

Energy Footprint Analysis in the Production of Rice, Forage Maize, and Potatoes (Case Study: Three Counties in Lorestan Province)

F. Azadpour¹, M. Shakarami^{1*}, S.Y. Karimi¹

1- Department of Water Engineering, Lorestan University, Lorestan, Iran

(*- Corresponding Author Email: Shakarami.mas@lu.ac.ir)

Received: 15 October 2025

Revised: 06 June 2026

Accepted: 09 June 2026

Available Online: 09 June 2026

How to cite this article:

Azadpour, F., Shakarami, M., & Karimi, S.Y. (2026). Energy footprint analysis in the production of rice, forage maize, and potatoes (Case study: Three counties in Lorestan province). *Journal of Water and Soil*, 40(1), 1-17. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.2026.95938.1505>

Introduction

The agricultural sector's strong dependence on water and energy resources for ensuring food security for the growing global population amplifies the necessity of enhancing water and energy efficiency in agricultural products, while simultaneously maintaining the health of society and the environment. Sustainable provision of water and energy is one of the main challenges to development in all countries. Since the agricultural sector is one of the largest consumers of water and energy, any disruption in their supply can significantly impact agricultural production levels. Increasing efficiency and optimizing energy consumption management are key strategies for mitigating the environmental effects caused by food production processes. This approach not only creates economic benefits but also plays a crucial role in achieving the long-term sustainability of production systems through the conservation of fossil resources and reduction of air pollution. Consequently, extensive research has been focused on energy management. On the other hand, unsustainable use of agricultural inputs such as chemical fertilizers, pesticides, and fossil fuels leads to serious consequences, including global warming, biodiversity loss, and degradation of soil and air quality. Therefore, sustainable management of these inputs is essential and inevitable for maintaining environmental balance and achieving sustainable development. Thus, the challenges of food security and the need for sustainability of energy resources in modern agriculture have heightened the importance of assessing energy consumption efficiency. Energy footprint analysis serves as an effective tool for identifying high-consumption areas and providing managerial and technological solutions to improve energy efficiency in agricultural production.

Materials and Methods

This research was conducted with the aim of examining the personal characteristics of farmers, analyzing energy consumption, and assessing energy indicators in the cultivation of three major crops: rice, forage corn, and potatoes, in the districts of Dorud, Kuhdasht, and Azna, respectively, in Lorestan Province. Data were collected through questionnaires and face-to-face interviews with farmers and analyzed using statistical methods. The input energy indicators included chemical fertilizers, fuel, irrigation water, seeds, and human labor. The main sections of the questionnaires included: (I) general information about the farmer and the farm, such as age, education, work experience, and land area; (II) information regarding the amount of input consumption, including human labor, machinery, chemical inputs, fuel, irrigation water, and seeds; and (III) information regarding crop yield. The statistical population consisted of one thousand active farmers involved in rice production (in Dorud), forage corn (in Kuhdasht), and potatoes (in Azna). To determine the sample size, the Cochran formula was used with a confidence level of 95% and a margin of error of 7%. To calculate the energy equivalent of inputs and outputs, all production inputs and outputs were converted to energy equivalents in terms of megajoules per hectare (MJ/ha). In this research, indicators such as Energy Ratio, Net Energy Yield, Energy Efficiency, and Water Use Efficiency



Authors retain the copyright. This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

<https://doi.org/10.22067/jsw.2026.95938.1505>

were employed.

Results and Discussion

The findings indicated that the majority of farmers were in the age range of 40-50 years, with primary or high school education, and had a minimum of five years of farming experience. Their predominant crop was forage corn. The findings indicated that the highest input energy consumption was observed for potatoes, with $123048 \text{ MJ ha}^{-1}$, of which fuel energy accounted for 58.17%. It was followed by rice with $121117.09 \text{ MJ ha}^{-1}$ (fuel energy share: 50%), and forage maize with 98644 MJ ha^{-1} , where 60.85% of the total energy input was derived from fuel consumption. After fossil fuels, agricultural machinery, with an average share of 30%, and chemical fertilizers, with an average of 10%, ranked next. The energy share of irrigation water in rice was $11236.39 \text{ MJ ha}^{-1}$ (9.28%), which was significantly higher compared to the other two crops.

Conclusion

Overall, the results revealed that potato had the highest total input energy ($123048 \text{ MJ ha}^{-1}$) and output energy ($151200 \text{ MJ ha}^{-1}$), while forage maize had the lowest input energy (98644 MJ ha^{-1}).

Keywords: Energy consumption, Energy productivity, Irrigation water, Lorestan province, Nitrogen fertilizer

تحلیل ردپای انرژی در تولید برنج، ذرت علوفه‌ای و سیب‌زمینی (مطالعه موردی: سه شهرستان استان لرستان)

فاطمه آزادپور^۱ ID - مسعود شاکرمی^۱ ID* - سید یعقوب کریمی^۱ ID

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۱۹

چکیده

افزایش جمعیت و تقاضا برای غذا تغییراتی را در عملیات‌های کشاورزی و بالا رفتن مصرف نهاده‌هایی چون سوخت، برق، کودهای شیمیایی و سموم به همراه داشته است. این پژوهش به تحلیل و مقایسه مصرف آب و انرژی در تولید برنج، ذرت علوفه‌ای و سیب‌زمینی در شهرستان‌های درود، کوهدشت و ازنا در استان لرستان در سال ۱۴۰۳ می‌پردازد. جامعه آماری شامل هزار کشاورز فعال در تولید این محصولات در شهرستان‌های مذکور بوده و حجم نمونه بر اساس فرمول کوکران (با سطح اطمینان ۹۵ درصد و میزان خطای ۷ درصد)، ۱۸۸ نفر برآورد گردید. مقایسه مصرف انرژی ورودی در محصولات سیب‌زمینی، برنج و ذرت علوفه‌ای نتایج متفاوتی را نشان داد به‌طوری‌که، سیب‌زمینی با ۱۲۳۰۴۸ مگاژول بر هکتار، بیشترین و ذرت علوفه‌ای با ۹۸۶۴۴ مگاژول، کمترین میزان مصرف انرژی را دارند. همچنین، ذرت علوفه‌ای با ۶۰/۸۵ درصد بالاترین وابستگی نسبی به انرژی سوخت را دارد، در حالی‌که این نسبت برای برنج ۵۰ درصد و سیب‌زمینی ۵۸/۱۷ درصد است. این یافته بر اهمیت تفکیک منابع انرژی برای درک بهتر الگوهای مصرف در محصولات مختلف تأکید دارد. مقایسه اجزای انرژی ورودی، حاکی از بالا بودن سهم سوخت فسیلی در همه محصولات است؛ بیشترین درصد سوخت در ذرت علوفه‌ای (۶۰/۸۵ درصد) و بیشترین میزان عددی مربوط به سیب‌زمینی (۷۱۵۰۸۴/۰۹ مگاژول در هکتار) است. پس از سوخت فسیلی، ماشین‌آلات کشاورزی با متوسط سهم ۳۰ درصد و کودهای شیمیایی با میانگین ۱۰ درصد در رتبه‌های بعدی قرار دارند. از نظر مصرف انرژی آب آبیاری، برنج (۹/۲۸ درصد) و ذرت علوفه‌ای (۲/۰۶ درصد) به ترتیب بیشترین و کمترین میزان را دارند. نتایج فوق تأکید می‌نماید که ارتقاء کارایی مصرف انرژی در بخش کشاورزی کشور نیازمند راهکارهایی از جمله استفاده از فناوری‌های نوین آبیاری، اصلاح شیوه‌های مصرف نهاده‌ها، آموزش بهره‌برداران و توسعه کشاورزی پایدار و دانش‌بنیان است.

واژه‌های کلیدی: آب آبیاری، بهره‌وری انرژی، کود نیتروژنی، لرستان، مصرف انرژی

مقدمه

نهاده، از چالش‌های اصلی توسعه در تمام کشورهاست؛ زیرا هر گونه اختلال در زنجیره تأمین آن‌ها می‌تواند به‌طور معنادار بر سطح تولیدات کشاورزی تأثیر بگذارد. از این رو، افزایش بهره‌وری و مدیریت بهینه مصرف انرژی، راهبردی کلیدی برای کاهش اثرات زیست‌محیطی ناشی از فرآیندهای تولید مواد غذایی و تحقق پایداری بلندمدت سیستم‌های تولیدی به شمار می‌رود. با این حال، استفاده ناپایدار از نهاده‌های کشاورزی، نظیر کودهای شیمیایی و سوخت‌های فسیلی، پیامدهای

بخش کشاورزی به‌عنوان یکی از ارکان اصلی تأمین امنیت غذایی برای جمعیت رو به رشد جهان، وابستگی شدیدی به منابع حیاتی آب و انرژی دارد. این وابستگی، لزوم ارتقای بهره‌وری آب و انرژی در محصولات کشاورزی را هم‌زمان با حفظ سلامت جامعه و محیط‌زیست دوچندان می‌سازد (Faramzania et al., 2023). تأمین پایدار این دو

۱- گروه مهندسی آب، دانشگاه لرستان، لرستان، ایران

(Email: Shakarami.mas@lu.ac.ir)

(*) نویسنده مسئول:

جدی همچون گرمایش جهانی، کاهش تنوع زیستی و تخریب کیفیت خاک و هوا به دنبال دارد که مدیریت آن‌ها امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر است (Shahbazi et al., 2025).

کشاورزی با سهمی حدود ۵ درصد از مصرف انرژی جهانی، عمدتاً از منابع تجدیدناپذیر، یکی از منابع اصلی انتشار گازهای گلخانه‌ای (GGE) محسوب می‌شود. تعهدات بین‌المللی مانند توافق پاریس، لزوم بازنگری در فرآیندهای تولید این بخش را برای کاهش اثرات زیست‌محیطی ضروری می‌سازد (Platis et al., 2019). تحلیل تولید کشاورزی از دیدگاه انرژی، با تبدیل تمام نهاده‌ها و خروجی‌ها به واحدهای انرژی، ابزاری قدرتمند برای ارزیابی بهره‌وری و پایداری فراهم می‌کند (Michos et al., 2017; Platis et al., 2019). بر اساس گزارش فائو، مصرف انرژی در یک اکوسیستم کشاورزی منجر به افزایش بهره‌وری و تقویت ایمنی محصول می‌شود (FAO, 2019). در اکوسیستم‌های کشاورزی، نیروی کار انسانی، سوخت‌های فسیلی، ماشین‌آلات، برق، آبیاری و مواد شیمیایی، به‌عنوان نهاده‌های مستقیم انرژی شناخته می‌شوند. علاوه بر این، انرژی مصرف‌شده برای تولید خود این نهاده‌ها (مانند انرژی نهفته در تولید کود و ماشین‌آلات) نیز باید در محاسبات لحاظ شود (Michos et al., 2018). این انرژی مکمل به حداکثر رساندن خروجی (تولید) در هر هکتار کمک می‌کند (Taxidis et al., 2015).

البته باید مدنظر داشت که مدیریت تولید کشاورزی، به‌دلیل ماهیت چندمتغیره، نیازمند ابزارهای کارآمد برای ارزیابی اثرات زیست‌محیطی است. اگرچه ابزارهای موجود، غالباً بر نهاده‌های شیمیایی متمرکزند، اما کمی‌سازی سهم انرژی ماشین‌آلات نیز یک گام ضروری است. اهمیت این موضوع در مطالعه موردی خاک‌ورزی آشکار شده است که در آن انتخاب ماشین‌آلات نامناسب سبب افزایش دو برابری هزینه انرژی شده است (Lampridi et al., 2020).

امروزه یکی از مهمترین مباحث اکولوژیکی در بخش کشاورزی و توسعه پایدار، بررسی میزان انرژی تولید شده به ازای مقدار انرژی مصرف شده می‌باشد. به‌طور کلی می‌توان گفت هر سیستم زراعی که بهره‌وری انرژی بالاتری داشته باشد، در جهت توسعه و کشاورزی پایدار حرکت و در مقابل نیز می‌تواند آثار زیان بار زیست‌محیطی و ناپایداری اکولوژیکی را به همراه داشته باشد (Jalilian et al., 2023).

در سطح ملی، مطالعات متعدد به بررسی الگوهای مصرف انرژی در کشاورزی پرداخته‌اند. برآوردها نشان می‌دهد که میانگین عملکرد ذرت در کشور حدود ۶۱۶۷ کیلوگرم در هکتار بوده و برای تولید این میزان محصول، به‌طور متوسط ۵۵ گیگاژول انرژی در هر هکتار مصرف می‌شود. بیشترین سهم مصرف انرژی به کودهای شیمیایی و سوخت‌های فسیلی مربوط است (Mohammadi & Meysami, 2021). تحلیل روند مصرف انرژی در بخش کشاورزی ایران، حاکی از افزایش ۳۲/۴ به ۳۷/۲ گیگاژول بر هکتار طی دوره‌ی زمانی ۱۳۶۹ تا

۱۳۸۵ دارد، به‌طوری‌که نهاده‌های آب آبیاری (۴۰٪) و کودهای نیتروژنه (۲۸٪) به‌عنوان اصلی‌ترین مصرف‌کنندگان انرژی شناسایی شده‌اند (Beheshti Tabar et al., 2010). این الگو در مطالعات موردی دیگر در همدان و تجن نیز تکرار شده است؛ به‌طوری‌که در مزارع سیب‌زمینی استان همدان، مجموع انرژی ورودی برای عملکردی معادل ۲۸ تن در هکتار، ۹۲۲۹۶ مگاژول در هکتار گزارش شده است. در این تحقیق، کود نیتروژن (۳۹٪) و سوخت دیزل (۲۱٪) به‌عنوان مهم‌ترین منابع مصرف انرژی معرفی گردیدند. همچنین میزان سهم بذر، آب و کود آلی به‌ترتیب ۹۰۷۸٪، ۷۰۵٪ و ۶۰۴٪ گزارش شده است (Rajabi Hamedani et al., 2011). در مطالعه‌ای دیگر، با بررسی بهره‌وری فیزیکی آب و شاخص‌های انرژی در محصولات عمده‌ی کشاورزی دشت تجن گزارش گردید، انرژی ورودی برای محصول برنج ۵۹۳۲۵۶ MJ/ha، انرژی خروجی برای ذرت علوفه‌ای ۱۴۱۷۹۵ MJ/ha و بهره‌وری انرژی آن ۱۰۱ kg/MJ بوده است. همچنین مشخص شد که نهاده‌های آب آبیاری، کود نیتروژن و سوخت بیشترین سهم انرژی مصرفی را داشته‌اند (Jafari Telokolaei et al., 2024).

تحلیل میزان مصرف آب و انرژی و اثرات محیط‌زیستی تولید محصولات کشاورزی در دشت میاندربند استان کرمانشاه نشان‌دهنده ناکارآمدی کشاورزی در این دشت و در نتیجه افزایش آلودگی‌های زیست‌محیطی به واسطه مصرف زیاد منابع است. کل مصرف انرژی در این منطقه تقریباً ۹۷۵۶۰۸ مگاژول در هکتار بود که سهم مصرفی انرژی ورودی سیب‌زمینی، ذرت علوفه‌ی و گوجه‌فرنگی در آن به‌ترتیب ۲۵، ۲۲ و ۱۵ درصد است (Karamian et al., 2023).

نتایج مطالعه فان و همکاران (Fan et al., 2020) نیز نشان داد در بخش کشاورزی ۷۰ درصد انرژی به‌صورت غیرمستقیم و ۳۰ درصد به‌صورت مستقیم مصرف می‌شود. در مطالعه‌ای که با هدف بررسی عملکرد و بهره‌وری محصول جو در اتیوپی انجام شد، نتایج نشان داد که میزان بهره‌وری آب در این محصول بین ۲/۰۱ تا ۲/۹۵ کیلوگرم بر متر مکعب می‌باشد (Ararssa et al., 2019). در بررسی مصرف انرژی در شالیزارهای مالزی مشخص شد، میزان انرژی مصرفی به‌منظور تولید برنج در هر هکتار حدود ۱۲۱۸۱ مگاژول است که کود و سوخت بیشترین سهم میزان انرژی ورودی را به خود اختصاص داده‌اند (Bockari-Gevao et al., 2005).

تحلیل چرخه انرژی در سیستم‌های کشاورزی نشان می‌دهد که بیشترین سهم مصرف انرژی به‌ترتیب مربوط به آبیاری (۴۵ درصد)، ماشین‌آلات (۳۰ درصد) و نهاده‌های شیمیایی مانند کود و سموم (۲۵ درصد) است (Nabavi-Pelesaraei et al., 2023). در این میان، سیستم‌های آبیاری به‌دلیل نیاز به پمپاژ و انتقال آب، بیشترین سهم را در مصرف انرژی دارند. لذا با توجه به مطالب بالا، در طی دهه‌های اخیر مهم‌ترین چالش‌های پیش‌روی کشاورزی مدرن، کاهش کارایی مصرف انرژی در طول زمان است. به‌طوری‌که در طول چهار دهه اخیر، با وجود

تا ۵۰ درجه و ۱ دقیقه طول شرقی و ۳۲ درجه و ۴۰ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۲۳ دقیقه عرض شمالی از نصف‌النهار گرینویچ قرار دارد. بر اساس آخرین تقسیمات کشوری، استان لرستان دارای ۱۱ شهرستان، ۳۴ بخش، ۳۳ شهر، ۸۸ دهستان و ۳۰۸۴ آبادی دارای سکنه می‌باشد (سالنامه آماری ۱۴۰۰). اقلیم استان لرستان تحت تأثیر توده‌های هوایی مدیترانه‌ای قرار دارد. بر این اساس سه ناحیه آب و هوایی (۱) آب و هوای گرم و خشک جنوب، (۲) آب و هوای معتدل مرکزی، (۳) آب و هوای سرد شمالی در استان وجود دارد. در مجموع ۲۳ رودخانه دائمی در استان لرستان وجود دارد. کشکان، سیمره، سزار و بختیاری مهمترین رودخانه‌های استان هستند. میانگین دمای ثبت شده در ایستگاه‌های هواشناسی استان ۱۶/۸۱ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. میانگین بارندگی استان لرستان تقریباً ۵۴۹ میلی‌متر می‌باشد (سالنامه آماری ۱۴۰۰). مشخصات شهرستان‌های مورد مطالعه در جدول ۱ ارائه گردیده است. نقشه استان لرستان و پراکنش شهرستان‌های مذکور در شکل ۱ ارائه شده است.

جامعه آماری و نمونه‌گیری

جامعه آماری شامل هزار کشاورز فعال در تولید برنج (در شهرستان درود)، ذرت علوفه‌ای (در کوهدشت) و سیب‌زمینی (در ازنا) بود. برای تعیین حجم نمونه، از فرمول کوکران با سطح اطمینان ۹۵ درصد و میزان خطای ۷ درصد استفاده شد (Heidari Sultanabadi, 2022).

$$n = \frac{\frac{(z^2 \cdot p \cdot q)}{d^2}}{1 + \frac{1}{N} \left(\frac{(z^2 \cdot p \cdot q)}{d^2} - 1 \right)} \quad (۱)$$

که: n حجم نمونه نهایی، z مقدار بحرانی توزیع نرمال، p نسبت برخورداری از صفت مورد مطالعه (اگر نامعلوم باشد، ۰/۵ در نظر گرفته می‌شود)، q برابر است با ۱-p، d خطای مجاز و N حجم نمونه آماری می‌باشد. بر اساس فرمول بالا ۱۸۸ کشاورز فعال در کشت برنج، سیب‌زمینی و ذرت علوفه‌ای به‌عنوان نمونه انتخاب و پرسشنامه‌ها توسط آنان تکمیل گردید.

جمع‌آوری داده‌ها: داده‌ها از طریق پرسشنامه‌های ساختار یافته و مصاحبه حضوری با کشاورزان جمع‌آوری شدند. بخش‌های اصلی پرسشنامه‌ها عبارتند از:

اطلاعات عمومی مربوط به کشاورز و مزرعه: شامل سن، تحصیلات، سابقه کار، وسعت زمین
اطلاعات مربوط به میزان مصرف نهاده‌ها: از جمله نیروی انسانی، ماشین‌آلات، نهاده‌های شیمیایی، سوخت، آب آبیاری و بذر و اطلاعات مربوط به عملکرد محصول

افزایش عملکرد در واحد سطح، کارایی مصرف انرژی در کشاورزی ایران حدود ۲۰ درصد کاهش یافته است (Mousavi Avval et al., 2023). این روند نزولی عمدتاً ناشی از فرسودگی ماشین‌آلات کشاورزی، استفاده از روش‌های سنتی آبیاری و مصرف بی‌رویه نهاده‌های شیمیایی است. مضاعفاً در دهه‌های اخیر، افزایش قیمت حامل‌های انرژی و نگرانی‌های فزاینده درباره تغییرات اقلیمی، توجه محققان و سیاست‌گذاران را به موضوع بهره‌وری انرژی در بخش کشاورزی جلب کرده است.

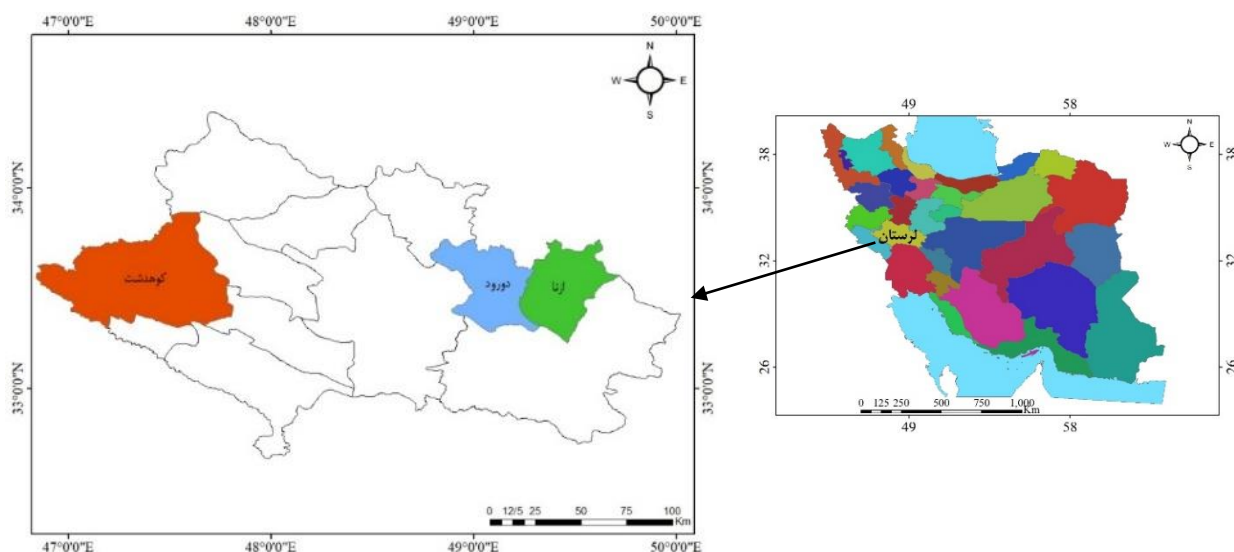
در مجموع، نتایج پژوهش‌های گذشته نشان می‌دهد که تفاوت در ساختار مصرف نهاده‌ها، سهم بالای انرژی‌های غیرتجدیدپذیر و اختلاف در شاخص‌های کارایی بین محصولات مختلف، ضرورت تحلیل دقیق‌تر مصرف آب و انرژی و ارزیابی شاخص‌های مرتبط با آن در نظام‌های زراعی ایران را برجسته می‌سازد. استان لرستان با دارا بودن شرایط اقلیمی متنوع، نقش مهم در تولید محصولات کشاورزی دارد. در این میان، تولید برنج، ذرت علوفه‌ای و سیب‌زمینی بخش قابل‌توجهی از فعالیت‌های کشاورزی این استان را تشکیل می‌دهد. لذا ارزیابی ردپای انرژی در تولید این محصولات می‌تواند به شناسایی نقاط پر مصرف انرژی و ارائه راهکارهای مدیریتی پایدار کمک نماید. لذا پژوهش حاضر با تمرکز بر سه محصول کلیدی استان لرستان (برنج، ذرت علوفه‌ای و سیب‌زمینی) به ارزیابی جامع ردپای انرژی در تولید این محصولات می‌پردازد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش با هدف تحلیل، مقایسه و ارزیابی مصرف آب و انرژی در تولید محصولات کشاورزی برنج ذرت علوفه‌ای و سیب‌زمینی به ترتیب در شهرستان‌های درود، کوهدشت و ازنا در استان لرستان در سال ۱۴۰۳ انجام شد. در این راستا، میزان و الگوی مصرف انرژی و آب برای تولید هر هکتار بررسی و با یکدیگر مقایسه گردید. همچنین، شاخص‌های کمی مرتبط با کارایی انرژی و مصرف آب به‌منظور ارزیابی عملکرد این نظام‌های تولیدی محاسبه شد. علت انتخاب این سه شهرستان و همچنین تنوع محصولات مختلف، تفاوت‌های اقلیمی و الگوی کشت غالب در این مناطق است. به‌گونه‌ای که محصولات برنج، ذرت علوفه‌ای و سیب‌زمینی به‌ترتیب نمایانگر محصولات زراعی برجسته شهرستان‌های درود، کوهدشت و ازنا می‌باشند.

محدوده جغرافیایی مطالعه

استان لرستان با مرکزیت شهر خرم‌آباد، با مساحت حدود ۲۸۱۵۷ کیلومتر مربع (۱/۷ درصد مساحت کشور) در ناحیه جنوب غربی ایران واقع شده است. این استان از نظر جغرافیایی بین ۴۶ درجه و ۵۰ دقیقه



شکل ۱- موقعیت شهرستان‌های مورد مطالعه در ایران
Figure 1- The location of study area in Iran

جدول ۱- مشخصات شهرستان‌های مورد مطالعه
Table 1- Specifications of the studied counties

مشخصات Specifications	شهرستان County		
	درود Doroud	کوهدشت Kohdasht	ازنا Azna
میانگین بارندگی سالانه Average annual rainfall (mm)	600	500	450
میانگین تبخیر سالانه Average annual evaporation (mm)	1800	2500	2000
جمعیت (برآورد ۱۴۰۲) Population (est. 2022)	50000 نفر	100000 نفر	60000 نفر
محصول اصلی کشاورزی Main agricultural product	برنج Rice	ذرت علوفه‌ای Fodder corn	سیب‌زمینی Potato
سطح زیر کشت محصول Area under crop (hectares)	1000	5000	2000
عملکرد محصول Crop yield (tons/hectare)	4	50	30
میانگین دمای سالانه Average Annual Temperature	15.2	17.5	14.8
نوع اقلیم (کپن) Köppen Climate Classification	Cas	Bsk	Cas
روش غالب آبیاری Dominant Irrigation Method	سستی (غرقابی) Flood irrigation	تحت فشار (قطره ای / بارانی) Pressurized (Sprinkler/Drip)	سستی (کرتی) Basin irrigation
راندمان متوسط پمپاژ Average Pumping Efficiency	55%	75%	60%
عمق متوسط آب زیرزمینی (متر) Average Groundwater Depth	2.5	4	3
بافت خاک غالب Dominant soil texture	رسی با زهکش کم Clay texture with poor drainage	رسی شنی Sandy clay texture	لومی رسی Clay loam texture

بیانگر همسانی درونی مناسب پرسشنامه می‌باشد.

محاسبه معادل انرژی نهاده‌ها و ستاده‌ها

جهت محاسبه معادل انرژی نهاده‌ها و ستاده‌ها، تمامی نهاده‌ها و ستاده‌های تولیدی به معادل انرژی برحسب مگاژول بر هکتار (MJ/ha) تبدیل شدند. ضرایب انرژی مورد استفاده برای هر نهاده و ستاده از منابع علمی معتبر (Ozkan et al., 2004; Singh et al., 2004) استخراج گردید. برای محاسبه انرژی خروجی، عملکرد محصول در ضرایب انرژی معادل آن ضرب گردید (Ozkan et al., 2004). معادل انرژی ورودی‌ها و خروجی‌ها در سیستم تولید برنج، ذرت و سیب‌زمینی در جدول ۲ ارائه شده است.

روایی محتوایی پرسشنامه با استفاده از نظرسنجی از برخی کارشناسان اداره جهادکشاورزی استان لرستان و همچنین تعدادی از اعضای هیئت علمی دانشگاه لرستان انجام گرفت. پایایی پرسشنامه نیز با استفاده از ضریب آلفای کرونباخ در نرم‌افزار SPSS مورد ارزیابی قرار گرفت. به منظور سنجش همسانی درونی هر بُعد مفهومی، تحلیل پایایی به صورت تفکیکی برای هر دسته از سؤالات انجام شد. همچنین، سؤالات معکوس بازکدگذاری شدند تا جهت‌گیری پاسخ‌ها با سایر سؤالات همسو گردد. در مرحله بعد، همبستگی هر گویه با مجموع سؤالات بررسی شد و گویه‌هایی که شاخص مناسبی از همبستگی نشان ندادند، از تحلیل پایایی حذف شدند و در نهایت تعداد ۲۸ گویه باقی ماند. نتایج نشان داد که ضریب آلفای کرونباخ برابر با ۰/۸۳ است که

جدول ۲- معادل انرژی ورودی‌ها و خروجی‌ها برای تولید محصولات برنج، ذرت و سیب‌زمینی
Table 2- Energy equivalents for the production of rice, potato and corn products

عنوان Title	معادل انرژی Energy Equivalent (MJ)	منابع References
نیروی انسانی Labor energy (Work hour)	1.96	Singh et al., 2004
سوخت دیزل Diesel fuel (Litr)	31.56	Singh et al., 2004
ماشین‌آلات Machinery (Hour)	62.70	Singh et al., 2004
بذر (کیلوگرم) Seed		
برنج Rice	14.70	Singh et al., 2004
سیب زمینی Potato	3.60	Singh et al., 2004
ذرت Corn	14.70	Singh et al., 2004
آب آبیاری Irrigation water (M ³)	1.02	Singh et al., 2004
سموم Pesticide (kg)		
علف‌کش Herbicide	238.00	Singh et al., 2004
قارچ‌کش Fungicide	216.00	Singh et al., 2004
کود شیمیایی نیتروژن (کیلوگرم) Nitrogen fertilizes	66.14	Singh et al., 2004
ستاده‌ها Output		
ذرت Corn	17.80	Singh et al., 2004
برنج Rice	14.70	Ozkan et al., 2004;
سیب‌زمینی Potato	3.60	Ozkan et al., 2004

اول، داده‌های خام پس از وارد شدن به Excel، تحت فرآیند پاک‌سازی، سازماندهی و مدیریت اولیه قرار گرفتند. سپس داده‌های اصلاح‌شده به SPSS منتقل گردیده و تحلیل‌های آماری شامل آمار توصیفی (میانگین، انحراف معیار، درصد فراوانی) با در نظر گرفتن ماهیت داده‌ها و فرضیات پژوهش در سطح ($p < 0.05$) اجرا شد.

نتایج و بحث

ویژگی‌های فردی و حرفه‌ای پاسخ‌دهندگان

از میان ۱۸۸ کشاورز پاسخ‌دهنده، ۹۲ نفر (۴۸/۹) بیش از ۲۰ سال سابقه فعالیت کشاورزی داشتند، ۷۸ نفر (۴۱/۳) دارای سابقه بین ۵ تا ۲۰ سال بودند و تنها ۱۸ نفر (۹/۸) کمتر از ۵ سال سابقه فعالیت داشتند (جدول ۳). این نتایج نشان‌دهنده تسلط کشاورزان با تجربه در ترکیب جامعه‌ی نمونه است.

جدول ۳- سابقه کشاورزی پاسخ‌دهندگان

Table 3- Respondents agricultural background

تعداد	درصد	سابقه کشاورزی
Count	Percentage	Agricultural background
18	9.8	کمتر از ۵ سال Less than 5 years
78	41.3	بین ۵ تا ۲۰ سال Between 5 to 20 years
92	48.9	بیش از ۲۰ سال More than 20 years
188	100	جمع کل Total

پس از آن، برنج با میزان انرژی ورودی ۱۲۱۱۱۷/۰۹۲۹ مگاژول بر هکتار در رتبه دوم و ذرت علوفه‌ای ۹۸۶۴۴/۲۵۴ مگاژول بر هکتار دارای کمترین انرژی ورودی می‌باشد (جدول ۴).

سهام نهاده‌ها در مصرف انرژی

۱- آب آبیاری

سهام نهاده‌ی آب آبیاری در مصرف انرژی در کشت محصولات مختلف در جدول ۴ ارائه شده است. بر اساس نتایج این جدول مشاهده می‌گردد که انرژی مصرفی مرتبط با آب آبیاری در سه محصول مورد بررسی، نوسانات قابل‌توجهی را نشان داد. بیشترین (۱۱۲۳۶/۳۹۲۹) مگاژول در هکتار) میزان انرژی ورودی ناشی از آبیاری در کشت برنج مشاهده شد که معادل ۹/۲۸ درصد از کل انرژی ورودی بود.

در این پژوهش شاخص‌های نسبت انرژی (Energy Ratio)، بازده خالص انرژی، بهره‌وری انرژی و کارایی مصرف آب استفاده شده است که روابط آنها به شرح زیر است (Mohammadi et al., 2008):

$$(۲) \quad \text{نسبت انرژی} = \frac{\text{انرژی خروجی}}{\text{انرژی ورودی}}$$

$$(۳) \quad \text{انرژی ورودی} - \text{انرژی اخروگی} = \text{بازده خالص انرژی}$$

$$(۴) \quad \text{بهره‌وری انرژی} = \frac{\text{عملکرد محصول}}{\text{انرژی ورودی}}$$

$$(۵) \quad \text{مصرف انرژی آب} = \frac{\text{عملکرد محصول}}{\text{آب آبیاری}}$$

تحلیل آماری

تحلیل داده‌های این پژوهش در دو مرحله با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۶ و Microsoft Excel 2019 انجام شد. در مرحله

توزیع کشت محصولات

از میان کشاورزانی که پرسشنامه این پژوهش را تکمیل کردند، ۴۴/۷ درصد زارعان ذرت علوفه‌ای ۲۹/۸ درصد برنج‌کار و ۲۵/۵ درصد سیب‌زمینی‌کار بودند. لازم به ذکر است که این نسبت‌ها صرفاً بر اساس جامعه پاسخ‌دهندگان به پرسشنامه به‌دست آمده و بیانگر ترکیب کل جمعیت کشاورزان منطقه نیست.

تحلیل مصرف انرژی در تولید محصولات کشاورزی

به‌منظور ارزیابی شاخص‌های انرژی در تولید سه محصول ذرت علوفه‌ای، برنج و سیب‌زمینی، انرژی ورودی نهاده‌های اصلی (آب آبیاری، کود نیتروژن، بذر و نیروی انسانی) محاسبه و تحلیل گردید. نتایج نشان داد، از بین محصولات، کشت سیب‌زمینی با مصرف ۱۲۳۰۴۸/۶۶ مگاژول بر هکتار بالاترین میزان انرژی ورودی را دارد.

جدول ۴- مصرف انرژی در کشت محصولات مورد مطالعه
Table 4- Energy consumption in the cultivation of studied crops

نهاده مصرف انرژی Energy consumption input	برنج Rice		ذرت علوفه‌ای Fodder corn		سیب‌زمینی Potato	
	میزان مصرف انرژی Energy consumption (MJ/ha)	درصد از کل Percentage of total	میزان مصرف انرژی Energy consumption (MJ/ha)	درصد از کل Percentage of total	میزان مصرف انرژی Energy consumption (MJ/ha)	درصد از کل Percentage of total
آب آبیاری Irrigation water	11236.39	9.28	2027.86	2.06	2550.00	2.07
سوخت Fuel	60543.31	50.00	60017.08	60.85	71584.09	58.17
ماشین‌آلات Machinery	40033.95	33.05	25204.50	25.55	32678.80	26.56
کود نیتروژن Nitrogen fertilizes	7252.14	5.96	9372.59	9.48	7810.00	6.35
سموم (علف‌کش‌ها، قارچ‌کش ها و غیره) Insecticides	1496.16	1.24	1506.27	1.53	1745.80	1.42
انرژی کارگری Labor energy	14.91	0.02	26.46	0.03	19.97	0.02
بذر Seed	540.23	0.45	489.50	0.50	6660.00	5.41
کل انرژی ورودی (برای یک هکتار) Total energy input	121117.10	100.00	98644.25	100.00	123048.66	100.00
کل انرژی خروجی (برای یک هکتار) Total energy output	55000.00	-	406250.00	-	151200.00	-

را نسبت به محصولاتی نظیر ذرت و سیب‌زمینی گزارش کرده است. در همین راستا، مطالعه منصوریان (Mansourian, 2005) نیز بر ارتباط مستقیم بین کاهش بهره‌وری مصرف منابع و تخریب زیست‌محیطی تأکید داشته و نشان داده است که استفاده ناکارآمد از منابع انرژی و آب منجر به ناپایداری کشاورزی می‌شود. در تحقیق دیگر پیمنتال و همکاران (Pimentel et al., 2004) گزارش نمودند، در نظام‌های کشاورزی با آبیاری سطحی و راندمان پایین، آب به یکی از پرهزینه‌ترین نهاده‌ها از منظر انرژی تبدیل می‌شود. همچنین، مکونن و هوکسترا (Mekonnen & Hoekstra, 2011) در برآورد ردپای آب محصولات کشاورزی جهانی، مصرف آب برنج را در صدر محصولات با ردپای بالای آب و انرژی معرفی کرده‌اند. در مقابل، محصولاتی مانند ذرت علوفه‌ای که نیاز آبی کمتر و راندمان بالاتری دارند، انرژی کمتری برای

این امر بیانگر وابستگی شدید این محصول به منابع آب و انرژی فسیلی برای پمپاژ و انتقال آب است. در مقابل، سهم انرژی آب آبیاری در کشت سیب‌زمینی و ذرت به ترتیب ۲۵۵۰ مگاژول (معادل ۲/۰۷٪ کل انرژی ورودی) و ۲۰۲۸ مگاژول (معادل ۲/۰۶٪ کل انرژی ورودی) می‌باشد. دلیل کمتر سهم انرژی آب آبیاری در کشت سیب‌زمینی و ذرت می‌تواند، به دلیل دوره رشد کوتاه‌تر، عمق کمتر آبیاری و کارایی بالاتر سیستم‌های آبیاری مکانیزه باشد (جدول ۴). مقدار انرژی آب در برنج حدود پنج برابر سایر محصولات بوده و از نظر درصدی نیز بیشترین سهم را در ترکیب انرژی ورودی برنج دارد. نتایج پژوهش حاضر با پژوهش‌های داخلی و بین‌المللی هم‌راستا است. در این زمینه حیدری (Heidari, 2011) در بررسی کارایی مصرف آب در استان‌های مختلف ایران، عملکرد پایین محصولات آب‌بر مانند برنج

آبیاری مصرف می‌کنند. در این تحقیق نیز مشاهده شد که سهم انرژی آب آبیاری در ذرت علوفه‌ای حدود یک‌سوم تا نصف سهم آن در برنج است. این یافته با نتایج پژوهش جلیلی و همکاران (Jalili et al., 2016) همخوانی دارد. محققان اخیر گزارش نمودند، استفاده از سیستم‌های آبیاری نوین در ذرت، می‌تواند تا ۴۰ درصد مصرف انرژی آبی را کاهش دهد.

۲- سوخت

سهم نهاده‌ی سوخت در مصرف انرژی در کشت محصولات مختلف در جدول ۴ ارائه شده است. بر اساس نتایج این جدول مشاهده می‌گردد که سوخت مهم‌ترین نهاده از نظر سهم در کل انرژی ورودی سه محصول به شمار می‌آید. در ذرت علوفه‌ای، انرژی حاصل از سوخت برابر با ۶۰۰۱۷/۰۸ مگاژول در هکتار (معادل ۶۰/۸۵٪ انرژی ورودی) محاسبه شد که بیشترین درصد را در میان محصولات مورد بررسی را نشان می‌دهد. در سیب‌زمینی نیز مقدار مشابهی مشاهده شد؛ به‌طوری که انرژی ناشی از سوخت ۷۱۵۸۴/۰۹ مگاژول در هکتار (۵۸/۱۷٪ انرژی ورودی) برآورد شد. در کشت برنج این مقدار ۶۰۵۴۳/۳۱ مگاژول (۵۰٪ انرژی ورودی) بود که علی‌رغم سهم بالا، نسبت به سایر محصولات اندکی کمتر است (جدول ۴). میثمی و جلالی (Maysami & Jalali, 2020) نیز گزارش نمودند، در محصول گندم، از بین نهاده‌های مصرف انرژی، انرژی نهاده سوخت، بیشترین مقدار را به خود اختصاص داده است. نتایج مشابهی توسط زاهدی و همکاران (Zahedi et al., 2015) در خصوص بالا بودن سهم سوخت دیزلی در تولید سیب‌زمینی و چغندر قند و فایبانی و همکاران (Fabiani et al., 2020) در تولید محصول گندم گزارش شده است.

۳- ماشین‌آلات

برنج با مجموع مصرف انرژی ماشین‌آلات ۴۰۰۳۳/۹۵ واحد، بیشترین میزان انرژی را در این بخش به خود اختصاص داده است. این مقدار بالا عمدتاً ناشی از مصرف قابل‌توجه انرژی ماشین‌آلات در مراحل آبیاری (۹۰۲۸۸ واحد) و خاک‌ورزی (۱۸۸۱ واحد) است که نشان‌دهنده وابستگی شدید سیستم تولید برنج به ماشین‌آلات سنگین و تخصصی در مدیریت آب و آماده‌سازی زمین است. در رتبه دوم، سیب‌زمینی با مجموع مصرف انرژی ماشین‌آلات ۳۲۶۷۸/۸ واحد قرار دارد. بیشترین سهم در این میزان مربوط به مرحله آبیاری (۱۸۰۵۷/۶ واحد) و پس از آن خاک‌ورزی (۷۵۲/۴ واحد) است. با وجود اینکه مصرف انرژی ماشین‌آلات در سیب‌زمینی کمتر از برنج است، اما همچنان نقش ماشین‌آلات در مراحل کلیدی کشت و نگهداری این محصول، به‌ویژه در تأمین آب مورد نیاز، قابل‌توجه است. کمترین میزان انرژی مصرفی ماشین‌آلات به ذرت اختصاص یافته است، با مجموع ۲۵۲۰۴/۵ واحد.

این محصول عمدتاً در مراحل آبیاری (۲۴۰۷۶ واحد) و خاک‌ورزی (۶۲۷ واحد) بیشترین مصرف انرژی ماشین‌آلات را داشته است. ارقام پایین‌تر ذرت نسبت به دو محصول دیگر، نشان‌دهنده نیاز کمتر این محصول به عملیات سنگین ماشینی در مقایسه با برنج و سیب‌زمینی است (جدول ۴ و جدول ۵).

۴- کود نیتروژن

بیشترین سهم انرژی مربوط به کود در ذرت علوفه‌ای مشاهده شد، که با ۹۳۷۲/۵۸۹ مگاژول در هکتار (معادل ۹۰/۴۸٪ انرژی ورودی) بخش قابل‌توجهی از کل انرژی را تشکیل داد. در برنج و سیب‌زمینی این مقدار به‌ترتیب ۷۲۵۲/۱۴ مگاژول (معادل ۵/۹۶٪ انرژی ورودی) و ۷۸۱۰ مگاژول (معادل ۶/۳۵٪ انرژی ورودی) محاسبه شد. بدین ترتیب، کودهای شیمیایی در مجموع حدود ۵ تا ۱۰ درصد کل انرژی ورودی مزارع موجود در این تحقیق را به خود اختصاص می‌دهند و از نظر اثرگذاری در رتبه‌ی سوم پس از سوخت و ماشین‌آلات قرار دارند (جدول ۴).

با توجه به نتایج بالا مشاهده می‌گردد که مقدار مطلق انرژی کود در ذرت از دو محصول دیگر بیشتر است و از نظر درصدی نیز نسبت به کل انرژی ورودی سهم بالاتری دارد. سهم انرژی معادل کود شیمیایی، به‌ویژه کود نیتروژن، نیز بخش عمده‌ای از انرژی ورودی را در محصولات مورد مطالعه به خود اختصاص می‌دهد که این امر، انرژی ورودی مزرعه را افزایش و بهره‌وری انرژی را کاهش می‌دهد (Sheikhzindin & Ghyasi, 2022). در کشت سیب‌زمینی، کودهای شیمیایی نیز سهم قابل‌توجهی در انرژی ورودی داشته‌اند. این محصول به‌ویژه در مراحل اولیه رشد، نیاز بالایی به تغذیه ازت و پتاس دارد. طبق یافته‌های این تحقیق، سهم انرژی معادل کود مصرفی در کشت سیب‌زمینی ۵/۹۶ درصد بوده که عمدتاً ناشی از مصرف بالای اوره و کودهای پتاسه است. مطالعه روی و همکاران (Roy et al., 2006) نیز تأیید می‌کند که تولید و مصرف کود نیتروژن به‌تنهایی حدود ۱٫۵ درصد از کل مصرف انرژی جهانی را به خود اختصاص می‌دهد. نتایج مطالعه تقی‌زاده و همکاران (Taghinazhad et al., 2019) نشان داده که ۵۵ درصد سهم انرژی ورودی محصول گندم در اردبیل مربوط به انرژی غیرمستقیم (کود، سموم شیمیایی، بذر و ماشین‌آلات) است.

۵- سموم (آفت‌کش‌ها و علف‌کش‌ها و قارچ‌کش‌ها)

سهم نهاده‌ی سموم در مصرف انرژی در کشت محصولات مختلف در جدول ۴ ارائه شده است. بر اساس نتایج این جدول مشاهده می‌گردد که در ذرت علوفه‌ای، انرژی حاصل از مصرف سموم برابر با ۱۵۰۶/۲۶۸ مگاژول در هکتار (معادل ۱/۵۳٪ انرژی ورودی) است که این مقدار انرژی اندکی بالاتر از مصرف انرژی در سایر محصولات می‌باشد. در

محصولات است (جدول ۴).

در کشت برنج، میزان مصرف بذر نسبت به سیب‌زمینی کمتر است، اما با توجه به تفاوت در روش‌های کاشت (کشت مستقیم یا نشایی)، مقدار مصرف و به تبع آن انرژی معادل بذر، می‌تواند متغیر باشد. در برخی محصولات مانند کشت ذرت علوفه‌ای، به دلیل تراکم بوته استاندارد (به‌طور معمول بین ۲۵ تا ۴۰ کیلوگرم در هکتار) میزان بذر مصرفی پایین است. این موضوع با یافته‌های پژوهش محمدی و امیدی (Mohammadi & Omid, 2010) در مورد تولید ذرت در ایران مطابقت دارد، که در آن انرژی بذر در مقایسه با سایر نهاده‌ها مانند سوخت و کود شیمیایی کمترین سهم را به خود اختصاص داده بود.

نتایج حاصل از جدول ۵ نشان می‌دهد که برنج در اغلب مراحل، به‌ویژه در خاک‌ورزی (ماشین‌آلات ۱۸۸۱؛ سوخت ۹۴۶۸) و آبیاری (آب ۵۷۳۳/۶۹)، انرژی‌برترین محصول بوده و مصرف انرژی بالایی در بخش آب و ماشین‌آلات دارد. سیب‌زمینی در بخش بذر (۶۶۶۰) و مصرف سوخت آبیاری (۶۵۳۳۵/۸۹) بیشترین انرژی را به خود اختصاص داده و همین عامل سهم آن را در مصرف کل انرژی افزایش می‌دهد. ذرت به‌طور کلی کمترین انرژی مصرفی را در بیشتر مراحل زراعی دارد (مانند ماشین‌آلات در بخش خاک‌ورزی ۶۲۷)، هرچند در برخی بخش‌ها مانند کود نیتروژن (۹۳۷۲/۵۸۹) و نیروی کارگری (۷/۸۴) سهم بیشتری از مصرف را ثبت کرده است. این تفاوت‌ها نشان می‌دهد که نوع محصول، شیوه کاشت و نیازهای مدیریتی آن نقش مهمی در الگوی مصرف انرژی داشته و تحلیل این شاخص می‌تواند برای بهینه‌سازی سیستم‌های تولید و کاهش هزینه‌های انرژی اهمیت بالایی داشته باشد (جدول ۵).

شاخص‌های مهم انرژی برای محصولات مورد مطالعه

۱- نسبت انرژی (Energy ratio)

بررسی شاخص نسبت انرژی در سه محصول زراعی نشان داد که ذرت علوفه‌ای با مقدار ۴/۱۱، بالاترین نسبت انرژی را داراست. این مقدار بیانگر آن است که سهم انرژی خروجی نسبت به انرژی ورودی در ذرت بیشتر از سایر محصولات است. در سیب‌زمینی، نسبت انرژی برابر با ۱/۲۲ به‌دست آمد که بیانگر کارایی متوسط و مصرف نسبتاً بالا در بخش سوخت و بذر است. در مقابل، برنج با نسبت انرژی ۰/۴۵ کمترین میزان کارایی انرژی را در میان محصولات مورد مطالعه نشان داد (جدول ۶).

سیب‌زمینی و برنج این مقادیر به‌ترتیب ۱۷۴۵/۸ مگاژول (معادل ۱/۴۲٪ انرژی ورودی) و ۱۴۹۶/۱۶ مگاژول (معادل ۱/۲۴٪ انرژی ورودی) برآورد گردید. این اختلاف اندک حاکی از مشابه بودن سطح مصرف سموم در بین محصولات است (جدول ۴).

۶- نیروی انسانی

سهم نیروی انسانی در مصرف انرژی در کشت محصولات مختلف در جدول ۴ ارائه شده است. بر اساس نتایج این جدول مشاهده می‌گردد که سهم انرژی نیروی انسانی در تولید هر سه محصول بسیار محدود و ناچیز بود که بیانگر سطح بالای مکانیزاسیون و وابستگی به انرژی‌های فسیلی است. در ذرت، انرژی متناظر با فعالیت انسانی ۲۶/۴۶ مگاژول در هکتار (معادل ۰/۰۳٪ انرژی ورودی)، در سیب‌زمینی ۱۹/۹۷ مگاژول (معادل ۰/۰۲٪ انرژی ورودی) و در برنج مگاژول (معادل ۰/۰۲٪ انرژی ورودی) محاسبه شد. این ارقام نشان می‌دهند، نقش مستقیم انسان در تأمین انرژی فیزیکی در فرآیند تولید در مزارع مورد مطالعه کمتر از یک‌دهم درصد کل انرژی ورودی است (جدول ۴). البته نباید فراموش کرد که نیروی کار انسانی در بسیاری از نظام‌های کشاورزی سنتی و نیمه‌مکانیزه همچنان نقش مهمی در انجام عملیات زراعی ایفا می‌کند. هر چند در تحقیق حاضر، سهم انرژی معادل نیروی کارگری نسبت به نهاده‌هایی مانند کود، سوخت یا آب آبیاری معمولاً پایین‌تر است، اما در محصولات خاصی نظیر برنج که به عملیات دستی بیشتری نیاز دارد، این سهم می‌تواند قابل توجه باشد.

۷- بذر

سهم بذر در مصرف انرژی در کشت محصولات مختلف در جدول ۴ ارائه شده است. بر اساس نتایج این جدول مشاهده می‌گردد که انرژی ورودی ناشی از بذر تفاوت آشکاری میان محصولات مورد بررسی نشان داد. در سیب‌زمینی، انرژی بذر ۶۶۶۰ مگاژول در هکتار (معادل ۵/۴۱٪ انرژی ورودی) بود که به‌طور قابل‌توجهی بیشتر از سایر محصولات است. این امر ناشی از استفاده از غده‌های بذری سنگین با چگالی انرژی بالا در مقایسه با بذرهای خشک غلات است. در مقابل، در ذرت و برنج انرژی بذر به‌ترتیب ۴۸۹/۵ مگاژول (معادل ۰/۵٪ انرژی ورودی) و ۵۴۰/۲۳ مگاژول (معادل ۰/۴۵٪ انرژی ورودی) محاسبه شد که تفاوت چندانی با یکدیگر ندارند. به نظر می‌رسد، سهم بالای انرژی بذر در سیب‌زمینی، از دلایل مهم انرژی بالاتر این محصول نسبت به سایر

جدول ۵- مصرف انرژی در محصولات مورد مطالعه به تفکیک عملیات زراعی

Table 5- Energy consumption of the studied products, broken down by agricultural operation

نام عملیات زراعی Agricultural Operation	نام محصول زراعی Crop Name	انرژی ماشین آلات Machinery Energy	انرژی سوخت Fuel Energy	انرژی بذر Seed Energy	انرژی آب آبیاری Irrigation Water	انرژی کود نیتروژن Nitrogen Fertilizes	انرژی نیروی کارگری Labor Energy	انرژی سموم (علف کش ها، قارچ کش ها و غیره) Insecticides
خاک ورزی Tillage	برنج Rice	1881.00	9468.00	-	2239.20	-	3.92	-
	ذرت Corn	627.00	3156.00	-	-	-	7.84	-
	سیب زمینی Potato	752.40	3787.20	-	-	-	5.80	-
کاشت Planting	برنج Rice	250.80	789.00	540.23	3262.48	7252.14	2.94	-
	ذرت Corn	125.40	631.20	489.50	674.35	9372.59	5.88	-
	سیب زمینی Potato	175.50	820.60	6660.00	1203.78	7810.00	3.92	-
پمپاژ آب Water Pumping	برنج Rice	37620.00	48865.91	-	5733.69	-	2.52	-
	ذرت Corn	24076.00	54809.68	-	1352.00	-	5.88	-
	سیب زمینی Potato	31350.00	65335.89	-	1345.00	-	4.72	-
سمپاشی Pesticide	برنج Rice	94.05	158.00	-	1.02	-	1.96	1496.16
	ذرت Corn	156.70	473.40	-	1.53	-	2.94	1506.27
	سیب زمینی Potato	250.50	631.20	-	1.22	-	3.53	1745.80
برداشت Harvesting	برنج Rice	188.10	1262.40	-	-	-	3.57	-
	ذرت Corn	219.40	946.80	-	-	-	3.92	-
	سیب زمینی Potato	150.40	1009.20	-	-	-	2.00	-

جدول ۶- نسبت انرژی در محصولات مورد مطالعه

Table 6- Energy ratio of the studied crops

محصول Crop	انرژی ورودی (MJ/ha) Energy input	انرژی خروجی (MJ/ha) Energy output	نسبت انرژی Energy ratio
برنج Rice	121117.0929	55000	0.45
ذرت علوفه ای Forage corn	98644.254	406250	4.11
سیب زمینی Potato	123048.66	151200	1.22

جدول ۷- بازده خالص انرژی در محصولات مورد مطالعه

Table 7- Net energy efficiency in the studied crops

محصول Crop	انرژی ورودی (MJ/ha) Energy input	انرژی خروجی (MJ/ha) Energy output	بازده خالص انرژی (MJ/ha) Net energy yield (MJ/ha)
برنج Rice	121117.0929	55000	-66117.0929
ذرت علوفه‌ای Forage corn	98644.254	406250	307605.746
سیب‌زمینی Potato	123048.66	151200	28151.34

۲- بازده خالص انرژی (Net energy)

نتایج نشان داد که ذرت علوفه‌ای با بازده خالص انرژی ۳۰۷۶۰۵/۷۴۶ مگاژول در هکتار بالاترین عملکرد انرژی را در میان سه محصول دارد. این مقدار بیانگر کارایی بالای انرژی و تناسب مطلوب میان انرژی ورودی و خروجی دارد. بالا بودن بازده خالص انرژی در ذرت عمدتاً به دلیل عملکرد زیاد ماده‌ی خشک و ضریب انرژی بالای این محصول می‌باشد. در سیب‌زمینی، بازده خالص انرژی ۲۸۱۵۱/۳۴ مگاژول در هکتار محاسبه شد. این مقدار مثبت نشان‌دهنده‌ی تراز انرژی قابل قبول است، اگرچه شدت بالای مصرف سوخت و بذری باعث افزایش انرژی ورودی شده است. در مجموع، کارایی انرژی این محصول در سطح متوسط ارزیابی می‌شود. در مقابل، برنج با بازده خالص انرژی منفی ۶۶۱۱۷/۰۹۲۹ مگاژول در هکتار کمترین میزان را نشان داد (جدول ۷).

۳- بهره‌وری انرژی (Energy productivity)

در تحلیل بهره‌وری انرژی محصولات برنج، ذرت علوفه‌ای و سیب‌زمینی، شاخص بهره‌وری انرژی به عنوان نسبت عملکرد محصول به انرژی ورودی بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد که ذرت علوفه‌ای و سیب‌زمینی به ترتیب دارای بهره‌وری انرژی ۰/۳۰ و ۰/۳۴ کیلوگرم محصول به ازای هر مگاژول انرژی ورودی هستند که بیانگر استفاده مؤثر و بهینه از انرژی مصرفی در تولید این محصولات است. در مقابل،

جدول ۸- بهره‌وری انرژی در محصولات مورد مطالعه

Table 8- Energy productivity of the studied crops

محصول Crop	انرژی ورودی (MJ/ha) Energy input	عملکرد محصول (kg/ha) Crop yield	بهره‌وری انرژی (MJ.kg) Energy efficiency (MJ.kg)
برنج Rice	121117.0929	3500	0.02
ذرت علوفه‌ای Forage corn	98644.254	30000	0.30
سیب‌زمینی Potato	123048.66	42000	0.34

برنج با بهره‌وری انرژی ۰/۰۲ کیلوگرم به ازای هر مگاژول انرژی ورودی، عملکرد پایین‌تری دارد (جدول ۸). این یافته‌ها بیانگر آن است که ذرت و سیب‌زمینی از نظر بهره‌وری انرژی مشابه و حدود ده برابر کاراتر از برنج هستند. این الگو با نتایج پژوهش یوسفی و همکاران (Yousefi et al., 2021) درخصوص برنج استان گیلان هم‌خوانی دارد. این محققان، نیز نسبت انرژی و بهره‌وری انرژی را به ترتیب ۰/۶۶ و ۰/۰۴ گزارش کردند و کل انرژی موردنیاز برای تولید شلتوک برنج را ۸۸۰۶۴ MJ/ha برآورد نمودند که بخش عمده‌ای از آن (حدود ۵۳٪) مربوط به مصرف سوخت دیزل و ماشین‌آلات کشاورزی بود.

۴- کارایی مصرف انرژی آب (Water use energy efficiency, WUEE)

در بررسی کارایی مصرف آب در محصولات برنج، ذرت علوفه‌ای و سیب‌زمینی، شاخص کارایی مصرف آب که نسبت عملکرد محصول به میزان انرژی معادل آب آبیاری است، به عنوان معیاری مهم برای ارزیابی بهره‌وری مصرف منابع آبی مورد توجه قرار گرفت (جدول ۸). نتایج نشان می‌دهد که سیب‌زمینی با میزان کارایی مصرف آب معادل ۱۶,۴ کیلوگرم محصول به ازای هر مگاژول انرژی آبیاری، بیشترین کارایی انرژی آب را در بین ۳ محصول مطالعه شده در این تحقیق را دارد.

جدول ۹- کارایی مصرف انرژی آب در محصولات مورد مطالعه

Table 9- Water-energy productivity efficiency in the studied crops

محصول Crop	انرژی معادل آب آبیاری (MJ/ha) Energy water irrigation	عملکرد محصول (kg/ha) Crop yield	کارایی مصرف آب (kg.MJ) Water consumption efficiency (kg.MJ)
برنج Rice	11236.39	3500	0.31
ذرت علوفه‌ای Forage corn	1924.63	30000	15.5
سیب‌زمینی Potato	2550	42000	16.4

انرژی و کارایی بین محصولات برنج، ذرت علوفه‌ای و سیب‌زمینی، تفاوت عددی قابل‌توجهی وجود دارد. مقدار کل انرژی ورودی در سیب‌زمینی، برنج و ذرت به ترتیب ۱۲۳۰۴۸/۶۶، ۱۲۱۱۱۷/۰۹۲۹ و ۹۸۶۴۴/۲۵۴ و انرژی خروجی این سه محصول به ترتیب ۱۵۱۲۰۰، ۵۵۰۰۰ و ۴۰۶۲۵۰ مگاژول در هکتار برآورد گردید. بر اساس این داده‌ها، بیشترین انرژی ورودی مربوط به سیب‌زمینی و بیشترین انرژی خروجی متعلق به ذرت علوفه‌ای است. مقایسه‌ی اجزای انرژی ورودی، نشان داد سوخت فسیلی بیشترین سهم را در همه‌ی محصولات به خود اختصاص داده است. اما بیشترین میزان درصد سوخت در ذرت علوفه‌ای با ۶۰/۸۵ درصد و بیشترین میزان عددی آن مربوط به سیب‌زمینی با ۷۱۵۸۴/۰۹ مگاژول در هکتار است. بعد از سوخت فسیلی، ماشین‌آلات با میانگین سهم حدود ۳۰ درصد در رتبه‌ی دوم و کودهای شیمیایی با میانگین حدود ۱۰ درصدی در رتبه سوم اجزای انرژی ورودی قرار دارد. از نظر مصرف انرژی مربوط به آب آبیاری، برنج با ۹/۲۸ درصد و ذرت علوفه‌ای با ۲/۰۶ درصد به ترتیب دارای بیشترین و کمترین میزان بودند. به‌طور کلی، مقایسه‌ی کمی شاخص‌ها نشان می‌دهد که ذرت علوفه‌ای در تمام معیارهای انرژی و کارایی در رتبه‌ی نخست قرار دارد. پس از آن، سیب‌زمینی با مقادیر میانی و برنج در تمامی شاخص‌ها دارای کمترین مقادیر عددی است. این تفاوت‌ها از نظر کمی نشان می‌دهد که ساختار مصرف نهاده‌ها و ترکیب انرژی ورودی در سه محصول به‌طور معنی‌داری متفاوت است. این تحلیل‌ها تأکید می‌کنند که ارتقاء کارایی مصرف انرژی در بخش کشاورزی کشور نیازمند راهکارهایی از جمله استفاده از فناوری‌های نوین آبیاری، اصلاح شیوه‌های مصرف نهاده‌ها، آموزش بهره‌برداران و توسعه کشاورزی پایدار و دانش‌بنیان است.

پس از آن، ذرت علوفه‌ای با کارایی ۱۵,۵ کیلوگرم در هر مگاژول انرژی آب قرار دارد که نشان‌دهنده عملکرد مطلوب در مصرف بهینه آب است. در مقابل، برنج با کارایی ۰/۳۱ کیلوگرم محصول به ازای هر مگاژول انرژی آبیاری، کمترین کارایی مصرف آب را دارد که می‌تواند به نیاز آبی بالاتر و روش‌های سنتی آبیاری این محصول نسبت داده شود (جدول ۹).

به عبارت دیگر، میزان کارایی مصرف آب در ذرت و سیب‌زمینی بیش از پنجاه برابر بیشتر از برنج بوده است. این یافته با مطالعات حسن‌زاده و مظاهری (Hasanzadeh & Mazaheri, 1996) و همچنین کوچکی و حسینی (Kuchaki & Hoseini, 1994) مطابقت دارد که کارایی انرژی محصولات زراعی را برای برنج پایین‌تر از سایر محصولات یعنی ۱/۳ kg/m³ گزارش کرده‌اند. تحلیل چرخه انرژی در سیستم‌های کشاورزی نشان می‌دهد که بیشترین سهم مصرف انرژی به ترتیب مربوط به آبیاری (۴۵ درصد)، ماشین‌آلات (۳۰ درصد) و نهاده‌های شیمیایی مانند کود و سموم (۲۵ درصد) است (Nabavi-Pelesaraei et al., 2023). در این میان، سیستم‌های آبیاری به دلیل نیاز به پمپاژ و انتقال آب، بیشترین سهم را در مصرف انرژی دارند.

نتیجه‌گیری

تحقیق حاضر با هدف تحلیل، مقایسه و ارزیابی مصرف آب و انرژی در تولید محصولات کشاورزی برنج ذرت علوفه‌ای و سیب‌زمینی به ترتیب در شهرستان‌های درود، کوه‌دشت و ازنا در استان لرستان انجام شد. در این راستا، میزان و الگوی مصرف انرژی و آب برای تولید هر هکتار بررسی و با یکدیگر مقایسه گردید. همچنین، شاخص‌های کمی مرتبط با کارایی انرژی و مصرف آب به منظور ارزیابی عملکرد این نظام‌های تولیدی محاسبه شد. نتایج نشان داد که از نظر شاخص‌های

References

- Ararssa, A., Gebremariam, A., Mulat, W., & Mekonnen, M. (2019). Effects of irrigation management on yield and water productivity of barley (*Hordeum vulgare*) in the upper Blue Nile basin: Case study in northern Gondar. *Water Conservation Science and Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s41101-019-00071-8>

2. Beheshti Tabar, I., Keyani, A., & Rafiee, S. (2010). Energy balance in Iran's agronomy sector (1990–2006). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 849–855. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.10.024>
3. Bockari-Gevao, S.M., Ismail, W.I., Yahya, A., & Wan, C. (2005). Energy consumption in lowland rice-based cropping system of Malaysia. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, 27(4), 819–826.
4. Fabiani, S., Vanino, S., Napoli, R., & Nino, P. (2020). Water-energy-food nexus approach for sustainability assessment at farm level: An experience from an intensive agricultural area in central Italy. *Environmental Science and Policy*, 104, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2019.10.008>
5. Fan, X., Zhang, W., Chen, W., & Chen, B. (2020). Land–water–energy nexus in agricultural management for greenhouse gas mitigation. *Applied Energy*, 265, 114796. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114796>
6. Faramzania, M., Akbari, M., & Heidari Sultanabadi, M. (2023). Water and energy productivity of onion crop in sprinkler and surface irrigation methods in some farms of Isfahan province. *Journal of Water and Soil Science*, 27(4), 131–142. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.47176/jwss.27.4.14833>
7. Food and Agriculture Organization (FAO). (2019). *Agroforestry*. Available online: <http://www.fao.org/forestry/agroforestry/80338/en/>
8. Hasanzadeh, E., & Mazaheri, D. (1996). Assessment of energy balance in wheat, potato, and rice production in the Falavarjan region of Isfahan. In *Proceedings of the Iranian Congress of Agronomy and Plant Breeding*. Isfahan University of Technology, Isfahan. <https://doi.org/10.18869/acadpub.jcpp.5.15.69>
9. Heidari Sultanabadi, M. (2022). Determination of energy production function in irrigated wheat of Isfahan province. *Energy Engineering and Management*, 11(1), 116–127. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22052/11.1.116>
10. Heidari, N. (2011). Determination and evaluation of water use efficiency index for agricultural crops under farmers' management in the country. *Water and Irrigation Management Journal*, 1(2), 43–57. (In Persian with English abstract)
11. Jafari Telokolaie, M., Shahnazari, A., & Noori Khajeh Balagh, R. (2024). Analysis of physical water productivity and energy indices of major agricultural crops in the Tajan plain. *Journal of Water Research in Agriculture*, 38(1), 51–62. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22092/jwra.2023.363890.1016>
12. Jalili, Kh., Moradi, H., & Bozorg Haddad, O. (2016). Investigating the effects of climate change on groundwater resources of the Islam Abad plain and optimizing land allocation. *Desert Ecosystem Engineering*, 5(11), 117–131. (In Persian with English abstract)
13. Jalilian, A., Jahansuz, M., Ghasemi Moteqadder, H., Arisi, S., & Moghaddam, M. (2023). Evaluation of energy indicators in sole, mixed, and agroforestry systems for okra production in Khuzestan province. *Iranian Journal of Crop Sciences*, 16(7–2), 17–20. (In Persian with English abstract)
14. Karamian, F., Mirakzadeh, A., & Azari, A. (2023). Analysis of water and energy consumption and environmental impacts of agricultural production in Miandarband plain of Kermanshah province. *Journal of Agroecology*, 14(4), 693–712.
15. Kuchaki, A., & Hoseini, M. (1994). *Energy efficiency in agricultural ecosystems*. Ferdowsi University of Mashhad Press, Mashhad.
16. Lampridi, M., Kateris, D., Sørensen, C., & Bochtis, D. (2020). Energy footprint of mechanized agricultural operations. *Energies*, 13(3), 769. <https://doi.org/10.3390/en13030769>
17. Mansourian, N. (2005). Investigation of energy productivity in the agricultural sector of Iran (A case study of Khorasan province). *Proceedings of the 5th Iranian Conference on Agricultural Economics*, Zahedan. (In Persian). Available at: <https://civilica.com/?doc=49811>
18. Maysami, M., & Jalali, A. (2020). Evaluation of energy input-output in wheat crop cultivation in agro-industry company of mazare novin Iranian (Agh Ghalla). *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 30(2), 333–346. (In Persian with English abstract)
19. Mekonnen, M.M., & Hoekstra, A.Y. (2011). The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(5), 1577–1600. <https://doi.org/10.5194/hess-15-1577-2011>
20. Michos, M., Menexes, G., Kalburtji, K., Tsatsarelis, C., Anagnostopoulos, C., & Mamolos, A. (2017). Could energy flow in agro-ecosystems be used as a “tool” for crop and farming system replacement? *Ecological Indicators*, 73, 247–253. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.09.050>

21. Michos, M., Menexes, G., Mamolos, A., Tsatsarelis, C., Anagnostopoulos, C., Tsaboula, A., & Kalburtji, K. (2018). Energy flow, carbon and water footprints in vineyards and orchards to determine environmentally favourable sites in accordance with Natura 2000 perspective. *Journal of Cleaner Production*, 187, 400–408. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.251>
22. Mohammadi, A., & Omid, M. (2010). Economical analysis and relation between energy inputs and yield of greenhouse cucumber production in Iran. *Applied Energy*, 87(1), 191–196. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.07.021>
23. Mohammadi, A., Tabatabaeefar, A., Shahin, S., Rafiee, S., & Keyhani, A. (2008). Energy use and economical analysis of potato production in Iran a case study: Ardabil province. *Energy Conversion and Management*, 49(13), 3566–3570. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2008.07.003>
24. Mohammadi, S., & Meysami, M.A. (2021). Energy consumption pattern in grain maize production in Iran. *Proceedings of National Conference on Agricultural Energy*. (In Persian with English abstract). <https://civilica.com/doc/1585606>
25. Mousavi-Avval, S.H., & Rafiee, S.H. (2023). Energy efficiency trends in Iranian agriculture: A historical analysis. *Journal of Cleaner Production*, 382, 135234. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135234>
26. Nabavi-Pelesaraei, A., Abdi, R., & Rafiee, S. (2023). Climate change and energy use in agriculture: An integrated analysis. *Science of The Total Environment*, 859, 160252. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160252>
27. Ozkan, B., Akcaoz, H., & Fert, C. (2004). Energy input–output analysis in Turkish agriculture. *Renewable Energy*, 29(1), 39–51. [https://doi.org/10.1016/s0960-1481\(03\)00135-6](https://doi.org/10.1016/s0960-1481(03)00135-6)
28. Pimentel, D., Berger, B., Filiberto, D., Newton, M., Wolfe, B., Karabinakis, E., ... & Nandagopal, S. (2004). Water resources: agricultural and environmental issues. *BioScience*, 54(10), 909–918. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2004\)054\[0909:WRAAEI\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2004)054[0909:WRAAEI]2.0.CO;2)
29. Rajabi Hamedani, S., Shabani, Z., & Rafiee, S. (2011). Energy inputs and crop yield relationship in potato production in Hamadan province of Iran. *Energy*, 36(11), 2367–2371. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.01.013>
30. Roy, R.N., Finck, A., Blair, G.J., & Tandon, H.L.S. (2006). *Plant nutrition for food security: A guide for integrated nutrient management*. FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin, 16. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy. <https://doi.org/10.1017/s0014479706394537>
31. Shahbazi, N., Majnoon Hosseini, N., Jahansuz, M.R., & Jalilian, A. (2025). Estimating effective inputs on energy and environmental indicators of grain corn and sweet corn production. *Iranian Journal of Crop Sciences*, 35(1), 356. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059.ijfcs.2025.389066.655124>
32. Sheikhzindin, A., & Ghyasi, H. (2022). Assessment of water footprint and water use efficiency in rice production for sustainability. *Journal of Agricultural Knowledge and Sustainable Production*, 33(2), 207–225. (In Persian with English abstract)
33. Singh, G., Singh, S., & Singh, J. (2004). Optimization of energy inputs for wheat crop in Punjab. *Energy Conversion and Management*, 45(3), 453–465. [https://doi.org/10.1016/s0196-8904\(03\)00155-9](https://doi.org/10.1016/s0196-8904(03)00155-9)
34. Statistical Center of Iran. (2021). *Statistical Yearbook of Lorestan Province*. (In Persian). Available at: <https://amar.org.ir>
35. Taghinazhad, J., Vahedi, A., & Ranjbar, F. (2019). Economic assessment of energy consumption and greenhouse gas emissions from wheat production in Ardabil province. *Environmental Sciences*, 17(3), 137–150. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.29252/envs.17.3.137>
36. Taxidis, E., Menexes, G., Mamolos, A., Tsatsarelis, C., Anagnostopoulos, C., & Kalburtji, K. (2015). Comparing organic and conventional olive groves relative to energy use and greenhouse gas emissions associated with the cultivation of two varieties. *Applied Energy*, 149, 117–124. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.03.128>
37. Yousefi, Z., Vahedi, A., & Askari Bezaye, F. (2021). Energy consumption analysis and environmental impacts of rice production in Guilan province using life cycle assessment. *Agricultural Systems and Mechanization Research*, 22(78), 55–72. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22092/erams.2020.343427.1359>
38. Zahedi, M., Eshghizadeh, H., & Mondani, F. (2015). Energy efficiency and productivity in potato and sugar beet production systems in Isfahan province. *Journal of Crop Production and Processing*, 5(17), 181–191. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.18869/acadpub.jcpp.5.17.181>