

Research Paper

Evaluation of energy flow and greenhouse gas emissions in forage crop production in rainfed conditions of Rasht

Mohammad Rabiee^{1*}, Sajjad Shaker Kouhi¹

¹. Department of Seed Improvement, Rice Research Institute of Iran, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Rasht, Iran.

Article History	Abstract
Submitted: 2026/05/20	Efficient energy use is one of the key components of sustainable agriculture. To investigate the energy flow and greenhouse gas (GHG) emissions of forage crop production in rainfed conditions in Rasht, an experiment was conducted using a randomized complete block design with three replications at the research fields of the Rice Research Institute of Iran in Rasht during the 2023-2025 cropping seasons. The experimental treatments included eight forage plants (berseem clover, forage mustard, barley, triticale, forage safflower, vetch, forage pea, and faba bean) and intercropping of triticale + vetch (50% triticale and 50% vetch). The results showed that fuel and nitrogen (N) fertilizer accounted for a higher share of forage crop production than the other energy inputs. Among the forage plants, triticale had an average of 24997 MJ ha ⁻¹ and 765 kg CO ₂ eq. ha ⁻¹ , and forage mustard with the averages of 22572 MJ ha ⁻¹ and 720 kg CO ₂ eq. ha ⁻¹ had the highest energy input and GHG emissions, respectively. Based on the results, intercropping of triticale + vetch had the maximum energy use efficiency (7.64), energy productivity (0.65 kg MJ ⁻¹), and net energy (131719 MJ ha ⁻¹). Among the various energy inputs contributing to total GHG emissions from forage crop production, fuel and N fertilizer are the largest contributors. Therefore, decreasing fuel consumption, optimizing N fertilizer management, and cultivating forage legumes (because of their ability to fix N) can help increase energy efficiency and reduce greenhouse gas emissions from fodder production in paddy fields.
Revised: 2026/08/11	
Accepted: 2026/08/19	
Published online: 2026/09/23	
Keywords: Input energy Net energy Energy productivity Energy use efficiency Global warming	
*Corresponding author email: m.rabiee@areeo.ac.ir	
ORCID:  0000-0003-1344-7779	
	

How to cite this paper:

Rabiee, M. and Shaker Kouhi, S. (2026). Evaluation of Energy Flow and Greenhouse Gas Emissions in Forage Crop Production in Rainfed Conditions of Rasht. *Journal of Research in Mechanics of Agricultural Machinery*. 40: 65-80. <https://dx.doi.org/10.22034/jrmam.2026.15055.774> (In Persian)



Authors retain the copyright and full publishing rights. Published by [Shahrekord University](https://www.shahrekord.ac.ir). This article is an open access article licensed under the [Creative Commons Attribution 4.0 International \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

<https://dx.doi.org/10.22034/jrmam.2026.15055.774>

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

The presence of fertile soils, a long growing season, and favorable environmental conditions from the rice harvest until planting the next year are significant advantages, making these paddy fields a good candidate for a second crop. The rice–forage crops system, in which rice is planted as a summer crop and forage crops as a winter crop, is considered a sustainable system with various advantages. The development of forage crops as a second crop after rice harvest in paddy fields can be an effective strategy to provide fodder for livestock, increase land productivity and the sustainability of rice production, increase paddy farmers' income, and thus prevent migration of villagers. Efficient energy use is one of the principal requirements of sustainable agriculture. Continuous demand for increased food production led to the intensive use of chemical fertilizers, pesticides, agricultural machinery, and other natural resources. However, intensive energy use causes significant greenhouse gas (GHG) emissions and major environmental problems due to global warming.

Therefore, it is of great importance to identify production methods that increase energy use efficiency. Achieving the sustainable production of forage crops requires analysing different energy indices and GHG emissions. Therefore, this study aimed to investigate the energy flow and GHG emissions in forage crop production as a second crop after rice harvesting in paddy fields of Guilan province.

Material and Methods

This study was conducted using a randomized complete block design with three replications at the Rice Research Institute of Iran in Rasht during the 2023-2025 cropping seasons. The experimental treatments included eight forage plants (berseem clover, forage mustard, barley, triticale, forage safflower, vetch, forage pea and faba bean) and intercropping of triticale + vetch (50% triticale and 50% vetch). In the present research, input energy,

different forms of energy, output energy, net energy, specific energy, energy productivity, energy use efficiency and greenhouse gas emission were calculated and evaluated. The greenhouse gas emissions for each treatment were expressed in terms of kilograms CO₂ equivalent per hectare (kg CO₂ eq. ha⁻¹). The analysis of variance was done by SAS software and the LSD test was used for mean comparison.

Results and Discussion

The results showed that the highest energy input for forage crop production was for triticale, forage mustard, and barley, with averages of 24997, 22572, and 22020 MJ ha⁻¹, respectively. The fuel and nitrogen (N) fertilizer accounted for a higher share of forage crop production than the other energy inputs. The share values of direct energy vary from 42.9% for triticale and forage mustard to 59.9 for berseem clover. Among the indirect energy sources, N fertilizer had the highest energy consumption across all forage crops. The highest share percentage of indirect energy was observed for triticale and forage mustard (57.1%), followed by forage safflower (46.7%) and faba bean (46.3%). Non-renewable energy showed a much higher share than renewable energy. The highest share of renewable energy was forage pea, with an average of 14.3%, followed by vetch (11.4%) and faba bean (10.7%).

The crops of mustard, berseem clover, and forage safflower had the highest shares of non-renewable energy, with averages of 98.3%, 96.4%, and 95.7%, respectively. Fuel and N fertilizer played the most important role in increasing the share of non-renewable energy in the experiment. The energy output ranged from 15151 MJ ha⁻¹ for intercropping of triticale + vetch to 72450 MJ ha⁻¹ for forage safflower. Based on the results, intercropping of triticale + vetch had the highest energy use efficiency (7.64). The vetch, with an average of 7.57, was also ranked next. The lowest energy use efficiency (3.21) was related to forage mustard. The intercropping of triticale + vetch, berseem clover, and barley with energy productivity (0.65 kg MJ⁻¹), (0.49 kg

MJ⁻¹), and (0.45 kg MJ⁻¹) were ranked first to third, respectively. Forage mustard with an average of 0.26 kg MJ⁻¹ had the lowest energy productivity. The results of the mean comparison showed that the highest specific energy was allocated to forage mustard, with an average of 3.81 MJ kg⁻¹, which was classified separately in group A. Intercropping of triticale + vetch, with an average of 1.54 MJ kg⁻¹, also had the lowest specific energy. Based on the results, intercropping of triticale + vetch had the maximum net energy (131719 MJ ha⁻¹). The vetch, with an average of 118866 MJ ha⁻¹ was ranked next. Among the various energy inputs, fuel and N fertilizer account for the greatest share of total GHG emissions across all forage crops.

Conclusions

The results indicated that triticale and forage mustard had the highest energy input and GHG emissions. The lowest GHG emissions were associated with forage pea and vetch, respectively. The intercropping of triticale + vetch had the highest energy use efficiency, energy productivity, and net energy. Based on the results of this study, the fuel and N fertilizer accounted for higher shares of energy inputs and GHG emissions. Therefore, reducing fuel consumption, optimizing N fertilizer management, and cultivating forage legumes can increase energy efficiency and reduce GHG emissions from fodder production in paddy fields of Guilan Province.

Acknowledgements

We would like to thank the Agricultural Research, Education and Extension Organization and Rice Research Institute of Iran for its support in conducting this research.

Author Contributions

First Author: Determining the research implementation method, writing, reviewing, and editing the article.

Second Author: Collecting and analyzing data, writing.

Data Availability Statement

Information and results are presented in the text of the article.

Ethical Considerations

The authors have adhered to ethical principles in conducting and publishing this scientific work, as confirmed by all of them. Also, in this study, artificial intelligence was not used in any of the research and writing of the article.

Conflict of Interest

The authors declare that there are no known competing financial interests or personal relationships that may have influenced the work reported in this article.

Funding Statement

This work was supported by the Agricultural Research, Education and Extension Organization and Rice Research Institute of Iran under project number 13-04-0457-044-021039.



ارزیابی جریان انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای در تولید گیاهان علوفه‌ای در شرایط دیم شهرستان رشت

محمد ربیعی^{۱*} و سجاد شاکر کوهی^۱

۱. بخش تحقیقات اصلاح و تهیه بذر، مؤسسه تحقیقات برنج کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، رشت، ایران.

تاریخچه مقاله	چکیده
دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۳۰ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۵/۲۰ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۲۸ انتشار: ۱۴۰۵/۰۷/۰۱	استفاده بهینه از انرژی یکی از مؤلفه‌های اصلی کشاورزی پایدار است. به منظور بررسی جریان انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای در تولید گیاهان علوفه‌ای در شرایط دیم شهرستان رشت، آزمایشی در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار طی دو سال زراعی ۱۴۰۲-۱۴۰۴ در مزرعه پژوهشی مؤسسه تحقیقات برنج کشور در شهرستان رشت به اجرا درآمد. تیمارهای آزمایشی شامل هشت گیاه علوفه‌ای (شبدر برسیم، خردل علوفه‌ای، جو، تریتیکاله، گلرنگ علوفه‌ای، ماشک، نخود علوفه‌ای و باقلا) و کشت مخلوط تریتیکاله + ماشک (۵۰ درصد تریتیکاله و ۵۰ درصد ماشک) بودند. نتایج نشان داد که سوخت و کود نیتروژن نسبت به سایر نهاده‌های انرژی، سهم بیشتری در تولید محصولات علوفه‌ای داشتند. در بین گیاهان علوفه‌ای، تریتیکاله با میانگین‌های ۲۴۹۹۷ مگاژول در هکتار و ۷۶۵ کیلوگرم معادل CO ₂ در هکتار و خردل علوفه‌ای با میانگین‌های ۲۲۵۷۲ مگاژول در هکتار و ۷۲۰ کیلوگرم معادل CO ₂ در هکتار به ترتیب بیشترین انرژی ورودی و انتشار گازهای گلخانه‌ای را دارا بودند. بر اساس نتایج، کشت مخلوط تریتیکاله + ماشک بالاترین نسبت انرژی (۷/۶۴)، بهره‌وری انرژی (۰/۶۵ کیلوگرم بر مگاژول) و انرژی خالص (۱۳۱۷۱۹ مگاژول در هکتار) را به خود اختصاص داد. در بین نهاده‌های مختلف انرژی دخیل در کل انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از تولید محصولات علوفه‌ای، سوخت و کود نیتروژن بیشترین نقش را داشتند. بنابراین، کاهش مصرف سوخت، مدیریت بهینه کود نیتروژن و کشت لگوم‌های علوفه‌ای (به دلیل توانایی آن‌ها در تثبیت نیتروژن) می‌توانند به افزایش بهره‌وری انرژی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از تولید علوفه در شالیزار کمک نمایند.

واژه‌های کلیدی:

انرژی ورودی
انرژی خالص
بهره‌وری انرژی
گرمایش جهانی
نسبت انرژی

*پست الکترونیکی نویسنده
مسئول:
m.rabiee@areeo.ac.ir

O

RCID: 

۰۰۰۰-۰۰۰۳-۱۳۴۴-۷۷۷۹



نحوه استناد به این مقاله:

ربیعی، م. و شاکر کوهی، س. (۱۴۰۵). ارزیابی جریان انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای در تولید گیاهان علوفه‌ای در شرایط دیم شهرستان رشت. نشریه پژوهش‌های مکانیک ماشین‌های کشاورزی، ۴۰: ۶۴-۸۰. <https://dx.doi.org/10.22034/jrmam.2026.15055.774>

مقدمه

افزایش تقاضا برای غذا با رشد جمعیت جهان، رخدادی طبیعی است. تولید بیشتر محصولات کشاورزی برای تأمین امنیت غذایی جمعیت در حال رشد مستلزم مصرف بیشتر انرژی است، که در نتیجه، افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای و گرمایش جهانی را در پی دارد. از طرف دیگر، عمده تولیدات کشاورزی بر پایه استفاده از منابع محدودی مثل سوخت‌های فسیلی، منابع آبی و دیگر نهاده‌های تجدیدنپذیر است (Taleghani *et al.*, 2020). نیاز به افزایش مصرف انرژی، آلودگی‌های زیست‌محیطی و محدودیت منابع انرژی از جمله عواملی هستند که اهمیت مدیریت مصرف انرژی به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه را برجسته می‌کند. در توسعه پایدار، از منابع انرژی باید به‌گونه‌ای استفاده کرد که نه تنها نیاز نسل فعلی را برآورده سازد، بلکه امکان تأمین نیازهای نسل آینده را نیز فراهم آورد (Khodaei Joghani *et al.*, 2022).

در مقیاس جهانی، حدود پنج درصد از کل انرژی در بخش کشاورزی مورد استفاده قرار می‌گیرد و حدود ۱۰ تا ۱۵ درصد از انتشار گازهای گلخانه‌ای نیز مربوط به این بخش است (Springmann & Freund, 2022). الگوی مصرف انرژی و میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای در بوم نظام‌های کشاورزی می‌تواند تحت تأثیر عواملی مانند نوع نظام زراعی، الگوی کشت، فناوری، جمعیت شاغل در بخش کشاورزی، دانش کشاورزان، مصرف کودهای شیمیایی و عملکرد محصول قرار گیرد (Vafabakhsh & Mohammadzadeh, 2019). تجزیه و تحلیل جریان انرژی در سامانه‌های کشاورزی نه تنها می‌تواند در ارزیابی نقش فعالیت‌های اقتصادی بر تعادل و ثبات محیطی مفید باشد، بلکه شناخت ایجاد شده و چگونگی استفاده مؤثر از انرژی در این سامانه‌ها می‌تواند ضمن بهبود کارایی مصرف انرژی و نیز کاهش مخاطرات زیست‌محیطی، دستیابی به تولید پایدار را نیز فراهم نماید (Tavakoli Kakhki & Ghodsi, 2020).

برای اتخاذ سیاست‌های مناسب در جهت افزایش بازدهی نظام‌های تولید، آگاهی از منابع انرژی و شناسایی روش‌هایی که باعث افزایش کارایی مصرف انرژی می‌شود، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. نتایج مطالعات نشان می‌دهد که شاخص‌های انرژی و میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای در فرایند تولید محصولات زراعی در مناطق مختلف متفاوت است. محققان در بررسی جریان انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای در نظام‌های تولید محصولات زراعی و باغی دشت شریف‌آباد

استان قم گزارش کردند که بیشترین کارایی مصرف انرژی به محصولات جو، ذرت علوفه‌ای و گندم اختصاص داشت. همچنین، بیشترین میزان پتانسیل گرمایش جهانی از کشت یونجه و کمترین میزان آن از محصولات جو، کلزا و گندم حاصل شد (Vafabakhsh & Mohammadzadeh, 2019). نتایج بررسی جریان انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای در نظام‌های تولید برخی از محصولات زراعی استان خراسان رضوی نشان داد که در بین محصولات زراعی، بیشترین مقدار انرژی در فرایند تولید یونجه (۲۱۳۱۰۱ مگاژول در هکتار) استفاده شد. چغندر قند (۳/۷۷) و سورگوم علوفه‌ای (۲/۷۲) به ترتیب بیشترین کارایی مصرف انرژی را به خود اختصاص دادند. همچنین، بالاترین میزان پتانسیل گرمایش جهانی به بوم نظام‌های یونجه (۴۱۵۶۶ کیلوگرم معادل CO₂ در هکتار) و چغندر قند (۲۹۱۷۹ کیلوگرم معادل CO₂ در هکتار) اختصاص داشت. مقایسه سهم ورودی‌های مختلف از کل پتانسیل گرمایش جهانی نیز نشان داد که در تمام محصولات مورد مطالعه، الکتریسیته، کود نیتروژن و سوخت دیزل به ترتیب بیشترین نقش را ایفا کردند (Javadi & Esfahani, 2023).

در آزمایشی کارایی مصرف انرژی و میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای در تولید کلزا به‌عنوان کشت دوم پس از برداشت برنج در گیلان مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که در بین نهاده‌های مصرفی، بیشترین میزان مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای به ترتیب به کود نیتروژن و سوخت اختصاص داشت (Rabiee *et al.*, 2021). نتایج بررسی شاخص‌های انرژی، اقتصادی و زیست‌محیطی در دو روش تولید علوفه دیم در شهرستان خرم‌آباد نشان داد که کشت مخلوط جو و ماشک از شاخص نسبت انرژی (۱۱/۱۲ کیلوگرم بر مگاژول) و بهره‌وری انرژی (۰/۶۸ کیلوگرم بر مگاژول) بیشتری نسبت به کشت خالص ماشک برخوردار بود. بر اساس نتایج، پتانسیل گرمایش جهانی در کشت خالص ماشک و کشت مخلوط جو و ماشک به ترتیب ۵۶۶ و ۵۷۸ کیلوگرم معادل CO₂ برآورد شد و در بین نهاده‌های مصرفی، سوخت بیشترین سهم از پتانسیل گرمایش جهانی را به خود اختصاص داد (Rahmati *et al.*, 2024). در تحقیقی دیگر، کارایی مصرف انرژی برای تولید گندم، برنج و جو در استرالیا مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که کودهای شیمیایی به ترتیب ۴۳، ۴۷ و ۲۹ درصد از کل انرژی ورودی در تولید گندم، برنج

بود. فواصل خطوط کشت برای باقلا ۴۰ سانتی‌متر و برای بقیه محصولات ۲۵ سانتی‌متر بود. تعداد خطوط برای کشت باقلا پنج خط و برای سایر محصولات هشت خط در نظر گرفته شد. فواصل بین کرت‌ها دو متر و بین تکرارها نیز سه متر بود. میزان بذر مصرفی در خردل علوفه‌ای پنج کیلوگرم در هکتار، جو، تریتیکاله و نخود علوفه‌ای ۱۴۰ کیلوگرم در هکتار، شبدر ۲۵ کیلوگرم در هکتار، گلرنگ علوفه‌ای ۲۰ کیلوگرم در هکتار، ماشک ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار و باقلا ۸۰ کیلوگرم در هکتار بود (Rabiee *et al.*, 2026). مبارزه با آفت حزون در ابتدای سبز شدن گیاهان علوفه‌ای و در مرحله سه تا چهاربرگی با استفاده از سم متالدهاید (Metaldehyde) انجام شد.

معادل‌های انرژی برای ورودی‌ها و خروجی‌های مورد استفاده در جدول ۱ نشان داده شده است. انرژی ورودی شامل نیروی انسانی، ماشین‌آلات، سوخت، سموم شیمیایی، کودهای شیمیایی و بذر و انرژی خروجی شامل عملکرد علوفه خشک گونه‌های علوفه‌ای بود. برای تجزیه و تحلیل دقیق‌تر انرژی‌های مصرفی به کار رفته و تعیین سهم هر کدام از انرژی‌های فوق در کل انرژی مصرفی، انرژی ورودی به انرژی مستقیم، غیرمستقیم، تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر تقسیم شد. انرژی مستقیم شامل نیروی انسانی و سوخت و انرژی غیرمستقیم شامل بذر، سموم شیمیایی، کودهای شیمیایی و ماشین‌آلات بود. همچنین، انرژی تجدیدپذیر شامل نیروی انسانی و بذر و انرژی تجدیدناپذیر شامل سموم شیمیایی، کودهای شیمیایی، سوخت و ماشین‌آلات بود (Qasemi-Kordkheili *et al.*, 2013).

محاسبه مقدار مصرف سوخت برای تولید هر یک از گیاهان علوفه‌ای بر اساس میزان کار ادوات و ماشین‌آلات کشاورزی (بر حسب ساعت در هکتار) طی عملیات خاک‌ورزی، سم‌پاشی و برداشت محصول و باتوجه به مقدار مصرف سوخت در هر ساعت کار این ادوات و ماشین‌آلات صورت گرفت. از آنجایی که کشت محصولات دوم پس از برداشت برنج بدون مصرف آب و به صورت دیم صورت گرفت، بنابراین انرژی آب آبیاری و مصرف الکتریسیته ناشی از آن به عنوان انرژی ورودی در نظر گرفته نشد. برای تحلیل جریان انرژی، شاخص‌های انرژی شامل نسبت انرژی، بهره‌وری انرژی، انرژی ویژه و انرژی خالص از طریق روابط (۱) تا (۴) محاسبه گردید (Soltani *et al.*, 2013).

$$ER = \frac{EO}{EI} \quad (1)$$

و جو را به خود اختصاص دادند. بیشترین میزان بهره‌وری انرژی برای گندم به دست آمد (Khan *et al.*, 2010).

اجرای تناوب مناسب برای بهره‌برداری بهینه از اراضی شالیزاری یکی از مهم‌ترین اولویت‌ها در بخش کشاورزی استان‌های شمالی کشور است. این ضرورت باتوجه به تناوب مناسب برنج با گیاهان علوفه‌ای می‌تواند راهگشا باشد. باتوجه به نیاز کشور به تأمین غذا و تولید فراورده‌های دامی، استفاده از گیاهان علوفه‌ای پاییزه با قابلیت کشت در اراضی شالیزاری که عملکرد بالا و کیفیت مطلوبی دارند، علاوه بر تأمین علوفه مورد نیاز دام‌ها، می‌تواند نقش مهمی در کشاورزی پایدار و برقراری نظام دارای چند کشت ایفا نماید (Rabiee & Shaker, 2025). دستیابی به تولید پایدار و توسعه کشت دوم در شالیزار مستلزم تجزیه و تحلیل شاخص‌های مختلف انرژی است. باتوجه به خلأ تحقیقاتی در خصوص سیر انرژی و میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از کشت محصولات دوم در شالیزار، این تحقیق باهدف بررسی کارایی مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای در تولید گیاهان علوفه‌ای در شرایط دیم شهرستان رشت انجام شد.

مواد و روش‌ها

این آزمایش در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار طی دو سال زراعی ۱۴۰۲-۱۴۰۳ و ۱۴۰۳-۱۴۰۴ در مزرعه پژوهشی مؤسسه تحقیقات برنج کشور در رشت اجرا شد. تیمارهای آزمایشی شامل هشت گیاه علوفه‌ای (شبدر برسيم رقم تولیدی کرج، خردل علوفه‌ای رقم گرگان، جو رقم گلچین، تریتیکاله رقم هاشمی، گلرنگ علوفه‌ای رقم گلدشت، ماشک رقم لامعی، نخود علوفه‌ای رقم پایونیر و باقلا رقم مهتا) و کشت مخلوط ردیفی تریتیکاله + ماشک با نسبت جایگزینی ۵۰ درصد تریتیکاله و ۵۰ درصد ماشک بودند. بذور گونه‌های علوفه‌ای از مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان گلستان تهیه شدند. پس از برداشت برنج، عملیات شخم با استفاده از روتواتور طی دو مرحله در عمق ۱۵-۱۰ سانتی‌متر انجام گرفت و جهت مبارزه با علف‌های هرز از تری‌فلورالین (ترفلان) پنج روز پیش از کاشت استفاده شد.

به منظور خروج آب اضافی در اثر بارندگی‌های سنگین احتمالی و ایجاد شرایط مناسب برای کشت، زهکش‌هایی به عمق ۳۰-۲۰ سانتی‌متر و به عرض ۳۰-۲۵ سانتی‌متر دور تادور زمین و همچنین، مابین تکرارها احداث گردید. تاریخ کاشت گیاهان علوفه‌ای در هر دو سال آزمایش دهم آبان‌ماه

میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای در تولید گیاهان علوفه‌ای در هر هکتار با استفاده از ضرایب انتشار معادل CO₂ برای نهاده‌های مختلف محاسبه گردید. ضرایب انتشار گازهای گلخانه‌ای به‌ازای هر نهاده مصرفی در جدول ۲ ارائه شده است. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل اجرای آزمایش قبل از کاشت گیاهان علوفه‌ای و پس از برداشت آن‌ها، در جدول ۳ نشان داده شده است.

محاسبات آماری با استفاده از نرم‌افزار SAS انجام شد. مقایسه میانگین نیز با استفاده از آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد صورت گرفت. همچنین برای محاسبه شاخص‌های انرژی و رسم نمودارها از نرم‌افزار Excel استفاده گردید.

$$EP = \frac{Y}{EI} \quad (2)$$

$$SE = \frac{EI}{Y} \quad (3)$$

$$NEG = EO - EI \quad (4)$$

که در آن: ER : نسبت انرژی، EO : انرژی خروجی (مگاژول در هکتار)، EI : انرژی ورودی (مگاژول در هکتار)، EP : بهره‌وری انرژی (کیلوگرم بر مگاژول)، Y : عملکرد علوفه خشک (کیلوگرم در هکتار)، SE : انرژی ویژه (مگاژول بر کیلوگرم) و NEG : انرژی خالص (مگاژول در هکتار) است.

جدول ۱- معادل‌های انرژی برای ورودی‌ها و خروجی مورد استفاده در تولید گیاهان علوفه‌ای

عامل	واحد	انرژی معادل (MJ/unit ⁻¹)	منبع
ورودی‌ها			
بذر جو	kg	۱۴/۷	(Vafabakhsh & Mohammadzadeh, 2019)
بذر تریتیکاله	kg	۹	(Szemplinski <i>et al.</i> , 2021)
بذر ماشک	kg	۱۷/۶۴	(Kokten <i>et al.</i> , 2017)
بذر نخود علوفه‌ای	kg	۱۴/۷	(Kitani, 1999)
بذر شبدر	kg	۱۳/۵۰	(Kitani, 1999)
بذر گلرنگ	kg	۲۵	(Zahedi <i>et al.</i> , 2014)
بذر خردل	kg	۲۰/۴۰	(Meena <i>et al.</i> , 2025)
بذر باقلا	kg	۲۱	(Kitani, 1999)
نیروی انسانی	h	۱/۹۶	(Zangeneh <i>et al.</i> , 2010)
ماشین‌آلات	h ha ⁻¹	۶۲/۷	(Zangeneh <i>et al.</i> , 2010)
نیتروزن	kg	۶۶/۱۴	(Nabavi Pelesaraei <i>et al.</i> , 2013)
فسفر	kg	۱۲/۴۴	(Nabavi Pelesaraei <i>et al.</i> , 2013)
پتاسیم	kg	۱۱/۵۵	(Nabavi Pelesaraei <i>et al.</i> , 2013)
سوخت دیزل	L	۵۶/۳۱	(Nabavi Pelesaraei <i>et al.</i> , 2013)
علف‌کش	kg	۲۳۸	(Zangeneh <i>et al.</i> , 2010)
حشره‌کش	kg	۱۰۱/۲	(Zangeneh <i>et al.</i> , 2010)
خروجی (علوفه خشک)			
جو	kg	۱۱/۶	(Kitani, 1999)
تریتیکاله	kg	۸/۲۵	(Bielski <i>et al.</i> , 2015)
ماشک	kg	۱۷/۲۳	(Seydosoglu <i>et al.</i> , 2023)
نخود علوفه‌ای	kg	۱۲/۵	(Raja <i>et al.</i> , 2022)
شبدر	kg	۱۰/۰۷	(Kitani, 1999)
گلرنگ	kg	۱۲/۵	(Bahrami <i>et al.</i> , 2011)
خردل	kg	۱۲/۵	(Yadav <i>et al.</i> , 2018)
باقلا	kg	۱۲/۵	(Kitani, 1999)

جدول ۲- ضرایب انتشار گازهای گلخانه‌ای نهاده‌های ورودی مورد استفاده در تولید گیاهان علوفه‌ای

منبع	ضرایب انتشار گازهای گلخانه‌ای (kg CO ₂ eq.ha ⁻¹)	واحد	نهاده‌ها
(Lal, 2004)	۲/۷۶	L	سوخت دیزل
(Liu <i>et al.</i> , 2010)	۰/۰۷۱	MJ	ماشین‌آلات
(Lal, 2004)	۱/۳	kg	نیتروژن
(Lal, 2004)	۰/۲	kg	فسفر
(Lal, 2004)	۰/۲	kg	پتاسیم
(Lal, 2004)	۶/۳	kg	علف‌کش
(Lal, 2004)	۵/۱	kg	حشره‌کش

جدول ۳- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل اجرای آزمایش قبل از کاشت گیاهان علوفه‌ای و پس از برداشت آن‌ها

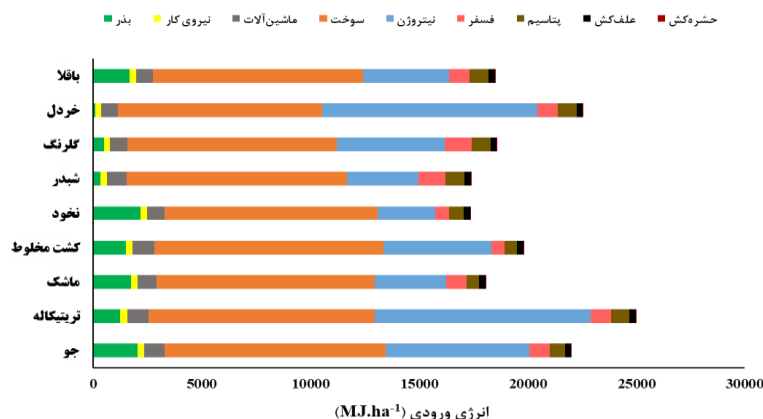
عامل	اسیدیته	کربن آلی (%)	نیتروژن کل (%)	فسفر (mg kg ⁻¹)	پتاسیم (mg kg ⁻¹)	هدایت الکتریکی (dS m ⁻¹)
قبل از کاشت گیاهان علوفه‌ای	۷/۱	۱/۲۴	۰/۱۲۸	۱۹/۱	۱۷۵	۰/۷۶
پس از برداشت گیاهان علوفه‌ای						
جو	۷/۴	۱/۲۲	۰/۱۲۳	۱۸/۷	۱۷۳	۰/۷۸
تریتیکاله	۷/۱	۱/۲۴	۰/۱۲۵	۱۸/۹	۱۷۷	۰/۷۸
ماشک	۶/۶	۱/۲۷	۰/۱۳۲	۱۹/۵	۲۱۰	۱/۱۵
نخود علوفه‌ای	۶/۷	۱/۲۸	۰/۱۳۶	۱۹/۲	۲۱۸	۱/۰۹
شبدر	۶/۶	۱/۲۷	۰/۱۳۴	۱۹/۶	۲۲۱	۱/۰۹
گلرنگ	۶/۹	۱/۲۵	۰/۱۳۰	۱۹/۵	۲۱۳	۰/۹۹
خردل	۷/۲	۱/۲۴	۰/۱۲۷	۱۸/۹	۱۹۴	۰/۷۶
باقلا	۶/۷	۱/۲۷	۰/۱۳۶	۱۹/۶	۲۲۰	۱/۱۲
کشت مخلوط	۶/۹	۱/۲۵	۰/۱۲۹	۱۹/۳	۲۰۵	۰/۸۸

نتایج و بحث

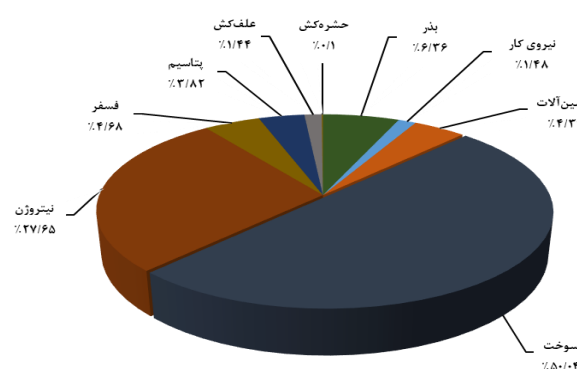
شاخص‌های انرژی

خالص تریپتیکاله و کشت خالص جو اختصاص داشت. در بین کودهای شیمیایی مورد استفاده، سهم کود نیتروژن بیشتر از کودهای فسفر و پتاسیم بود (شکل ۱). همسو با این نتایج، محققان دیگر نیز گزارش کردند که سهم کود نیتروژن از انرژی ورودی، بیشتر از سایر کودها است (Vafabakhsh & Mohammadzadeh, 2019; Javadi & Esfahani, 2023). بیشترین سهم ورودی‌های مختلف انرژی از کل انرژی ورودی در تولید محصولات علوفه‌ای به مصرف سوخت (۵۰/۰۴ درصد) اختصاص داشت و پس از آن، کود نیتروژن (۲۷/۶۵ درصد) و بذر (۶/۳۶ درصد) قرار داشتند. در مقابل، سهم حشره‌کش، علف‌کش و نیروی کار نسبت به سایر ورودی‌های انرژی کمتر بود (شکل ۲). بالابودن مصرف سوخت در تولید محصولات مورد مطالعه را می‌توان به عدم مدیریت بهینه در استفاده و سرویس‌دهی ماشین‌آلات کشاورزی نسبت داد.

سهم ورودی‌های مختلف انرژی در تولید گیاهان علوفه‌ای به‌عنوان کشت دوم پس از برداشت برنج در شالیزار در شکل ۱ نشان داده شده است. مقایسه بین محصولات علوفه‌ای نشان داد که نخود علوفه‌ای (۲۱۹۸ مگاژول در هکتار) و جو (۲۰۵۸ مگاژول در هکتار) بیشترین انرژی مصرفی بذر را دارا بودند که دلیل آن را می‌توان به مصرف بیشتر بذر (۱۴۰ کیلوگرم در هکتار) در این گیاهان نسبت داد. تریپتیکاله (۳۰۹/۶ مگاژول در هکتار)، جو (۳۰۱/۸ مگاژول در هکتار) و کشت مخلوط تریپتیکاله-ماشک (۲۹۷/۹ مگاژول در هکتار) از لحاظ انرژی ورودی نیروی کار در رتبه‌های اول تا سوم قرار داشتند. بیشترین انرژی ورودی ماشین‌آلات و به‌تبع آن مصرف سوخت به ترتیب به کشت مخلوط تریپتیکاله-ماشک، کشت



شکل ۱- سهم ورودی‌های مختلف انرژی در تولید محصولات علوفه‌ای



شکل ۲- سهم ورودی‌های مختلف انرژی از کل انرژی ورودی در تولید محصولات علوفه‌ای

تولید ماشک، نخود علوفه‌ای، شبدر برسیم، گلرنگ، باقلا و کشت مخلوط تربیتکاله- ماشک بیشتر از انرژی غیرمستقیم بود. بیشترین درصد سهم انرژی مستقیم به ترتیب به تولید شبدر برسیم (۵۹/۹ درصد)، نخود علوفه‌ای (۵۸ درصد) و ماشک (۵۷/۱ درصد) اختصاص داشت. سهم انرژی غیرمستقیم نیز از ۴۰/۱ درصد برای شبدر برسیم تا ۵۷/۱ درصد برای تربیتکاله و خردل متغیر بود. در بین انرژی‌های غیرمستقیم، کود نیتروژن نسبت به سایر ورودی‌ها، انرژی مصرفی بیشتری را به خود اختصاص داد. نتایج همچنین بیانگر این موضوع است که سهم انرژی‌های تجدیدناپذیر در تولید محصولات علوفه‌ای بسیار بیشتر از انرژی‌های تجدیدپذیر بود.

سهم انرژی تجدیدپذیر از ۱۴/۳ درصد برای تولید نخود علوفه‌ای تا ۱/۷ درصد برای تولید خردل متغیر بود. بیشترین و کمترین سهم انرژی تجدیدناپذیر نیز به ترتیب به خردل (۹۸/۳ درصد) و نخود علوفه‌ای (۸۵/۷ درصد) اختصاص داشت (جدول ۴).

نتایج حاصل از کل انرژی ورودی برای تولید محصولات علوفه‌ای نشان داد که تربیتکاله، خردل و جو به ترتیب با ۲۴۹۹۷، ۲۲۵۷۲ و ۲۲۰۲۰ مگاژول در هکتار در رتبه‌های اول تا سوم قرار داشتند (جدول ۴). دلیل اصلی این امر را می‌توان به مصرف بیشتر کود نیتروژن در این محصولات نسبت داد (شکل ۱). این موضوع نشان‌دهنده اهمیت به‌کارگیری کود نیتروژن در دستیابی به پتانسیل عملکرد این محصولات و در نتیجه افزایش انرژی خروجی است. کمترین انرژی ورودی نیز به شبدر برسیم (۱۷۴۰۷ مگاژول در هکتار)، نخود علوفه‌ای (۱۷۳۷۵ مگاژول در هکتار) و ماشک (۱۸۰۷۸ مگاژول در هکتار) اختصاص داشت (جدول ۴). از آنجایی که این گیاهان جزء لگوم‌های علوفه‌ای و تثبیت‌کننده نیتروژن هستند، بنابراین کاهش مصرف نیتروژن در آن‌ها، موجب کاهش انرژی ورودی شد (شکل ۱).

سهم انرژی‌های مستقیم، غیرمستقیم، تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر در تولید محصولات علوفه‌ای در جدول ۴ نشان داده شده است. بر اساس نتایج، سهم انرژی مستقیم در

جدول ۴- انرژی ورودی، انرژی خروجی و اشکال مختلف انرژی در تولید محصولات علوفه‌ای

عامل	واحد	جو	تریتیکاله	ماشک	کشت مخلوط	نخود علوفه‌ای	شیدر برسيم	گلرنگ	خردل	باقلا
انرژی ورودی	MJ.ha ⁻¹	۲۲۰۲۰	۲۴۹۹۷	۱۸۰۷۸	۱۹۸۳۲	۱۷۳۷۵	۱۷۴۰۷	۱۸۵۹۴	۲۲۵۷۲	۱۸۵۱۹
انرژی خروجی	MJ.ha ⁻¹	۱۱۴۸۷۴	۹۱۶۵۷	۱۳۶۹۴۴	۱۵۱۵۵۱	۸۸۵۶۲	۸۵۲۴۲	۷۲۴۵۰	۷۳۹۲۵	۸۳۶۱۲
اشکال انرژی										
انرژی مستقیم	MJ.ha ⁻¹	۱۰۴۹۴	۱۰۷۲۶	۱۰۳۱۳	۱۰۸۲۶	۱۰۰۸۳	۱۰۴۳۱	۹۹۲۱	۹۶۹۱	۹۹۵۱
		(۴۷/۷)	(۴۲/۹)	(۵۷/۱)	(۵۴/۶)	(۵۸)	(۵۹/۹)	(۵۳/۳)	(۴۲/۹)	(۵۳/۷)
انرژی غیرمستقیم	MJ.ha ⁻¹	۱۱۵۲۶	۱۴۲۷۱	۷۷۶۵	۹۰۰۵	۷۲۹۲	۶۹۷۶	۸۶۷۲	۱۲۸۸۰	۸۵۶۸
		(۵۲/۳)	(۵۷/۱)	(۴۲/۹)	(۴۵/۴)	(۴۲)	(۴۰/۱)	(۴۶/۷)	(۵۷/۱)	(۴۶/۳)
انرژی تجدیدپذیر	MJ.ha ⁻¹	۲۳۵۹	۱۵۶۹	۲۰۵۴	۱۸۰۹	۲۴۸۴	۶۳۳	۷۹۲	۳۹۱	۱۹۷۴
		(۱۰/۷)	(۶/۳)	(۱۱/۴)	(۹/۱)	(۱۴/۳)	(۳/۶)	(۴/۳)	(۱/۷)	(۱۰/۷)
انرژی تجدیدناپذیر	MJ.ha ⁻¹	۱۹۶۶۰	۲۳۴۲۸	۱۶۰۲۴	۱۸۰۲۲	۱۴۸۹۱	۱۶۷۷۳	۱۷۸۰۲	۲۲۱۸۱	۱۶۵۴۵
		(۸۹/۳)	(۹۳/۷)	(۸۸/۶)	(۹۰/۹)	(۸۵/۷)	(۹۶/۴)	(۹۵/۷)	(۹۸/۳)	(۸۹/۳)

اعداد داخل پرانتز بیانگر درصد از کل انرژی مورد نظر است.

بالاترین میزان نسبت انرژی به کشت مخلوط تریتیکاله-ماشک (۷/۶۴) اختصاص داشت، هر چند با کشت خالص ماشک (۷/۵۷) اختلاف معنی‌داری نداشت. به عبارتی دیگر، به‌ازای هر یک مگاژول انرژی ورودی در کشت مخلوط تریتیکاله-ماشک، ۷/۶۴ مگاژول انرژی تولید شده است. کمترین نسبت انرژی نیز به ترتیب در خردل (۳/۲۷) و تریتیکاله (۳/۶۶) به‌دست آمد (جدول ۵).

شاخص بهره‌وری انرژی بیانگر کیفیت فرایند تولید است. این شاخص نشان می‌دهد که در مقابل یک مگاژول انرژی مصرفی، چند کیلوگرم محصول تولید شده است. هم‌راستا با نسبت انرژی، بیشترین بهره‌وری انرژی به کشت مخلوط تریتیکاله-ماشک (۰/۶۵ کیلوگرم بر مگاژول) تعلق داشت که بیانگر این موضوع است که به‌ازای هر یک مگاژول انرژی ورودی، ۰/۶۵ کیلوگرم علوفه خشک تولید شده است. شیدر برسیم نیز با میانگین ۰/۴۹ کیلوگرم بر مگاژول در رتبه بعدی قرار داشت. همچنین، خردل (۰/۲۶ کیلوگرم بر مگاژول) و گلرنگ علوفه‌ای (۰/۳۱ کیلوگرم بر مگاژول) از کمترین میزان بهره‌وری انرژی برخوردار بودند و به‌طور مشترک در یک گروه آماری قرار داشتند (جدول ۵).

شاخص انرژی ویژه نشان می‌دهد که برای تولید یک کیلوگرم محصول، چه مقدار انرژی مصرف شده است. بنابراین هرچه قدر این شاخص کوچکتر باشد، کارایی سامانه تولید بالاتر است (Imanmehr, 2019). مقایسه محصولات علوفه‌ای از نظر شاخص انرژی ویژه نشان داد که کمترین مقدار این شاخص به ترتیب در کشت مخلوط تریتیکاله-ماشک (۱/۵۴) مگاژول بر کیلوگرم و شیدر برسیم (۲/۰۵) مگاژول بر

محدود بودن انرژی‌های تجدیدناپذیر از یک‌سو و مشکلات زیست‌محیطی ناشی از مصرف این شکل از انرژی، ضرورت کاهش استفاده از انرژی‌های تجدیدناپذیر و جایگزینی آن‌ها با منابع تجدیدپذیر را چندین برابر می‌کند. جایگزینی کودهای شیمیایی با کودهای دامی و زیستی، استفاده از سامانه خاک‌ورزی حفاظتی مانند روش بدون خاک‌ورزی و مدیریت مصرف سوخت‌های فسیلی از جمله مواردی هستند که می‌توانند در فرایند تولید محصولات زراعی به کاهش سهم انرژی‌های تجدیدناپذیر از کل انرژی ورودی کمک کنند (Khodarezaie et al., 2023).

مقایسه محصولات مورد مطالعه از نظر انرژی خروجی نشان داد که بیشترین میزان این شاخص به ترتیب به کشت مخلوط تریتیکاله-ماشک (۱۵۱۵۵۱ مگاژول در هکتار)، کشت خالص تریتیکاله (۱۳۶۹۴۴ مگاژول در هکتار) و جو (۱۱۴۸۷۴ مگاژول در هکتار) تعلق داشت (جدول ۴). باتوجه به این که کشت مخلوط تریتیکاله-ماشک، کشت خالص تریتیکاله و جو به ترتیب با میانگین‌های ۱۲۸۶۱، ۱۱۱۱۰ و ۹۹۰۳ کیلوگرم در هکتار دارای بالاترین میزان عملکرد علوفه خشک بودند، بنابراین بیشتر بودن انرژی خروجی در آن‌ها قابل انتظار بود (جدول ۴). بالابودن میزان انرژی خروجی در محصولات علوفه‌ای را می‌توان به میزان زیست‌توده تولید شده و انرژی هر واحد از زیست‌توده آن نسبت داد (Vafabakhsh & Mohammadzadeh, 2019).

نسبت انرژی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین شاخص‌های انرژی، مشخص می‌کند که به‌ازای هر یک مگاژول انرژی ورودی، چه میزان انرژی تولید شده است. نتایج نشان داد که

با ۵۱۳۵۳ و ۵۳۸۵۶ مگاژول در هکتار از کمترین میزان انرژی خالص برخوردار بودند و به‌طور مشترک در یک گروه آماری قرار گرفتند (جدول ۵).

کیلوگرم) حاصل شد (جدول ۵). نتایج انرژی خالص نشان داد که کشت مخلوط تریپیکاله- ماشک و کشت خالص ماشک به ترتیب با ۱۳۱۷۱۹ و ۱۱۸۸۶۶ مگاژول در هکتار در رتبه‌های اول و دوم قرار داشتند. خردل و گلرنگ علوفه‌ای نیز به ترتیب

جدول ۵- مقایسه میانگین عملکرد علوفه خشک و شاخص‌های انرژی در تولید محصولات علوفه‌ای طی سال‌های زراعی ۱۴۰۲-۱۴۰۴.

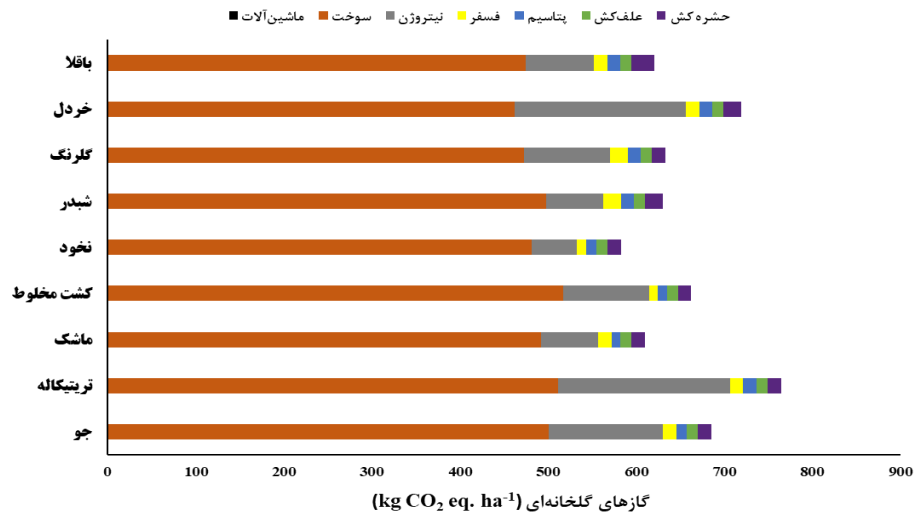
محصولات علوفه‌ای	عملکرد علوفه خشک (kg.ha ⁻¹)	نسبت انرژی	بهره‌وری انرژی (kg.MJ ⁻¹)	انرژی ویژه (MJ.kg ⁻¹)	انرژی خالص (MJ.ha ⁻¹)
جو	۹۹۰۲bc	۵/۲۱b	۰/۴۵bc	۲/۲۲fg	۹۲۸۵۴c
تریپیکاله	۱۱۱۱۰ab	۳/۶۶d	۰/۴۴bc	۲/۲۴fg	۶۶۶۶۰d
ماشک	۷۹۴۸cd	۷/۵۷a	۰/۴۳c	۲/۲۷ef	۱۱۸۸۶۶b
کشت مخلوط تریپیکاله- ماشک	۱۲۸۶۱a	۷/۶۴a	۰/۶۵a	۱/۵۴d	۱۳۱۷۱۹a
نخود علوفه‌ای	۷۰۸۵de	۵/۰۹b	۰/۴۱cd	۲/۴۵de	۷۱۱۸۷d
شیدر برسيم	۸۴۶۵cd	۴/۸۹b	۰/۴۹b	۲/۰۵g	۶۷۸۳۵d
گلرنگ	۵۷۹۶e	۳/۸۹cd	۰/۳۱ef	۳/۲b	۵۳۸۵۶e
خردل	۵۹۱۴e	۳/۲۷d	۰/۲۶f	۳/۸۱a	۵۱۳۵۳e
باقلا	۶۶۸۹de	۴/۵۱bc	۰/۳۶de	۲/۷۶c	۶۵۰۹۳de

در هر ستون میانگین‌هایی که دارای حروف مشترک هستند، بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.

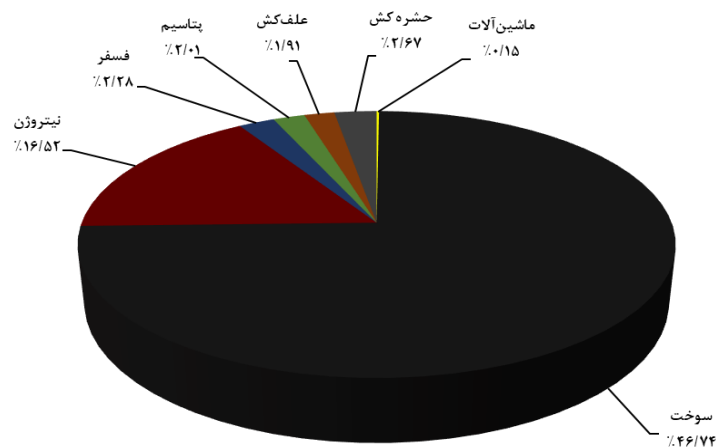
انتشار گازهای گلخانه‌ای

مقایسه بین محصولات علوفه‌ای نشان داد که بیشترین میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای به ترتیب در تولید تریپیکاله (۷۶۵ کیلوگرم معادل CO₂ در هکتار)، خردل (۷۲۰ کیلوگرم معادل CO₂ در هکتار) و جو (۶۸۵ کیلوگرم معادل CO₂ در هکتار) حاصل شد. کمترین میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای نیز به نخود علوفه‌ای (۵۸۲ کیلوگرم معادل CO₂ در هکتار) و ماشک (۶۱۰ کیلوگرم معادل CO₂ در هکتار) تعلق داشت که دلیل آن را می‌توان به مصرف کمتر کود نیتروژن در این گیاهان نسبت داد. بر اساس نتایج، سهم نیتروژن از کل انتشار گازهای گلخانه‌ای در تولید تریپیکاله و خردل به ترتیب ۶۸ و ۷۰ درصد بیشتر از تولید نخود علوفه‌ای و ۶۰ و ۶۳ درصد بیشتر از ماشک بود (شکل ۳). این موضوع نشان‌دهنده اهمیت کشت بقولات علوفه‌ای در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و در نتیجه کاهش خطرات زیست‌محیطی است. از طرف دیگر، استفاده از کودهای آلی به جای کود نیتروژن در کشت گیاهانی مانند تریپیکاله و خردل می‌تواند علاوه بر کاهش هزینه و مصرف انرژی، از لحاظ زیست‌محیطی نیز سازگار باشد. نتایج نشان داد که از بین انرژی‌های ورودی مختلف شامل ماشین‌آلات، سوخت، نیتروژن، فسفر، پتاسیم، علف‌کش و حشره‌کش که در تولید گازهای گلخانه‌ای نقش

داشتند، بیشترین سهم از کل انتشار گازهای گلخانه‌ای در تمام محصولات مورد مطالعه، به ترتیب به سوخت (۴۶/۷۴ درصد) و نیتروژن (۱۶/۵۲ درصد) اختصاص داشت (شکل ۴). همسو با این نتایج، بررسی میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای در تولید گلرنگ نشان داد که در بین نهاده‌های ورودی، سوخت و کود نیتروژن به ترتیب با ۴۹ و ۳۵ درصد بیشترین سهم از انتشار گازهای گلخانه‌ای را دارا بودند (Imanmehr, 2019). در آزمایشی دیگر گزارش شد که در کشت خالص ماشک و کشت مخلوط جو با ماشک، نهاده سوخت از نظر قابلیت گرمایش جهانی به ترتیب با ۵۲۴ و ۵۳۵ کیلوگرم معادل CO₂ در هکتار بیشترین سهم را در بین نهاده‌های مصرفی به خود اختصاص داد (Rahmati et al., 2024). محققان میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای در تولید محصولات گندم، جو، کلزا، سویا، ذرت سیلویی و برنج در شمال کشور را به ترتیب ۱۱۱۷، ۱۱۰۵، ۱۰۶۳، ۱۷۹۱، ۲۸۸۲ و ۶۰۹۴ کیلوگرم معادل CO₂ در هکتار گزارش کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که میزان بارش بالا و نیاز کمتر به آبیاری در شمال کشور، به مصرف کمتر الکتریسیته در پمپ‌های آبیاری و در نتیجه به انتشار کمتر گازهای گلخانه‌ای منتج شد (Mohammadi et al., 2014).



شکل ۳- سهم ورودی‌های مختلف در انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از تولید محصولات علوفه‌ای



شکل ۴- سهم ورودی‌های مختلف از کل انتشار گازهای گلخانه‌ای در تولید محصولات علوفه‌ای

نتیجه‌گیری

داشت. نتایج نشان داد که نهاده‌های سوخت و کود نیتروژن نقش قابل‌توجهی در میزان انرژی ورودی و انتشار گازهای گلخانه‌ای در تولید محصولات علوفه‌ای در تناوب پس از برنج در شالیزار داشتند. بنابراین، با افزایش میزان بهره‌وری در این نهاده‌های مصرفی می‌توان انرژی ورودی کل را کاهش داد که این امر علاوه بر افزایش انرژی خالص و پایداری تولید، به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای کمک شایانی خواهد نمود. همچنین، کشت لگوم‌های علوفه‌ای ماشک، نخود علوفه‌ای و شبدر به‌عنوان کشت دوم در شالیزار، به جهت کاهش استفاده از کودهای شیمیایی می‌تواند بخش زیادی از انتشار گازهای گلخانه‌ای را کاهش داده و از آسیب‌های زیست‌محیطی جلوگیری نماید.

نتایج این پژوهش نشان داد که در بین محصولات علوفه‌ای، بیشترین انرژی ورودی به ترتیب در تولید تریتیاله (۲۴۹۹۷ مگاژول در هکتار)، خردل (۲۲۵۷۲ مگاژول در هکتار) و جو (۲۲۰۲۰ مگاژول در هکتار) استفاده شد و بیشترین انرژی خروجی نیز به ترتیب به کشت مخلوط تریتیاله-ماشک (۱۵۱۵۵۱ مگاژول در هکتار)، کشت خالص ماشک (۱۳۶۹۴۴ مگاژول در هکتار) و جو (۱۱۴۸۷۴ مگاژول در هکتار) اختصاص داشت. بر اساس نتایج، سهم انرژی‌های تجدیدناپذیر در تمامی محصولات علوفه‌ای مورد مطالعه بیشتر از انرژی‌های تجدیدپذیر بود. بیشترین نسبت انرژی (۷/۶۴)، بهره‌وری انرژی (۰/۶۵ کیلوگرم بر مگاژول) و انرژی خالص (۱۳۱۷۱۹ مگاژول در هکتار) به کشت مخلوط تریتیاله-ماشک تعلق

- Imanmehr, A. (2019). Investigation of energy efficiency and greenhouse gas emissions of safflower production in terms of environment. *Journal of Researches in Mechanics of Agricultural Machinery*, 8(1), 77-87. (In Persian).
- Javadi, H., & Esfahani, S. M. J. (2023). Energy flow and greenhouse gases emission of crop production systems in south Khorasan province. *Journal of Environmental Science and Technology*, 24(10), 1-17. (In Persian). <https://doi.org/10.30495/jest.2023.66462.5642>
- Khan, S., Khan, M., & Latif, N. (2010). Energy requirements and economic analysis of wheat, rice and barley production in Australia. *Soil and Environment*, 29(1), 61-68.
- Khodaei Joghani, A., Taki, M., & Matoorian, H. (2022). Evaluating energy productivity, greenhouse gas emission, global warming potential and sustainability index of Wheat and Rapeseed agroecosystems in Khorramshahr. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 32(1), 309-324. <https://doi.org/10.22034/saps.2021.44507.2634>
- Khodarezaie, E., Khoshbakht, K., Veisi, H., & Nazari, M. R. (2023). Study of the energy flow and Global Warming Potential (GWP) of alfalfa and maize silage production with different water supply sources (a case study: Qazvin Plain). *Advanced Environmental Sciences*, 21(3), 1-30. <https://doi.org/10.48308/envs.2022.1118>
- Kitani, O. (1999). Energy and Biomass Engineering. CIGR, handbook of agricultural engineering, vol. V. St Joseph, MI: ASAE Publication.
- Kokten, K., Cacan, E., Gokdogan, O., & Firat Baran, M. (2017). Determination of energy balance of common vetch (*Vicia sativa* L.), hungarian vetch (*Vicia pannonica* C.) and narbonne vetch (*Vicia narbonensis* L.) production in Turkey. *Legume Research*, 40(3), 491-496. <https://doi.org/10.18805/lr.v0i0.6842>
- Lal, R. (2004). Soil carbon equestrian impacts on global climate change and food security. *Science*, 304(5677), 1623-1627. <https://doi.org/10.1126/science.1097396>
- Liu, L., Langer, V., Høgh-Jensen, H., & Egelyng, H. (2010). Life Cycle assessment of fossil energy use and greenhouse gas emissions in Chinese pear production. *Journal of Cleaner Production*, 18(14), 1423-1430. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.05.025>
- Meena, V., Dotaniya, M. L., Meena, M. D., Jat, R. S., Meena, M. K., Choudhary, R. L., Meena, H. S., Meena, B. L., Meena, P. D., Rai, P. K., Singh, V. V. (2025). Energy budget and carbon footprint under diverse nitrogen management modules in mustard (*Brassica juncea* L.) production under subtropical climate. *PLoS One*, 20(10), e0332754. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0332754>
- Mohammadi, A., Rafiee, S., Jafari, A., Keyhani, A., Mousavi-Avval, S. H., & Nonhebel, S. (2014). Energy use efficiency and greenhouse gas emissions

سپاسگزاری

از سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی و موسسه تحقیقات برنج کشور که در انجام این پژوهش حمایت نموده‌اند، تشکر و قدردانی می‌گردد.

مشارکت نویسندگان

نحوه و میزان مشارکت نویسندگان در انجام این پژوهش به‌صورت زیر است:

- نویسنده اول: تعیین روش اجرای پژوهش، نگارش، بازبینی و اصلاح مقاله.
- نویسنده دوم: داده‌برداری، تجزیه داده‌ها، نگارش.

دسترسی به داده‌ها

اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

اصول اخلاقی

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این اثر علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آن‌ها است. همچنین در این پژوهش از هوش مصنوعی در هیچ یک از موارد تحقیق و نوشتن مقاله استفاده نشده است.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچ گونه منافع مالی رقابتی یا روابط شخصی شناخته‌شده‌ای که ممکن است بر کار گزارش‌شده در این مقاله تأثیر گذاشته باشد، وجود ندارد.

حمایت مالی

این کار با حمایت مالی سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی و موسسه تحقیقات برنج کشور با شماره پروژه ۱۳-۰۴۵۷-۰۴۴-۰۳۹-۰۲۱۰ انجام شده است.

منابع

- Bahrami, H., Taki, M., & Monjezi, N. (2011). Optimization of energy consumption for wheat production in Iran using data envelopment analysis technique. *African journal of agricultural research*, 6(27), 5978-5986. <https://doi.org/10.5897/AJAR11.1117>
- Bielski, S., Dubis, B., & Jankowski, K. (2015). The energy efficiency of production and conversion of winter triticale biomass into biofuels. *Przemysł Chemiczny*, 94(10), 1798-1801.

- Springmann, M., & Freund, F. (2022). Options for reforming agricultural subsidies from health, climate, and economic perspectives. *Nature Communications*, 13, 82. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-27645-2>
- Soltani, A., Rajabi, M. H., Zeinali, E., & Soltani, E. (2013). Energy inputs and greenhouse gases emissions in wheat production in Gorgan, Iran. *Energy*, 50, 54-61. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.12.022>
- Szemplinski, W., Dubis, B., Lachutta, K. M., & Jankowski, K. J. (2021). Energy optimization in different production technologies of winter triticale grain. *Energies*, 14(4), 1003. <https://doi.org/10.3390/en14041003>
- Taleghani, A., Almassi, M., & Ghahderijani, M. (2020). Environmental evaluation and optimization of energy use and greenhouse gases mitigation for farm production systems in Mashhad, Iran. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 35272-35283. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09778-x>
- Tavakoli Kakhki, H., & Ghodsi, M. (2020). Evaluation of energy efficiency indices according to wheat (*Triticum aestivum* L.) based crop in conservation agricultural systems in temperate climate region (A case study: Gonabad). *Journal of Agroecology*, 12(3), 433-445. (In Persian). <https://doi.org/10.22067/jag.v12i3.80119>
- Vafabakhsh, J., & Mohammadzadeh, A. (2019). Energy flow and GHG emissions in major field and horticultural crop production systems (Case Study: Sharif Abad Plain). *Journal of Agroecology*, 11, 365-382. (In Persian). <https://doi.org/10.22067/jag.v11i2.81742>
- Yadav, G. S., Das, A., Lal, R., Babu, S., Meena, R. S., Saha, P., Singh, R., & Datta, M. (2018). Energy budget and carbon footprint in a no-till and mulch based rice-mustard cropping system. *Journal of Cleaner Production*, 191(4), 144-157. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.173>
- Zahedi, M., Eshghizadeh, H. R., & Mandani, F. (2014). Assessment of energy efficiency and economic indicators in the production of safflower in Isfahan province. *Journal of ecological agriculture*, 2(4), 53-45. (In Persian).
- Zangeneh, M., Omid, M., & Akram, A. (2010). A comparative study on energy use and cost analysis of potato production under different farming technologies in Hamadan province of Iran. *Energy*, 35(7), 2927-2933. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.03.024>
- of farming systems in north Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, 724-733. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.11.012>
- Nabavi Pelesarai, A., Shaker Kouhi, S., & Bagher Dehpour, M. (2013). Modeling and optimization of energy inputs and greenhouse gas emissions for eggplant production using artificial neural network and multi-objective genetic algorithm. *International Journal of Advanced Biological and Biomedical Research*, 1(11), 1478-1489.
- Qasemi-Kordkheili, P., Taki, M., Kazemi, N., & Hemmati, A. (2013). Energy input-output and economic analysis for soybean production in Mazandaran province of Iran. *Agriculture*, 56, 13246-13251.
- Rabiee, M., Majidian, M., Alizadeh, M. R., & Kavooosi, M. (2021). Evaluation of energy use efficiency and greenhouse gas emission in rapeseed (*Brassica napus* L.) production in paddy fields of Guilan province of Iran. *Energy*, 217, 119411. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119411>
- Rabiee, M., Hosseini Chaleshtori, M., Shaker kouhi, S., & Akbarzadeh, E. (2026). The comparison of qualitative and quantitative yield and economic indices of forage crops as a second crop in rotation after rice. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 57(2), 43-55. (In Persian). <https://doi.org/10.22059/ijfcs.2025.405110.655164>
- Rabiee, M., & Shaker kouhi, S. (2025). Best intercropping systems after rice harvesting in paddy fields of Guilan province. *Strategic Research Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources*, 10(1), 33-44. (In Persian). <https://doi.org/10.22047/srjasnr.2025.218189>
- Rahmati, M., Sepahvand, M., Ahmadi, A., Bahadori, M., Mohammad Alipour, Z., & Farhadinejad, A. M. (2024). Evaluation of energy-economic and environmental indexes in two methods of rainfed fodder production in Khorramabad County. *Journal of Researches in Mechanics of Agricultural Machinery*, 13(4), 1-12. (In Persian). <https://doi.org/10.22034/jrmam.2024.14659.695>
- Raja, W., Bhat, M. A., Allie B. A., Jehangir, I. A., Hussain, A., Saad, A. A., & Mir, M. S. (2022). Nutrient use efficiency and productivity of field pea (*Pisum sativum* L.) influenced by combined nitrogen and sulphur application. *Legume Research*, 45(4), 497-501. <https://doi.org/10.18805/LR-4753>
- Seydosoglu, S., Firat Baran, M., Turan, N., Alfarraraj, S., & Albasher, G. (2023). Greenhouse gas emission and energy analysis of vetch (*Vicia sativa* L.) cultivation. *Journal of King Saud University- Science*, 35(3), 1-5. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2023.102541>

