و همکاران^۲، ۲۰۰۹) و در استان همدان (قاسمی-مبتکر، ۱۳۹۸) بدون احتساب آب مصرفی $47591/52$ مگاژول در هکتار گزارش شده بودند. در این مطالعه، تفاوت‌های مشاهده شده عمدتاً به مدیریت کشاورزی و نحوه استفاده از نهاده‌ها توسط کشاورزان مرتبط است. اگرچه میزان انرژی ورودی کمتر از تفاوت در بهره‌وری و کارایی انرژی تأثیرگذار است، اما شناسایی نهاده‌های مصرفی انرژی و تعیین سهم هر کدام در تولید محصول از اهمیت بالایی برخوردار است. به عبارت دیگر، نحوه مدیریت و استفاده از نهاده‌ها توسط کشاورزان، نقش مهم‌تری در تفاوت‌های مشاهده شده نسبت به میزان انرژی ورودی دارد. با این وجود، برای بهینه‌سازی تولید، شناسایی و تحلیل سهم هر یک از نهاده‌های مصرفی انرژی ضروری است. برای مثال، برخلاف نتایج این مطالعه که آب مصرفی و کودهای شیمیایی به‌عنوان پرمصرف‌ترین نهاده‌ها معرفی شدند، در شرایط منطقه‌ای نتایج متفاوتی گزارش شده است. در مشهد، مواد شیمیایی بیش‌ترین سهم از مصرف انرژی را داشتند (قربانی و همکاران، ۲۰۱۱) در استان‌های همدان و گرگان، سوخت‌های فسیلی غالب بودند (قاسمی-مبتکر، ۱۳۹۸)، و در سیستان و بلوچستان، مصرف کودهای شیمیایی بیش‌ترین میزان انرژی مصرفی را به خود اختصاص داد (ضیائی و همکاران، ۱۳۹۲). همچنین، در پژوهش‌هایی مانند تحقیق (تقی‌نژاد و واحدی، ۱۴۰۰)، مشخص شد که در تولید گندم آبی، الکتریسیته بیش‌ترین سهم از انرژی ورودی را داشت همچنین، در استان اصفهان $55/62$ درصد و در استان خراسان رضوی $50/37$ درصد از کل انرژی ورودی مربوط به این منبع بود. (بهرامی‌بوانی و همکاران، ۱۳۹۳) نشان داد که بیش‌ترین مصرف انرژی در عملیات آبیاری بوده و در سامانه آبیاری تحت‌فشار مصرف انرژی بیش‌تر از آبیاری سطحی است. مجموع انرژی خروجی، که بیان‌گر انرژی معادل در دو نظام زراعی مختلف است، در کشت گندم آبی با در نظر گرفتن عملکرد دانه گندم و بقایای گیاهی (کاه و کلش) و یونجه در مزارعی که از سامانه آبیاری سطحی استفاده کرده بودند، برای سامانه‌های (۱) و (۳) به‌ترتیب برابر با 66450 و 189600 مگاژول در هکتار برآورد شد. در مقابل، در مزارع مجهز به سامانه آبیاری بارانی کلاسیک ثابت با آبپاش‌های متحرک، مقدار انرژی خروجی برای سامانه‌های (۲) و (۴) به‌ترتیب 96000 و 229100 مگاژول در هکتار گزارش شده بود که در جدول (۳) نتایج ارائه

شده است. عملکرد کل (انرژی خروجی) در محصول یونجه بیش تر از گندم بود. افزایش انرژی خروجی در این محصول به ویژگی های بوم شناسی و فرآیند تولید گیاه زراعی یونجه بستگی دارد.

۲. مقایسه روابط بین انرژی های ورودی و خروجی سامانه های آبیاری مزارع یونجه و گندم آبی

بررسی داده های جدول (۴) نشان دهنده تفاوت های معناداری در شاخص های بهره وری انرژی، انرژی ویژه، نسبت انرژی، و انرژی خالص بین مزارع گندم و یونجه است. نسبت انرژی (کارایی انرژی) که نشان دهنده بازده انرژی خروجی به ورودی است، در مزارع گندم به ترتیب در سامانه های (۱) و (۲)، ۲/۲۳ و ۲/۰۷ محاسبه گردید که به طور قابل توجهی پایین تر از مزارع یونجه سامانه (۳) ۶/۶۷ و سامانه (۴)، ۵/۸۵، بود. همچنین این امر نشان دهنده کارایی کمتر گندم آبی در تبدیل انرژی ورودی به محصول می باشد. این مشاهدات نشان می دهد که محصول های گندم آبی و یونجه کارایی متفاوتی بسته به عملکرد سامانه های آبیاری داشتند. نسبت انرژی یا کارایی انرژی یعنی چه مقدار انرژی ورودی به یک سامانه به انرژی خروجی مفید (عملکرد نهایی)، تبدیل می شود و به عواملی همچون نوع محصول (گندم و یونجه دارای نیازهای رشدی و فیزیولوژیکی متفاوتی هستند؛ یونجه به عنوان یک گیاه چندساله و علوفه ای، ممکن است سازگاری بیشتری با شرایط محیطی داشته باشد و از نظر فیزیولوژیکی کارآمدتر باشد)، مدیریت بهره برداران مزرعه (روش های مختلف مدیریت مزرعه، مانند زمان بندی آبیاری، نوع کود مصرفی و مبارزه با آفات و بیماری ها، می تواند بر کارایی انرژی تأثیرگذار باشد)، شرایط آب و هوایی (شرایط آب و هوایی مختلف می تواند بر رشد گیاهان و مصرف انرژی تأثیر بگذارد) و نوع سامانه آبیاری (تفاوت در سامانه های آبیاری (۱)، (۲)، (۳ و ۴) می تواند بر میزان مصرف آب، کود و سایر نهاده ها و در نتیجه بر بهره وری انرژی تأثیر بگذارد) بستگی دارد. در مزارع گندم آبی، نسبت انرژی در سامانه (۲) کمتر از سامانه (۱) و در مزارع یونجه، کارایی سامانه (۴) کمتر از سامانه (۳) گزارش شد. به طور کلی، در مزارع گندم آبی که از سامانه آبیاری سطحی استفاده می کردند، کارایی انرژی بالاتری داشت. این تفاوت ممکن است به دلیل استفاده از آب تخصیص یافته به مزارع پایاب سد در سامانه های آبیاری بارانی کلاسیک ثابت با آبپاش های متحرک باشد. در این سامانه ها، به علت دیرکرد در رهاسازی آب در شبکه آبیاری، منجر به بروز تنش های آبی در مزارع می گردید. همچنین در بسیاری از موارد، به دلیل نقص در تجهیزات آبیاری در شبکه پایاب سد سورال، فرآیند آبیاری دچار اختلال شده و به موقع آب به مزارع نمی رسد. از این رو، یکی از مشکلات عمده در بهره برداری از منابع آبی سد، مدیریت ناکافی زمان بندی توزیع آب به کشاورزان است. در حالی که در مزارع آبیاری سطحی، از آب تخصیص یافته به محیط زیست استفاده می کردند در نتیجه به طور مستمر آب به اندازه و به موقع در دسترس کشاورزان قرار داشت و هیچ گونه کمبود آبی در آن مزارع احساس نشد. از طرف دیگر در مزارع یونجه به موجب حجم آب مصرفی بالاتر سامانه (۳) (مزارع مجهز به سامانه آبیاری سطحی) کارایی انرژی پائین تری نسبت به سامانه (۴)، (مزارع مجهز به سامانه آبیاری بارانی کلاسیک ثابت با آبپاش های متحرک) محاسبه شد. طهماسبی و همکاران (۱۴۰۳)، کارایی مصرف انرژی برای محصول گندم آبی در دشت دهگلان، در سامانه های آبیاری بارانی کلاسیک ثابت با آبپاش های متحرک و لوله چرخ دار را به ترتیب ۱/۶۰ و ۱/۷۵ گزارش کردند. حبیبی و همکاران (۱۴۰۲)، کارایی مصرف انرژی در دشت های استان ساری و شرف آباد برای محصول یونجه را به ترتیب ۱/۹۹ و ۲/۹۹ گزارش کردند.

میزان بهره وری انرژی در گندم آبی در سامانه (۱) و (۲)، به ترتیب برابر ۰/۱۲ و ۰/۱۰ کیلوگرم در مگاژول و برای یونجه در سامانه های (۳) و (۴)، به ترتیب ۰/۲۹ و ۰/۳۷ کیلوگرم در مگاژول به دست آمد که نتایج در جدول (۴) ارائه شده است. این بدان معنی است که به ازای هر واحد مصرف انرژی در مزارع چند کیلوگرم محصول تولید می شود. در زمینه تولید گیاه، بهره وری انرژی شاخص مناسب تری برای مقایسه است. در حالی که کارایی انرژی به میزان انرژی مصرفی برای انجام یک کار خاص اشاره دارد، بهره وری انرژی به میزان تولید یا خروجی در ازای هر واحد انرژی مصرفی می پردازد. از آنجا که کارایی انرژی می تواند تحت تأثیر عوامل گوناگونی از جمله میزان انرژی ورودی و عملکرد سامانه قرار گیرد، مقایسه صرفاً بر اساس آن ممکن است اندکی گمراه کننده باشد. بهره وری انرژی با محاسبه نسبت عملکرد تولیدی (بر حسب کیلوگرم) به انرژی مصرفی، تصویر دقیق تری از تفاوت ها را ارائه می دهد و نشان می دهد که هر سامانه تا چه اندازه در تبدیل انرژی به محصول نهایی کارآمد است. در بررسی مزارع گندم،

علی‌رغم عملکرد بالاتر سامانه آبیاری بارانی کلاسیک ثابت با آبپاش‌های متحرک (سامانه (۲)) نسبت به سامانه آبیاری سطحی (سامانه (۱))، بهره‌وری انرژی در سامانه (۱) به‌طور قابل توجهی بیش‌تر بود. این تناقض ناشی از اختلاف در مصرف نهاده‌های کشاورزی، به‌ویژه کودهای شیمیایی است. سامانه (۱) با وجود مصرف آب بیش‌تر (۵۸۸۴ مترمکعب در هکتار در مقابل ۴۳۵۰/۷۸ مترمکعب در هکتار در سامانه (۲))، به دلیل مصرف کم‌تر سایر نهاده‌های انرژی‌بر، در مجموع انرژی ورودی کم‌تری داشت. این امر منجر به افزایش بهره‌وری انرژی در سامانه (۱) شد. به عبارت دیگر، تجهیز کردن مزارع به سامانه آبیاری بارانی (سامانه (۲))، که منجر به افزایش راندمان آبیاری می‌شود، تنها در صورتی توجیه‌پذیر است که با افزایش قابل توجه عملکرد محصول همراه باشد. در غیر این صورت، عدم مدیریت صحیح مزرعه و مصرف بی‌رویه نهاده‌ها در سامانه آبیاری بارانی، منجر به کاهش بهره‌وری انرژی خواهد شد. در مزارع یونجه، سامانه آبیاری بارانی کلاسیک ثابت با آبپاش‌های متحرک (سامانه (۴)) در مقایسه با سامانه آبیاری سطحی (سامانه (۳))، بهره‌وری انرژی بالاتری را نشان داد. با وجود تفاوت در مصرف سایر نهاده‌های ورودی، مصرف آب در سامانه (۳) بیش‌از دو برابر (تقریباً ۲/۴ برابر) سامانه (۴) شد. این حجم بالای مصرف آب، عامل اصلی کاهش بهره‌وری انرژی در سامانه (۳) نسبت به سامانه (۴) بود. قاسمی‌میتکر و همکاران (۲۰۲۲) به مطالعه ارزیابی شاخص‌های مصرف انرژی برای تولید علوفه هیدروپونیک در منطقه مرکزی ایران (اصفهان) با استفاده از پرسشنامه‌های شفاهی پرداختند. نتایج نشان داد نسبت بهره‌وری انرژی و نسبت انرژی به‌ترتیب ۰/۲۰ و ۰/۳۳ کیلوگرم در مگاژول بود. خرمیان و همکاران (۱۳۹۱) با بررسی تاثیر روش آبیاری بارانی (قرقره‌ای) بر بهره‌وری آب گیاه یونجه در استان خوزستان به این نتیجه رسیدند که بهره‌وری آب در این روش بین ۲/۱۱ تا ۰/۴۹ کیلوگرم علوفه خشک در هر مترمکعب آب متغیر بود.

مقدار انرژی ویژه در تولید گندم آبی به ترتیب در سامانه‌های ۱ و ۲، ۶/۳۲ و ۶/۸۱ مگاژول در در کیلوگرم و برای یونجه به‌ترتیب در سامانه‌های (۳) و (۴)، به‌ترتیب ۳/۲۷ و ۲/۶۹ مگاژول در کیلوگرم به دست آمد. در مقایسه عملکرد انرژی بین گندم آبی و یونجه در منطقه پایاب سد مخزنی سورال، باتوجه‌به شاخص انرژی ویژه (که عکس بهره‌وری انرژی است و مقادیر کم‌تر آن نشان‌دهنده مصرف انرژی کم‌تر به ازای واحد عملکرد تولیدی است)، یونجه برتری نسبی را نشان می‌دهد. با صرف نظر از بذر مصرفی یونجه و تمرکز بر سیر انرژی مصرفی، و بدون در نظر گرفتن عوامل اقتصادی و اجتماعی با در نظر گرفتن سیاست‌های کلان تولید، می‌توان نتیجه گرفت که از منظر انرژی مصرفی، تولید یونجه کارآمدتر از گندم بود. به عبارت دیگر، یونجه در مقایسه با گندم آبی، با مصرف انرژی کم‌تری به تولید واحد عملکرد می‌رسد.

انرژی خالص تولیدی در مزارع گندم آبی در سامانه‌های (۱) و (۲) به ترتیب ۳۶۷۱۶/۸۴ و ۴۹۶۵۲/۹۴ مگاژول در هکتار و در مزارع یونجه در سامانه‌های (۳) و (۴)، ۱۳۷۵۴۵/۳۰ و ۱۸۹۹۵۲/۵۲ مگاژول در هکتار بود. باتوجه‌به این که این شاخص نشان‌دهنده اتلاف انرژی کم‌تر است، نشان می‌دهد که انرژی در تولید یونجه به‌ویژه در سامانه (۴) به‌طور بهینه‌تری مصرف شده است. افزایش عملکرد یا انرژی خروجی در محصول یونجه به‌دلیل ویژگی‌های اکولوژیکی خاص این گیاه، باعث برتری این شاخص در کشت یونجه نسبت به گندم آبی می‌شود. به‌طور کلی، افزایش انرژی خروجی نسبت به انرژی ورودی منجر به افزایش این شاخص می‌شود. همچنین، در مزارع سامانه (۳) باوجود این که مزارع تحت تنش آبی نبودند، اما عملکرد پائین‌تری نسبت به سامانه (۴)، مشاهده شد. در مزارع گندم نیز، سامانه (۲) عملکرد بهتری نسبت به سامانه ۱ داشت و در نتیجه انرژی خروجی بیش‌تری به‌واسطه استفاده بیش‌تر از نهاده‌های موثر بر رشد محصول داشت. به‌طور کلی، بهبود مدیریت زراعی، شامل استفاده بهینه از کودهای شیمیایی طبق توصیه‌های کودی، حفظ حاصل‌خیزی خاک، توجه به بازدهی مصرف آب با استفاده صحیح و طراحی مناسب سامانه‌های آبیاری و انتخاب محصولات زراعی با نیاز آبی کم، می‌تواند منجر به صرفه‌جویی در مصرف انرژی، پایداری بیش‌تر و در نهایت افزایش کارایی مصرف انرژی و بهبود انرژی خالص شود.

جدول ۴. روابط بین انرژی های ورودی و خروجی در تولید گندم آبی و یونجه در سامانه های آبیاری

شاخص ها		واحد		مزارع گندم آبی				مزارع یونجه	
نسبت انرژی		-		سامانه (۱)	سامانه (۲)	سامانه (۳)	سامانه (۴)		
انرژی ویژه		مگاژول در کیلوگرم		۲/۲۳	۲/۰۷	۳/۶۴	۵/۸۵		
بهره وری انرژی		کیلوگرم در مگاژول		۰/۱۲	۰/۱۰	۰/۲۹	۰/۳۷		
انرژی خالص		مگاژول در هکتار		۳۶۷۱۶/۸۴	۴۹۶۵۲/۹۴	۱۳۷۵۴۵/۳۰	۱۸۹۹۵۲/۵۲		

توزیع انرژی به صورت مستقیم، غیرمستقیم، تجدیدپذیر و تجدیدنپذیر در جدول ۵ نشان داده شده است. همان طور که در جدول مشاهده می شود در مزارع گندم آبی سامانه های (۱) و (۲)، میزان انرژی غیرمستقیم نسبت به مستقیم بیش تر بود. اما در مزارع یونجه سامانه های (۳) و (۴)، میزان انرژی مستقیم بیش تر از غیرمستقیم است دلیل این امر حجم زیاد مصرف آب مصرفی در این مزارع است. در تمامی مزارع کشت گندم آبی و یونجه، میزان انرژی مصرفی از منابع تجدیدنپذیر بیش تر از انرژی حاصل از منابع تجدیدپذیر است. دلیل اصلی این امر، مصرف بالای آب آبیاری در هر دو محصول است. به عبارت دیگر، وابستگی زیاد به نهاده های آب آبیاری منجر به افزایش قابل توجه انرژی تجدیدنپذیر در سامانه های زراعی گندم آبی و یونجه می شود. در مزارع گندم و یونجه، استفاده از کودهای شیمیایی به عنوان منابع انرژی غیرمستقیم، نقش مهمی در تعیین میزان انرژی مصرفی ایفا کردند. زیرا در سامانه های زراعی (سامانه های (۲) و (۴)) که میزان مصرف کودهای شیمیایی، به ویژه کود نیتروژن، بیش تر از سایر سامانه ها (سامانه های (۱) و (۳)) بود، انرژی غیرمستقیم به طور قابل توجهی افزایش یافت. به عبارت دیگر، افزایش مصرف کودهای شیمیایی، به ویژه نیتروژن، منجر به افزایش انرژی غیرمستقیم در سامانه های (۲) و (۴) نسبت به سامانه های (۱) و (۳) گردید. مطابق با گزارش مور^۱ (۲۰۱۰)، برای دستیابی به یک سامانه پایدار تولید مواد غذایی، ضروری است که کارایی انرژی و سهم انرژی های تجدیدپذیر در اکوسیستم کشاورزی افزایش یابد. در حال حاضر، تأمین غذای جمعیت رو به رشد جهان بدون استفاده از انرژی های تجدیدنپذیر تقریباً دشوار و شاید غیرممکن به نظر رسد. با این حال، با توجه به پیامدهای زیست محیطی استفاده از مواد شیمیایی و سوخت های فسیلی، متخصصان حوزه کشاورزی ناگزیر از تلاش برای دستیابی به افزایش های پایدار در کشاورزی و افزایش سهم انرژی های تجدیدپذیر در تولید خواهند بود.

جدول ۵. مقادیر انرژی های مستقیم، غیرمستقیم، تجدیدپذیر و تجدیدنپذیر در تولید گندم آبی و یونجه

نوع انرژی	واحد	سامانه ۱	سامانه ۲	سامانه ۳	سامانه ۴
انرژی مستقیم ^{الف}	مگاژول در هکتار	۱۳۸۵۳/۱۶	۱۶۲۶۶/۱۶	۳۴۸۱۲/۲۰	۱۹۶۱۸/۶۶
انرژی غیرمستقیم ^ب	مگاژول در هکتار	۱۵۸۸۰	۳۰۰۸۰/۹۰	۱۷۲۴۲/۵۰	۱۹۵۲۸/۸۰
انرژی تجدیدپذیر ^پ	مگاژول در هکتار	۴۷۹۸/۰۸	۵۵۹۸/۷۴	۷۵۰/۶۸	۶۰۸/۶۵
انرژی تجدیدنپذیر ^ت	مگاژول در هکتار	۲۴۹۳۵/۰۸	۴۰۷۴۸/۳۱	۵۱۳۰۴/۰۲	۳۸۵۳۷/۹۱

الف) شامل نیروی انسانی، سوخت گازوئیل و آب آبیاری

ب) شامل سایر نهاده های ورودی به استثنای انرژی های مستقیم

پ) شامل نیروی انسانی و بذر

ت) شامل سایر نهاده های ورودی به استثنای انرژی های تجدیدپذیر

بحث

این مطالعه به بررسی الگوی مصرف انرژی در دو سامانه آبیاری سطحی و بارانی در مزارع تحت کشت محصولات گندم آبی و یونجه در مزارع پایاب سد مخزنی سورال استان کردستان پرداخت. هدف اصلی این پژوهش، ارزیابی شاخص های انرژی مرتبط با تولید گندم آبی و یونجه در مزارع خرده مالکی منطقه بوده است. مزارع مورد بررسی به چهار گروه دسته بندی شدند: سامانه های (۱)

و (۲) که مربوط به مزارع گندم به ترتیب مجهز به سامانه آبیاری سطحی و بارانی کلاسیک ثابت با آبیاش‌های متحرک بودند، با منبع تأمین انرژی گرانشی. همچنین سامانه‌های (۳) و (۴) به ترتیب برای مزارع یونجه تجهیز به سامانه آبیاری سطحی و بارانی کلاسیک ثابت با آبیاش‌های متحرک با ویژگی‌های مشابه در تأمین انرژی جهت انتقال و توزیع آب در مزرعه (گرانشی) تعریف شدند. در پایان فصل زراعی، داده‌های مربوط به کل نهاده‌های ورودی (مصرفی) و خروجی (تولیدی) از طریق تکمیل پرسش‌نامه‌های حضوری جمع‌آوری شد. به‌منظور صحت‌سنجی اطلاعات، مقادیر، آب و سایر نهاده‌ها از اداره آب منطقه‌ای استان کردستان و کارشناسان جهاد کشاورزی استعلام و اصلاح گردید.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش شاخص‌های انرژی دو محصول یونجه و گندم آبی در مزارع کشاورزان دشت‌های پایاب سد مخزنی سورال استان کردستان مورد ارزیابی قرار گرفت. متوسط انرژی مصرفی مزارع در تولید گندم آبی در سامانه (۱) (آبیاری سطحی) $29733/16$ و در سامانه (۲) (آبیاری بارانی کلاسیک ثابت با آبیاش‌های متحرک) $46347/06$ مگاژول در هکتار، در مزارع یونجه به ترتیب در سامانه (۳) (آبیاری سطحی) و سامانه (۴) (آبیاری بارانی کلاسیک ثابت با آبیاش‌های متحرک)، $52054/70$ و $39147/47$ مگاژول در هکتار بود. مقادیر شاخص نسبت انرژی در مزارع سامانه (۱) و (۲)، به ترتیب $2/23$ و $2/07$ برای محصول گندم آبی و در سامانه‌های (۳) و (۴) به ترتیب $3/64$ و $5/85$ بود. همچنین بهره‌وری مصرف انرژی مزارع گندم در سامانه (۱) بیش‌تر از سامانه (۲) به دست آمد دلیل این امر در مزارع گندم این بود که با وجود مصرف زیاد آب مصرفی در سامانه (۱)، اما بنا به دلایل باورهای که عموم کشاورزان آن منطقه داشتن با مصرف بیش‌تر نهاده‌های ورودی دیگر به‌خصوص کود نیتروژن به عملکرد نهایی بیش‌تر خواهند رسید؛ اما در کل در سامانه (۲) عملکرد دانه‌ای گندم آبی سامانه (۲)، $1/40$ برابر بیش‌تر از سامانه (۱) بود؛ اما برای بررسی و برتری سامانه‌های مذکور بهتر است که شرایط اقتصادی و اقلیمی منطقه را هم بررسی کرد؛ زیرا شرایط اقلیمی بر عملکرد محصول تحت کشت تأثیر زیادی دارد. از طرفی بهره‌وری انرژی در مزارع یونجه سامانه (۳) و (۴)، بهره‌وری انرژی در سامانه (۴) بیش‌تر از سامانه (۳) گزارش شد اصلی‌ترین دلیل آن می‌توان به مصرف بالای آب آبیاری به‌عنوان یک نهاده اصلی ورودی در سامانه (۳) نسبت داد؛ زیرا به‌طور متوسط مزارع سامانه (۳) مجهز به سامانه آبیاری سطحی حدوداً بیش‌از دوبرابر ($2/40$ برابر)، آب مصرفی داشت بود. باتوجه‌به شاخص‌های انرژی بررسی‌شده، نوع محصول کشت‌شده تأثیر قابل‌توجهی بر میزان انرژی ورودی در سامانه‌های آبیاری دارد. به‌طوری‌که، در مزارع گندم، علی‌رغم مصرف بهینه آب در سامانه (۲)، میزان انرژی ورودی بالاتر از سامانه (۱) بود. این امر به این دلیل است که بسیاری از کشاورزان بر این باور بودند که افزایش مصرف نهاده‌های کودی منجر به عملکرد بالاتر محصول می‌شود. از سوی دیگر، در مزارع یونجه، میزان انرژی ورودی در سامانه (۳) بیش‌تر از سامانه (۴) بود، که این تفاوت عمدتاً ناشی از تأثیر میزان آب مصرفی در سامانه (۳) بر افزایش انرژی ورودی بود. یکی از چالش‌های اساسی در مدیریت آبیاری اراضی تحت پوشش شبکه پایاب سد، تأخیر در رهاسازی به‌موقع آب برای کشاورزان است. در این راستا، آموزش و توانمندسازی کشاورزان از طریق برگزاری دوره‌های فنی در زمینه مدیریت انرژی، انتخاب نهاده‌های کم‌مصرف و بهره‌برداری بهینه از منابع، با ایجاد تعاونی‌های آموزش یافته می‌تواند نقش مؤثری در افزایش بهره‌وری انرژی و بهبود سودآوری اقتصادی ایفا کند. اجرای این اقدامات نه تنها به بهبود کارایی انرژی در بخش کشاورزی منجر می‌شود، بلکه در بلندمدت به حفظ منابع طبیعی و کاهش پیامدهای زیست‌محیطی نیز کمک خواهد کرد.

ملاحظات اخلاقی

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.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

سپاس‌گزاری

بدین‌وسیله، نویسندگان مراتب سپاس و قدردانی خود را از کشاورزان محترم منطقه که با همکاری ارزشمند خود در تکمیل پرسش‌نامه‌ها زمینه اجرای این پژوهش را فراهم ساختند، ابراز می‌دارند. همچنین، از حمایت‌ها و همکاری‌های بی‌دریغ کارشناسان محترم اداره آب منطقه‌ای استان کردستان، به‌ویژه جناب آقای مهندس هیرش قدرشناس که در مراحل مختلف پژوهش یاری‌رسان بودند، و جناب آقای دکتر فرزاد حسین‌پناهی، عضو هیئت علمی گروه زراعت دانشکده کشاورزی دانشگاه کردستان، تقدیر و تشکر به عمل می‌آید.

منابع

- اوجاقلو، حسن، اوجاقلو، فرهاد، جعفری، محمد مهدی، میثاقی، فرهاد، نظری، بیژن، و کرمی دهکردی، اسماعیل. (۱۴۰۲). اثر مدیریت آبیاری بر شاخص‌های بهره‌وری مصرف آب محصول یونجه. *مجله آب و خاک*، ۳۷ (۲)، ۱۶۵-۱۸۵.
<https://doi.org/10.22067/jsw.2023.79145.1211>
- بایزیدی، مطلب، و کاکي، مهري. (۱۴۰۰). تغییرات حجم ذخیره و بهره برداری از آبخوان‌های دشت های شرق استان کردستان. *نشریه اکوهیدرولوژی*، ۸ (۱)، ۵۷-۷۲.
<https://sid.ir/paper/1058902/fa>
- بهرامی‌بوانی، ندا، بهرامی، هوشنگ، نصیریان، نیما، و سلطانی محمدی، امیر. (۱۳۹۳). تحلیل مقایسه‌ای بهره‌وری انرژی و راندمان کاربرد آب در سامانه های آبیاری تحت فشار و سطحی منطقه مطالعه موردی: تولید گندم در شهرستان اهواز. *ویژه نامه نشریه دانش کشاورزی و تولید پایدار*، ۲۴ (۴)، ۱۴۱-۱۵۲.
https://journals.tabrizu.ac.ir/article_3315.html
- تقی‌نژاد، جبرائیل، و واحدی، عادل. (۱۴۰۰). مدل سازی الگوی مصرف انرژی و تحلیل حساسیت نهاده ها در تولید گندم آبی، مطالعه موردی: استان اردبیل. *مجله مکانیزاسیون کشاورزی*، ۶ (۴)، ۱۱-۱۹.
<https://doi.org/10.22034/jam.2022.14202>
- حبیبی، سعید، خوش روش، مجتبی، و نوری خواجه بلاغ، رسول. (۱۴۰۲). تحلیل شاخص‌های بهره‌وری فیزیکی آب و انرژی محصولات یونجه و جو در دو اقلیم متفاوت. *مجله آب و خاک*، ۳۸ (۱)، ۲۳-۳۶.
<https://doi.org/10.22067/jsw.2024.85576.1360>
- خرمیان، محمد، شوشی دزفولی، احمد علی، و عصاره، علی. (۱۳۹۱). بررسی تاثیر آبیاری بارانی قرقره ای بر عملکرد علوفه و کارایی مصرف آب یونجه در خوزستان. *مجله علمی فیزیولوژی گیاهان زراعی*، ۴ (۱۵)، ۸۷-۹۷.
<https://cpj.ahvaz.iau.ir/article-1-90-fa.html>
- ریحانی، نرجس، و خاشعی سیوکی، عباس. (۱۳۹۴). برآورد ضریب گیاهی زیره سبز در مراحل مختلف رشد به روش لایسیمیتری در منطقه بیرجند. *مجله آب و خاک*، ۲۹ (۵)، ۱۰۴۷-۱۰۵۶.
<https://doi.org/10.22067/jsw.v29i5.24171>
- ضیایی، سید مسعود، حسین پناهی، فرزاد، ولی زاده، جعفر، و برآبادی، سید ابوالقاسم. (۱۳۹۲). مقایسه کارآمدی تولید گندم و جو به لحاظ مصرف انرژی و بهره‌وری آن در استان سیستان و بلوچستان. *نشریه پژوهشهای زراعی ایران*، ۱۱ (۲)، ۳۲۷-۳۳۶.
<https://doi.org/10.22067/gsc.v11i2.26148>
- طهماسبی، پیمان، دالوند، فاطمه، حسینی، سید ابوالفضل، کریمی، بختیار، و قدرشناس، هیرش. (۱۴۰۳). بررسی مقایسه‌ای کارایی انرژی دو سامانه آبیاری بارانی در کشت گندم (مطالعه موردی: دشت‌های دهگلان، استان کردستان). *مجله آب و خاک*، ۳۸ (۶)، ۶۸۳-۶۹۷.
<https://doi.org/10.22067/jsw.2025.90134.1439>
- عاشوری، وحید، هاشمی شاهدانی، سید مهدی، و روزبهانی، عباس. (۱۴۰۲). بررسی میزان مصرف آب و انرژی در سطح مزارع شبکه آبیاری قزوین. *نشریه مدیریت آب و آبیاری*، ۱۳ (۲)، ۲۹۵-۳۱۰.
<https://doi.org/10.22059/jwim.2022.323089.869>
- غلامی، زینب، ابراهیمیان، حامد، و نوری، حمیده. (۱۳۹۴). بررسی بهره‌وری انرژی آب و بهره‌وری اقتصادی انرژی در سامانه های آبیاری بارانی و سطحی در شرایط بهره‌برداری از آب زیرزمینی (مطالعه موردی: دشت قزوین). *مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی*، ۱۶ (۳)، ۳۱-۴۴.
<https://sid.ir/paper/28231/fa>
- قادرپور، امید، رفیعی، شاهین، و شریفی، محمد. (۱۳۹۶). تجزیه و تحلیل و مدل سازی انرژی و هزینه تولید یونجه با بهره‌گیری از سامانه استنتاج فازی - عصبی تطبیقی در شهرستان بوکان. *نشریه مهندسی بیوسیستم ایران*، ۴۸ (۱)، ۱۷۹-۱۹۰.
<https://doi.org/10.22059/ijbse.2017.61573>
- قاسمی‌مبتکر، حسن. (۱۳۹۸). بررسی روند مصرف انرژی در دو سامانه آبیاری غرقابی و تحت فشار: مطالعه موردی یک مزرعه صد هکتاری در همدان. *نشریه مهندسی بیوسیستم ایران*، ۵۰ (۴)، ۸۰۹-۸۰۱.
<https://doi.org/10.22059/ijbse.2019.281690.665189>

قدمی فیروزآبادی، علی، و اکبری، مهدی. (۱۴۰۲). تاثیر آبیاری قطره ای نواری (تیپ) بر میزان عملکرد و بهره وری آب محصول گندم و شوری خاک در شرایط زارعین (مطالعه موردی: استان همدان). *نشریه آبیاری و زهکشی ایران*، ۱۷(۵)، ۸۳۱-۸۴۲.

https://idj.iaid.ir/article_182244.html

قهرودیتالی، منیژه، خدامرادی، فرهاد، و علی نوری، خدیجه. (۱۴۰۲). تاثیر افت آب های زیرزمینی بر مخاطرات فرونشست زمین در دشت دهگلان، استان کردستان. *نشریه مدیریت مخاطرات محیطی*، ۱۰(۱)، ۷۰-۵۷.

<https://dx.doi.org/10.22059/jhsci.2023.359130.777>

گودرزی، محمدرضا، صباغ زاده، مریم، رجب پور نیکنام، امیررضا. (۱۴۰۴). رابطه بین فرونشست زمین و مصرف آب در دشت یزد-اردکان با استفاده از تصاویر سنتینل ۱. *مجله تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی*، ۲۵ (۷۶)، ۱۴۴-۱۶۱.

<http://igs.khu.ac.ir/article-1-4083-fa.html>

وزارت نیرو. (۱۳۸۴). گزارشی درباره برقی کردن چاه های کشاورزی. دفتر مطالعات زیربنایی.

<https://rc.ajlis.ir/fa/report/show/731149>

References

- Ahmadbeyki, A., Ghahderijani, M., Borghaee, A., & Bakhoda, H. (2023). Energy use and environmental impacts analysis of greenhouse crops production using life cycle assessment approach: A case study of cucumber and tomato from Tehran province, Iran. *Energy Reports*, 9, 988-999. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.11.205>
- Ashouri, V., Hashemi Shahdani, S. M., & Rouzbahani, A. (2023). Investigation of water and energy consumption in the farms of Qazvin irrigation network. *Water and Irrigation Management*, 13(2), 295-310. <https://doi.org/10.22059/jwim.2022.323089.869> (In Persian)
- Bahrani-Bovani, N., Bahrani, H., Nasiriyani, N., & Soltani Mohammadi, A. (2014). Comparative analysis of energy productivity and water application efficiency in pressurized and surface irrigation systems: A case study of wheat production in Ahvaz County. *Special Issue of the Journal of Agricultural Knowledge and Sustainable Production*, 24(4), 141-152. https://journals.tabrizu.ac.ir/article_3315.html (In Persian)
- Bayazidi, M., & Kaki, M. (2021). Changes in storage volume and exploitation of aquifers in the eastern plains of Kurdistan province. *Ecohydrology*, 8(1), 57-72. <https://sid.ir/paper/1058902/fa> (In Persian)
- Ghadami Firoz Abadi, A., & Akbari, M. (2023). The effect of tape drip irrigation on yield and water productivity of wheat and soil salinity under farmers' conditions (Case study: Hamadan province). *Iranian Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 17(5), 831-842. https://idj.iaid.ir/article_182244.html (In Persian)
- Ghaderpour, O., Rafiee, S., & Sharifi, M. (2017). Analysis and modeling of energy and production cost of alfalfa using adaptive neuro-fuzzy inference system in Bukan Township. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, 48(1), 179-190. <https://doi.org/10.22059/ijbse.2017.61573> (In Persian)
- Ghahrodi Tali, M., Khodamoradi, F., & Ali Nouri, Kh. (2023). The effect of groundwater depletion on land subsidence hazards in Dehgolan plain, Kurdistan province. *Environmental Hazards Management*, 10(1), 57-70. <https://dx.doi.org/10.22059/jhsci.2023.359130.777> (In Persian)
- Ghasemi Mobtaker, H. (2019). Investigating the trend of energy consumption in two surface and pressurized irrigation systems: A case study of a 100-hectare farm in Hamadan. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, 50(4), 801-809. <https://doi.org/10.22059/ijbse.2019.281690.665189> (In Persian)
- Ghasemi-Mobtaker, H., Sharifi, M., Taherzadeh-Shalmai, N., & Afrasiabi, S. (2022). A new method for green forage production: Energy use efficiency and environmental sustainability. *Journal of Cleaner Production*, 363, 132562. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132562>
- Gholami, Z., Ebrahimi, H., & Nouri, H. (2015). Investigating water energy productivity and economic energy productivity in sprinkler and surface irrigation systems under groundwater exploitation conditions (Case study: Qazvin plain). *Journal of Agricultural Engineering Research*, 16(3), 31-44. <https://sid.ir/paper/28231/fa> (In Persian)
- Ghorbani, R., Mondani, F., Amirmoradi, Sh., Feizi, H., Khorramdel, S., Sanjani, S., Anvarkhah, S., Aghel, H., & Sabet Teimouri, M. (2011). A case study of energy use and economical analysis of irrigated and dryland wheat production systems. *Applied Energy*, 88(1), 283-288. <https://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.04.028>
- Goodarzi, M., Sabaghzadeh, M., & Rajabpour Niknam, Amirreza. (2025). The relationship between land subsidence and water consumption in Yazd-Ardakan plain using Sentinel-1 images. *Applied Geographic Sciences Research*, 25(76), 144-161. <http://dx.doi.org/10.61186/jgs.25.76.13> (In Persian)

- Goodarzi, M. R., Sabaghzadeh, M., & Niazkar, M. (2023). Evaluation of snowmelt impacts on flood flows based on remote sensing using SRM model. *Water*, 15(9), 1650. <https://doi.org/10.3390/w15091650>
- Habibi, S., Khoshravash, M., & Nouri Khajeh Bolagh, R. (2023). Analysis of physical water and energy productivity indices of alfalfa and barley in two different climates. *Water and Soil*, 38(1), 23-36. <https://doi.org/10.22067/jsw.2024.85576.1360> (In Persian)
- Hamedani, S. R., Shabani, Z., & Rafiee, S. (2011). Energy inputs and crop yield relationship in potato production in Hamadan province of Iran. *Energy*, 36(5), 2367-2371. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.01.013>
- Han, D., Yu, D., & Cao, Q. (2020). Assessment on the features of coupling interaction of the food-energy-water nexus in China. *Journal of Cleaner Production*, 249, 119379. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119379>
- Heydari, N., & 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), 253-269. <https://doi.org/10.5829/ijee.2025.16.02.08>
- Kaab, A., Khanali, M., Shadamanfar, S., & Jalalvand, M. (2024). Assessment of energy audit and environmental impacts throughout the life cycle of barley production under different irrigation systems. *Environmental and Sustainability Indicators*, 22, 100357. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2024.100357>
- Khorramian, M., Shooshi Dezfouli, A. A., & Osareh, A. (2012). Investigating the effect of center pivot irrigation on forage yield and water use efficiency of alfalfa in Khuzestan. *Journal of Crop Physiology*, 4(15), 87-97. <http://cpj.ahvaz.iau.ir/article-1-90-fa.html> (In Persian)
- Kiss, L. B. (2024). Development of Energy Consumption in Agriculture in the European Union between 2010 and 2021: Forecast Until 2025. *POLGÁRI SZEMLE: GAZDASÁGI ÉS TÁRSADALMI FOLYÓIRAT*, 20(4-6), 128-138. <https://doi.org/10.24307/psz.2024.1111>
- Kitani, O., Jungbluth, T., Peart, R. M., & Ramdani, A. (1999). CIGR handbook of agricultural engineering. *Energy and biomass engineering*, 5, 330. https://www.researchgate.net/publication/291708655_CIGR_Handbook_of_Agricultural_Engineering_vol_V_I
- Ministry of Energy. (2005). A report on electrification of agricultural wells. Office of Infrastructure Studies. <https://rc.majlis.ir/fa/report/show/731149> (In Persian)
- Mohammadi, A., Rafiee, S., Jafari, A., Keyhani, A., Mousavi-Avval, S. H., & Nonhebel, S. (2014). Energy use efficiency and greenhouse gas emissions of farming systems in north Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, 724-733. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.11.012>
- Moore, S. R. (2010). Energy efficiency in small-scale biointensive organic onion production in Pennsylvania, USA. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 25(3), 181-188. <http://dx.doi.org/10.1017/S1742170510000098>
- Nasseri, A. (2024). Effects of irrigated and dryland conditions on energy indices in wheat production: A meta-analysis based on the principal components analysis. *Environment, Development and Sustainability*. <https://doi.org/10.1007/s10668-024-04495-8>
- Ojaghlou, H., Ojaghlou, F., Jafari, M. M., Misaghi, F., Nazari, B., & Karami Dehkordi, I. (2023). The effect of irrigation management on water use efficiency indices of alfalfa. *Water and Soil*, 37(2), 165-185. <https://doi.org/10.22067/jsw.2023.79145.1211> (In Persian)
- Peng, L., Chen, L., & Dai, H. (2024). The impact of energy structure on agricultural green productivity in China. *Scientific Reports*, 14(1), 27938. <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-024-78876-4>

- Purwanto, A., Sušnik, J., Suryadi, F. X., & de Fraiture, C. (2021). Quantitative simulation of the water-energy-food (WEF) security nexus in a local planning context in indonesia. *Sustainable Production and Consumption*, 25, 198-216. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2020.08.009>
- Rahman, M. A., Lee, S. H., Park, H. S., Min, C. W., Woo, J. H., Choi, B. R., Rahman, M. M., & Lee, K. W. (2025). Light Quality Plays a Crucial Role in Regulating Germination, Photosynthetic Efficiency, Plant Development, Reactive Oxygen Species Production, Antioxidant Enzyme Activity, and Nutrient Acquisition in Alfalfa. *International Journal of Molecular Sciences*, 26(1), 360. <https://doi.org/10.3390/ijms26010360>
- Reihani, N., & Khashei Siouki, A. (2015). Estimation of the crop coefficient of cumin at different growth stages using lysimetry in Birjand region. *Water and Soil*, 29(5), 1047-1056. <https://doi.org/10.22067/jsw.v29i5.24171> (In Persian)
- Sánchez-Sutil, F., & Cano-Ortega, A. (2021). Smart control and energy efficiency in irrigation systems using LoRaWAN. *Sensors*, 21(21), 7041. <http://dx.doi.org/10.3390/s21217041>
- Senbeta, A. F., & Worku, W. (2023). Ethiopia's wheat production pathways to self-sufficiency through land area expansion, irrigation advance, and yield gap closure. *Heliyon*, 9(10), e20720. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e20720>
- Şeren, A., & Yildirim, M. U. (2025). Activities on the Efficient Use of Water in Agriculture in Türkiye Under Climate Change. *Agriculture and Water Management Under Climate Change*, Springer Nature Switzerland publications, London, England. <https://www.springerprofessional.de/en/agriculture-and-water-management-under-climate-change/50410488>
- Shi, H., Zhang, Y., Bian, M., & Zhang, J. (2024). Influence of energy poverty on agricultural water efficiency using a panel data study in China. *Scientific Reports*, 14(1), 2064. <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-023-50971-y>
- Taghinezhad, J., & Vahidi, A. (2021). Modeling energy consumption pattern and sensitivity analysis of inputs in irrigated wheat production: A case study of Ardabil province. *Agricultural Mechanization*, 6(4), 11-19. <https://doi.org/10.22034/jam.2022.14202> (In Persian)
- Tahmasbi, P., Dalvand, F., Hosseini, S. A., Karimi, B., & Ghadrshnas, H. (2024). A comparative study of energy efficiency of two sprinkler irrigation systems in wheat cultivation (Case study: Dehgolan plains, Kurdistan province). *Water and Soil*, 38(6), 683 - 697. <https://doi.org/10.22067/jsw.2025.90134.1439> (In Persian)
- Taki, M., Rohani, A., Soheili-Fard, F., & Abdeslahi, A. (2018). Assessment of energy consumption and modeling of output energy for wheat production by neural network (MLP and RBF) and Gaussian process regression (GPR) models. *Journal of cleaner production*, 172, 3028-3041. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.107>
- Tipi, T., Cetin, B., & Vardar, A. (2009). An analysis of energy use and input costs for wheat production in Turkey. *Journal of Food Agriculture and Environment*, 7(2), 2399-23862. https://www.researchgate.net/publication/239923862_An_analysis_of_energy_use_and_input_costs_for_wheat_production_in_Turkey
- Vahedi, A., & Zarifeshat, S. (2021). Evaluation Energy Flow and Analysis of Energy Economy for Irrigated Wheat Production in Different Geographical Regions of Iran. *Journal of Agricultural Machinery*, 11(2), 505–523. <https://doi.org/10.22067/jam.v11i2.81747>
- Ziaci, S. M., Hosseinpanahi, F., Valizadeh, J., & Barabadi, S. A. (2013). Comparison of wheat and barley production efficiency in terms of energy consumption and productivity in Sistan and Baluchestan province. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 11(2), 327-336. <https://doi.org/10.22067/gsc.v11i2.26148> (In Persian)