



Evaluation of energy and cumulative exergy demand indicators of different lettuce production methods in Alborz province

Hassan Ghasemi-Mobtaker¹ | Majid Khanali² | Mohammad Ali Ghahremani–

Aghbolagh Rostam Khan³ | Alireza Rafiei⁴

1. Corresponding Author, Department of Agricultural Machinery Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: mobtaker@ut.ac.ir
2. Department of Agricultural Machinery Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: khanali@ut.ac.ir
3. Department of Agricultural Machinery Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-Mail: ali.ghahremani79@ut.ac.ir
4. Department of Agricultural Machinery Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-Mail: alireza.rafiei@ut.ac.ir

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article Article history: Received: Sep. 26, 2025 Revised: Oct. 21, 2025 Accepted: Oct. 28, 2025 Published online: Winter 2026 Keywords: <i>Energy, Lettuce, Pressurized Irrigation, Renewable resources, Water productivity</i>	Due to population growth and heightened awareness of healthy nutrition, the consumption of vegetables, particularly lettuce, has significantly increased in recent years. This study evaluated the energy use and cumulative exergy demand (CExD) of different lettuce production systems in Alborz province and proposed strategies to reduce energy consumption. Data were collected through face-to-face interviews and completion of 60 questionnaires. The results indicated a considerable variation in total energy inputs across the methods, with the highest consumption observed in the seed-flood irrigation at 107,409.79 MJ ha⁻¹, and the lowest in the seed-drip irrigation at 54,734.04 MJ ha⁻¹. Diesel fuel was the predominant energy input in flood irrigation systems, whereas diesel fuel and nylon were the primary inputs in drip irrigation systems. The energy ratio was less than one in all systems and the highest energy ratio (0.68) occurred in seed–drip irrigation. The highest water productivity was recorded in the seedling–drip irrigation (18.75 kg m⁻³). Moreover, the CExD analysis revealed that fossil non-renewable resources in the flood irrigation systems for seeds and seedlings accounted for the highest burdens, with 3,438.51 and 2,188.70 MJ, respectively. Inputs such as diesel fuel and nylon were identified as the main contributors to this dependency, underscoring the decisive role of energy-intensive inputs in increasing exergy burden and reducing the sustainability of lettuce production systems. Ultimately, it is recommended that farm management practices optimize the use of energy-intensive inputs like diesel fuel and chemical fertilizers, substitute chemical fertilizers with organic alternatives, and replace nylon with biodegradable material.

Cite this article: Ghasemi-Mobtaker, H., Khanali, M., Ghahremani-Aghbolagh Rostam Khan, M.A., & Rafiei, A. (2026). Evaluation of energy and cumulative exergy demand indicators of different lettuce production methods in Alborz province., *Iranian Journal of Biosystem Engineering*, 56 (4), 71-89. <https://doi.org/10.22059/ijbse.2025.403094.665618>

© The Author(s). Publisher: The University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijbse.2025.403094.665618>



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Energy and water as essential inputs of irrigation system are key and vital elements for social and economic development. In the agricultural sector, a main part of energy utilized for crops production is for irrigation systems. Today, the use of pressurized irrigation systems along with seedlings has been developed to manage water and energy resources. However, the results of the studies indicate that although the use of pressurized irrigation increased water use efficiency, it also increased energy consumption. This can lead to environmental burdens, so effective and efficient usage of energy sources is considered as fundamental requirements of sustainable agriculture. So, the goal of the current study is to evaluate the energy, water and cumulative exergy demand (CExD) indicators of different lettuce production methods in Alborz province to introduce a stable production system.

Material and Methods

This study was undertaken in Alborz province, and four different lettuce production methods systems were studied and compared from energy and exergy point of view. The data required for this study were collected through face-to-face interviews and the completion of 60 questionnaires. The utilized inputs for lettuce production, including total direct and indirect inputs, are recorded during the growing season and then energy equivalences are computed by using energy coefficients. According to inputs/outputs as well as their energy equivalents, energy indices are computed. For the assessment of CExD indicators in this study, the CEVD V1.07 method available in the SimaPro software, which utilizes data from databases such as Ecoinvent, was employed to determine the cumulative exergy of renewable and non-renewable resources in different lettuce production systems.

Results and Discussion

The results of this study highlight significant variation in energy inputs and outputs across different lettuce production systems in Alborz Province. Average energy consumption ranged from 54,734.04 MJ ha⁻¹ in seedling–drip irrigation to 107,409.79 MJ ha⁻¹ in seedling–flood irrigation. The lettuce production systems showed higher reliance on diesel fuel due to water pumping requirements. For one ton of lettuce, the major inputs were diesel fuel in seed–flood and seedling–flood, while diesel fuel and nylon dominated in seed–drip and seedling–drip. Energy indices confirmed these patterns: the highest energy ratio (0.68) and productivity (0.97 kg MJ⁻¹) occurred in seed–drip irrigation, whereas seed–flood had a lowest energy ratio and productivity. Net energy gain was negative in all investigated systems, indicating inefficiency. Water productivity, however, was greatest in seedling–drip (18.75 kg m⁻³), highlighting the trade-off between water efficiency and energy performance. CEVD analysis confirmed the dominance of fossil non-renewables across all methods, particularly in seed–flood (3438.51 MJ) and seedling–flood (2188.70 MJ). Diesel, nylon, electricity, and chemical fertilizers were the principal contributors to the exergy burden, which aligns with evidence from other crops where diesel and fertilizers play a decisive role in energy inefficiency. These results emphasize that achieving sustainability in lettuce production requires targeted interventions: optimizing diesel use, adopting high-efficiency machinery, integrating renewable energy for irrigation, substituting organic fertilizers for chemical ones, and replacing nylon with biodegradable alternatives. Such strategies directly address the most energy-intensive inputs and could substantially reduce fossil dependency while maintaining crop performance.

Conclusions

This study evaluated energy efficiency and CEVD in lettuce production systems in Alborz Province, Iran, with emphasis on the drip irrigation systems for seedlings and seeds. Total energy inputs ranged from 54,734.04 to 107,409.79 MJ ha⁻¹, with diesel fuel dominating flood irrigation and diesel fuel and nylon as the main contributor in drip systems. Across all methods, direct and nonrenewable energy inputs prevailed, primarily from electricity, diesel fuel, and nylon. The energy ratio was less than one in all systems and water productivity was highest in seedling–drip (18.75 kg m⁻³). CEVD analysis confirmed fossil non-renewables as the dominant burden, particularly in seed–flood (3,438.51 MJ) and seedling–flood (2,188.70 MJ). Strategies such as optimizing energy-intensive inputs, using organic fertilizers, adopting renewable energy, and replacing nylon with biodegradable alternatives are recommended to enhance sustainability.

Author Contributions

Conceptualization, H.G.M., M.Kh. and M.A.GARKh.; methodology, H.G.M. and M.A.GARKh.; software, M.A.GARKh. and A.R.; validation, H.G.M. and M.Kh.; formal analysis, H.G.M., M.Kh. and M.A.GARKh.; investigation, A.R.; resources, A.R. and H.G.M.; data curation, H.G.M., M.Kh., M.A.GARKh.

and A.R.; writing-original draft preparation, H.GM. and M.A.GARKh.; writing-review and editing, H.GM. and M.Kh.; visualization, A.R. and M.A.GARKh.; supervision, H.GM. and M.Kh.; project administration, A.R. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Data Availability Statement

The data that support the findings of this study will be available from the corresponding author on reasonable requests.

Acknowledgments

The authors would like to acknowledge for all supports by Faculty of Agricultural Engineering and Technology, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

Ethical considerations

The study was approved by the Ethics Committee of the University of Tehran. authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Conflict of interest

The authors declare no conflicts of interest.

ارزیابی شاخص‌های انرژی و تقاضای اکسرژی تجمعی در روش‌های مختلف تولید کاهو در استان البرز

حسن قاسمی مبتکر^۱ | مجید خانعلی^۲ | محمدعلی قهرمانی آقبلاغ رستم خان^۳ | علیرضا رفیعی^۴

۱. نویسنده مسئول، گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه

تهران، کرج، ایران. رایانامه: mobtaker@ut.ac.ir

۲. گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج،

ایران. رایانامه: khanali@ut.ac.ir

۳. گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

رایانامه: ali.ghahremani79@ut.ac.ir

۴. گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

رایانامه: alireza.rafiee@ut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۷/۴

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۷/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۸/۶

تاریخ انتشار: زمستان ۱۴۰۴

واژه‌های کلیدی:

آبیاری تحت فشار،

انرژی،

بهره‌وری آب،

کاهو،

منابع تجدیدپذیر

با رشد جمعیت و افزایش آگاهی نسبت به تغذیه سالم، مصرف سبزیجات به‌ویژه کاهو در سال‌های اخیر افزایش چشمگیری یافته است. این تحقیق به ارزیابی انرژی مصرفی و اکسرژی تجمعی روش‌های مختلف تولید کاهو در استان البرز پرداخته و راهکارهایی برای کاهش مصرف انرژی ارائه می‌دهد. داده‌های مورد نیاز از طریق مصاحبه حضوری و تکمیل تعداد ۶۰ پرسش‌نامه جمع‌آوری شد. نتایج نشان داد کل انرژی ورودی در روش‌های مختلف تفاوت محسوسی داشته است به‌طوری که بیش‌ترین انرژی مصرفی در روش بذر- غرق‌آبی با ۱۰۷۴۰۹/۷۹ و کم‌ترین آن در روش بذر- قطره‌ای با ۵۴۷۳۴/۰۴ مگاژول بر هکتار بود. سهم عمده انرژی در سامانه‌های غرق‌آبی متعلق به سوخت دیزل و در سامانه‌های قطره‌ای به سوخت دیزل و نایلون اختصاص داشت. شاخص نسبت انرژی در تمامی روش‌ها کمتر از یک و بالاترین مقدار آن متعلق به روش بذر- قطره‌ای با مقدار ۰/۶۸ بود. بیش‌ترین بهره‌وری آب، به روش نشاء- قطره‌ای با ۱۸/۷۵ کیلوگرم بر مترمکعب اختصاص داشت. نتایج تحلیل تقاضای اکسرژی تجمعی نشان داد که منابع تجدیدپذیر فسیلی در روش بذر- غرق‌آبی و نشاء- غرق‌آبی با ۳۴۳۸/۵۱ و ۲۱۸۸/۷۰ مگاژول بیش‌ترین بار را به خود اختصاص دادند و نهاده‌هایی مانند سوخت دیزل و نایلون اصلی‌ترین عوامل این وابستگی بودند که بیانگر نقش تعیین‌کننده نهاده‌های انرژی‌بر در افزایش بار اکسرژی و کاهش پایداری سامانه‌های تولیدی کاهو است. در آخر توصیه شد با مدیریت مزرعه، بهینه‌سازی مصرف نهاده‌های پرانرژی مانند سوخت دیزل و کودهای شیمیایی، جایگزینی کودهای شیمیایی با کودهای آلی و نایلون با مواد زیست‌تخریب‌پذیر، الگوی تولید کاهو پایدارتر و کم‌آلاینده‌تر گردد.

استاد: قاسمی مبتکر، حسن؛ خانعلی، مجید؛ قهرمانی آقبلاغ رستم خان، محمدعلی؛ و رفیعی، علیرضا (۱۴۰۴). ارزیابی شاخص‌های انرژی و تقاضای اکسرژی تجمعی

در روش‌های مختلف تولید کاهو در استان البرز، مجله مهندسی بیوسیستم ایران/ ایران، ۵۶ (۴)، ۷۱-۸۹.

<https://doi.org/10.22059/ijbse.2025.403094.665618>

© نویسنده‌گان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijbse.2025.403094.665618>

مقدمه

کاهو به عنوان یکی از قدیمی ترین سبزیجات دنیا، از مهم ترین سبزی های برگی است که عمدتاً برای مصارف تازه خوری و سالادی استفاده می شود. منشاء کاهو هندوستان و آسیای مرکزی می باشد و یکی از گیاهان مهم گروه سبزیجات است که در بسیاری از نقاط جهان و ایران به فراوانی کاشته می شود. از نظر مواد غذایی کاهو دارای منابع معدنی غنی از جمله آهن، کلسیم، منیزیم، ید، منگنز، سدیم، مس و همچنین دارای ویتامین های آ، ب و ث می باشد (راهی و همکاران، ۱۳۹۹). بر اساس آمارهای وزارت جهاد کشاورزی در کشور ما روند افزایش سطح زیرکشت این محصول طی سال های اخیر بسیار چشمگیر بوده است. به موازات اقتصادی شدن تولید این محصول و توجه جوامع به سلامت افراد، تولید ارقام متنوع از تیپ های مختلف صورت گرفته است (محبی و موسوی، ۱۴۰۲).

امروزه مصرف منابع انرژی در سامانه های تولیدی مانند کشاورزی بسیار زیاد است که این امر منجر به بارهای محیط زیستی زیادی نظیر کاهش منابع، گرمایش جهانی و خطرات سلامتی انسان می شود (Chen et al., 2019). همچنین کمبود آب و کاهش تدریجی منابع آبی با کیفیت مناسب، یکی از عوامل محدودکننده تولیدات زراعی در اکثر نقاط جهان و از جمله ایران است. به بیان دیگر انرژی و آب از جمله عناصر کلیدی و حیاتی برای توسعه کشاورزی هستند (Tarjuelo et al., 2015). در این راستا استفاده از سامانه های آبیاری تحت فشار به منظور کاهش مصرف آب و استفاده از روش نشاکاری به منظور افزایش عملکرد و کاهش دوره رشد توسعه پیدا کرده است. اگرچه مزایای روش نشاکاری، کاهش طول دوره رشد، کاهش آب مصرفی و سموم، افزایش نسبی عملکرد و افزایش ارزش افزوده محصول تولیدی اشاره شده است (حیدری سلطان آبادی، ۱۳۹۴)؛ با این وجود نتایج برخی از مطالعات نشان می دهد استفاده از آبیاری تحت فشار علی رغم افزایش کارایی مصرف آب، ممکن است منجر به افزایش مصرف انرژی و متعاقب آن تشدید اثرات محیط زیستی نیز بشود (Tarjuelo et al., 2015; Ghasemi-Mobtaker et al., 2020).

تحلیل های مقایسه ای درباره روش های مختلف کشت سبزیجات از دیدگاه مصرف انرژی نشان داده اند که با توجه به تفاوت در نیازهای انرژی و منابع ورودی، هر روش دارای کارایی متفاوتی است. در همین راستا، به منظور مدیریت بهینه منابع آب، انرژی و محیط زیست، مطالعات متعددی در زمینه توسعه و بهبود روش های کشت انجام شده است. (حیدری سلطان آبادی، ۱۳۹۴) در مطالعه ای با هدف ارائه راهکارهایی برای کاهش مصرف انرژی، دو روش بذرکاری و نشاکاری در تولید پیاز را مقایسه کرد. نتایج نشان داد که روش نشاکاری نسبت به بذرکاری از شاخص های انرژی مطلوب تری برخوردار است؛ به گونه ای که مصرف انرژی برای تولید یک کیلوگرم پیاز در این روش حدود ۲۱/۵ درصد کاهش یافت و در نتیجه، به عنوان روش کارتر توصیه گردید. در مطالعه ای مشابه، جریان انرژی و پتانسیل گرمایش جهانی را در دو روش کشت نشایی و خشکه کاری برنج تحت سامانه های مختلف آبیاری بررسی شد. یافته ها نشان داد سامانه های آبیاری تحت فشار همراه با کشت نشاء غیر گلخواب، به دلیل مصرف نهاده کمتر و عملکرد مشابه با کشت نشاء گلخواب، دارای کارایی انرژی بالاتر و پتانسیل گرمایش جهانی پایین تری هستند (حسینی و همکاران، ۱۴۰۰). مطالعه ای شاخص های پایداری تولید گوجه فرنگی و کدو سبز ارگانیک را مورد بررسی قرار داد. نتایج نشان داد که تولید گوجه فرنگی در این سامانه، اثرات محیط زیستی بیشتری نسبت به کدو سبز دارد، اما هر دو محصول در مقایسه با روش های دیگر (غیر ارگانیک و گلخانه)، گزینه های پایدارتر و کم اثرتر از نظر محیط زیستی بودند (Ali et al., 2024). در تحقیقی که در ایالات متحده آمریکا انجام شد، هدف بررسی تأثیرات کاهش گازهای گلخانه ای در تولید کاهو با توجه به تغییرات در شرایط محیطی و پذیرش فن آوری های نوین بود. نتایج نشان داد که تغییرات در سامانه های تولیدی کاهو می تواند منجر به کاهش ۳۰ درصدی انتشار گازهای گلخانه ای در مقایسه با روش های سنتی شود. این تحقیق فرصت هایی برای کاهش گازهای گلخانه ای در کوتاه مدت، از جمله استفاده از دیزل تجدیدپذیر و برق دار کردن سامانه های آبیاری، و همچنین بررسی مزایای بلندمدت فن آوری های نوین و خرید کودهای کم کربن پیشنهاد داد (Maynard & Quinn, 2025).

در کشور یونان، پژوهشی اثرات محیط زیستی کشت ارگانیک و معمولی کاهو را مورد ارزیابی قرار داد. کشت معمولی کاهو عملکرد محیط زیستی بهتری نسبت به کشت ارگانیک از نظر انتشار دی اکسید کربن و انتشارات محیط زیستی به ترتیب با ۵۱ درصد و ۵۳ درصد داشت. دلیل این تفاوت این بود که کشت ارگانیک به دلیل عملکرد پایین تر محصول، به سطح زیرکشت قابل توجه بیشتری نیاز داشت تا به همان محصول تولیدی دست یابد. علاوه بر این، مشخص شد که مرحله آبیاری به دلیل نیازهای انرژی بالای آن برای پمپاژ آب و برق وابسته به منابع فسیلی، عمدتاً به بیشتر رده های اثر کمک می کند. نتایج این تحقیق بیانگر آن بود که بهبود بهره وری و استفاده از انرژی های تجدیدپذیر در آبیاری می تواند کارایی محیط زیستی کشت ارگانیک را افزایش دهد (Foteinis & Chatzisyneon, 2016). در مطالعه ای

دیگر در کشور لهستان، اثرات محیط‌زیستی تولید هویج در باغ‌های معمولی و ارگانیک مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که کشت ارگانیک هویج نسبت به کشت معمولی، اثرات محیط‌زیستی کمتری دارد. در عین حال، کشت هویج بیش‌ترین تأثیر محیط‌زیستی را در رده‌های خسارت سلامت انسان و منابع به خود اختصاص داده است. این نتایج نشان می‌دهد که هرچند کشت ارگانیک به‌طور کلی اثرات محیط‌زیستی کمتری دارد، اما استفاده از کودها و سموم شیمیایی در هر دو روش، به‌ویژه در کشت معمولی، می‌تواند تأثیرات منفی قابل‌توجهی به همراه داشته باشد. بنابراین، در این مطالعه پیشنهاد شد که کشاورزان در انتخاب روش‌های حفاظت از گیاه و دوزهای بهینه سموم و کودها، تصمیم‌گیری آگاهانه‌تری داشته باشند (Kowalczyk & Cupiał, 2020).

پژوهشی در کشور برزیل برای بررسی انتشارات گازهای گلخانه‌ای و ردپای کربن تولید خیار، گوجه‌فرنگی و کاهو در دو سامانه تک‌کشتی و کشت مخلوط صورت گرفت. نتایج نشان داد که انتشار گازهای گلخانه‌ای در روش کشت مخلوط این محصولات با ۱۶۳۶۸ کیلوگرم معادل دی‌اکسیدکربن، حدود ۳۵ درصد کمتر از انتشار گازهای گلخانه‌ای در روش تک‌کشت با ۲۵۲۷۳ کیلوگرم معادل دی‌اکسیدکربن بود. یافته‌ها تأکید داشت که کشت مخلوط، به‌ویژه در تولید سبزیجاتی مانند خیار، گوجه‌فرنگی و کاهو، می‌تواند به کاهش قابل‌توجه گازهای گلخانه‌ای و ردپای کربن کمک کند. بنابراین، بر اساس این نتایج، پیشنهاد شد که کشت مخلوط این سبزیجات، به‌ویژه در مناطقی با حساسیت بالا به تغییرات اقلیمی، مدنظر قرار گیرد تا به کاهش اثرات منفی انتشار گازهای گلخانه‌ای کمک کند (Pereira et al., 2021). پژوهشی به بررسی مصرف انرژی و اثرات محیط‌زیستی سامانه‌های مختلف آبیاری در تولید محصول گوجه‌فرنگی در حوضه دریاچه ارومیه پرداخت. نتایج نشان داد که مزارع دارای سامانه آبیاری سطحی مصرف انرژی بیشتری نسبت به مزارع آبیاری تحت‌فشار داشتند. در بین مزارع مورد مطالعه، هر دو روش آبیاری کرتی و نواری کم‌ترین بهره‌وری انرژی و آبیاری قطره‌ای بالاترین بهره‌وری انرژی را داشت. سامانه آبیاری قطره‌ای، با بهره‌وری انرژی بالاتر، به‌عنوان مناسب‌ترین گزینه از لحاظ محیط‌زیستی شناخته شد. در این پژوهش پیشنهاد شد که با جایگزینی کودهای شیمیایی با کودهای آلی، به‌کارگیری روش‌های نوین توزیع مواد شیمیایی در مزرعه، و استفاده از آبیاری بهینه، می‌توان الگوی مصرف انرژی را اصلاح کرده و اثرات محیط‌زیستی را کاهش داد تا در نتیجه، این اقدامات به بهبود پایداری محیط‌زیستی در بخش کشاورزی منجر شوند (Maarefi et al., 2022). همچنین در جدول ۱ مروری بر سایر مطالعات انجام شده در زمینه شاخص‌های پایداری انرژی و اکسرژی محصولات مختلف کشاورزی نشان داده شده است.

در پی محدودیت منابع آبی و نیاز به کاهش مصرف آب در کشاورزی، توسعه روش‌های نوین آبیاری و کشت به‌منظور افزایش کارایی مصرف آب در حال گسترش است. با این حال، این تغییرات منجر به افزایش مصرف انرژی و پیامدهای محیط‌زیستی از جمله تشدید اثرات تغییرات اقلیمی شده است. در ایران، بخش قابل‌توجهی از زمین‌های زیرکشت به تولید صیفی‌جات و سبزیجات اختصاص دارد، و به همین دلیل، تحلیل مصرف انرژی در تولید این محصولات، به‌ویژه در سامانه‌های آبیاری تحت‌فشار، امری ضروری است تا به مدیریت بهینه نهاده‌ها و کاهش اثرات محیط‌زیستی کمک کند. با توجه به اینکه روش‌های نوین آبیاری و استفاده از نشاء علی‌رغم کاهش مصرف آب و کاهش دوره رشد گیاه می‌تواند منجر به تغییراتی در مصرف انرژی و اثرات محیط‌زیستی در سامانه‌های مختلف کشاورزی شود، هدف اصلی این تحقیق، تحلیل مصرف انرژی و تقاضای اکسرژی تجمعی در سامانه‌های مختلف تولید کاهو در استان البرز به‌عنوان یکی از سبزیجات مهم کشاورزی است تا با معرفی سامانه‌های پایدار تولید این محصول، راهکارهایی برای بهینه‌سازی مصرف انرژی و کاهش اثرات محیط‌زیستی ارائه دهد. در حالی که مطالعات متعددی به ارزیابی انرژی در کشاورزی پرداخته‌اند، ترکیب ارزیابی انرژی و اکسرژی در تولید کاهو، به‌ویژه در شرایط کشاورزی ایران و استفاده از سامانه‌های آبیاری تحت‌فشار، هنوز نادیده گرفته شده است. این شکاف پژوهشی لزوم استفاده از شاخص‌های اکسرژی به‌منظور بررسی پایداری انرژی در این سامانه‌ها را آشکار می‌کند تا راهکارهای پایداری برای بهینه‌سازی مصرف آب و انرژی و همچنین کاهش اثرات محیط‌زیستی ارائه گردد.

جدول ۱. مرور مطالعات انجام شده در زمینه شاخص‌های پایداری در تولید محصولات کشاورزی

مطالعه موردی	منطقه	تحلیل انرژی	تحلیل اکسرژی	نقاط داغ	منبع
گوجه‌فرنگی	ترکیه	✓	✓	کودهای شیمیایی، سوخت دیزل و الکتریسیته	(Yildizhan & Taki, 2018)
نیشکر	خوزستان	✓	✓	الکتریسیته و سوخت دیزل	(Kaab et al., 2019)
نیشکر	خوزستان	✓	✓	الکتریسیته، سوخت دیزل و کودهای شیمیایی	(Naseri et al., 2021)
خرما	خوزستان	✓	✓	سوخت دیزل، کود نیتروژن و کود دامی	(Hesampour et al., 2022)
زعفران	مرکزی	✓	✓	کود نیتروژن، سوخت دیزل و سموم شیمیایی	(Hatim et al., 2023)

مواد و روش ها

این مطالعه در استان البرز به عنوان یکی از مناطق مهم تولید کاهو در ایران انجام گرفت. این استان بین عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۳۲ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۲۰ دقیقه شمالی و ۵۰ درجه و ۹ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۲۷ دقیقه طول شرقی قرار دارد (شکل ۱). در این مطالعه، داده ها در طی سال های زراعی ۱۴۰۳-۱۴۰۴ از طریق مصاحبه با کشاورزان و تکمیل پرسش نامه ها در دوره رشد محصول جمع آوری شدند. شرایط اقلیمی مربوط به سال های مذکور نیز در نظر گرفته شد تا تأثیر مستقیم بر مصرف انرژی و بهره وری آب در سامانه های آبیاری مشخص شود. با توجه به گسترده بودن جامعه آماری در این پژوهش، از روش نمونه گیری تصادفی ساده، که یکی از روش های آماری معمول در ارتباط با مطالعه متغیرهای کیفی می باشد برای تعیین حجم نمونه استفاده شد. حجم نمونه مورد نیاز برای محصول کاهو با استفاده از رابطه کوکران (رابطه ۱) برابر ۶۰ نمونه برآورد گردید (Kaab et al., 2019).

$$n = \frac{N(s \times t)^2}{(N - 1)d^2 + (s \times t)^2} \quad \text{رابطه ۱}$$

که در این رابطه N اندازه جامعه آماری یا تعداد کشاورزان، t ضریب اطمینان قابل قبول که با فرض نرمال بودن توزیع صفت موردنظر از جدول t استیودنت به دست می آید، S برآورد انحراف معیار صفت مورد مطالعه در جامعه، d دقت احتمال مطلوب (نصف فاصله اطمینان) و n حجم نمونه است.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی استان البرز

روند تحلیل انرژی نهاده ها و ستانده

در این مطالعه، نهاده های مصرفی در نظر گرفته شده برای تولید کاهو شامل بذر کاهو، نیروی انسانی، سوخت دیزل، کودهای شیمیایی (اوره، فسفات و پتاسیم)، سموم شیمیایی (حشره کش و قارچ کش) ماشین های کشاورزی، آب آبیاری و الکتریسیته می باشد. ستانده این بخش نیز کاهو در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است که در استان البرز روش های مختلفی برای تولید کاهو وجود دارد. با توجه به اهمیت این موضوع، در این مطالعه برای بررسی روش های مختلف تولید کاهو، چهار سامانه مختلف شامل بذر- آبیاری غرق آبی، بذر- آبیاری قطره ای، نشاء- آبیاری غرق آبی و نشاء- آبیاری قطره ای مورد بررسی قرار گرفت.

به منظور محاسبه میزان انرژی معادل نهاده ها و ستانده ها، میزان مصرف هر یک از نهاده ها و ستانده ها در هم ارز انرژی آن ها (جدول ۲) ضرب شد که بیانگر میزان محتوای انرژی است. این فرآیند با استفاده از نرم افزار Microsoft Excel انجام شد و نتایج محاسبات انرژی با استفاده از روابط مربوطه در این نرم افزار به دست آمد.

بنابراین انرژی معادل نهاده های بذر، نیروی انسانی، سوخت دیزل، کودهای شیمیایی، سموم شیمیایی، ماشین های کشاورزی، آبیاری و الکتریسیته از حاصل ضرب میزان مصرفی هر یک از آن ها در هم ارز انرژی متناظر آن نهاده طبق رابطه (۲) به دست می آید (Ghasemi-Mobtaker et al., 2010):

$$IO_E = IO_U \times EC_{IO} \quad \text{رابطه ۲}$$

که در آن IO_E انرژی معادل نهاده ها (مگاژول)؛ IO_U میزان مصرف نهاده ها (بذر، نیروی انسانی، سوخت فسیلی و غیره) برحسب واحد هر یک از آن ها و EC_{IO} هم ارز انرژی نهاده ها برحسب مگاژول بر واحد می باشد.

انرژی مربوط به نهاده ماشین ها از مهم ترین اقلام انرژی مصرفی در کل فرآیند موازنه انرژی تولیدات کشاورزی است. منظور از انرژی ماشین، میزان انرژی غیرمستقیمی است که برای ساخت ماشین ها استفاده شده است. جهت برآورد انرژی نهاده برای ماشین ها و تجهیزات در هکتار، باید وزن ماشین های مورد استفاده در مزرعه، مدت ساعات کاری در هکتار، هم ارز انرژی و عمر مفید هر ماشین منظور شود و

انرژی ماشین‌ها و ادوات طبق رابطه (۳) محاسبه گردد (Ghasemi-Mobtaker et al., 2020):

$$ME = \frac{G \times M_P \times t}{T} \quad \text{رابطه ۳}$$

که در آن ME انرژی ماشین در واحد سطح (مگاژول بر هکتار)، G جرم ماشین (کیلوگرم)، M_P انرژی ماشین (مگاژول بر کیلوگرم)، t زمان مورد استفاده شده از ماشین در واحد سطح (ساعت بر هکتار) و T عمر مفید ماشین (ساعت) است (Paratscha et al., 2019).
 نهاده مهم دیگر در تولید کاهو الکتریسیته است که برای پمپاژ آب استفاده می‌شود. به بیان دیگر انرژی مصرفی برای تأمین آب موردنیاز برای آبیاری و انرژی لازم برای آبیاری در طی فصل رشد محصول شامل انرژی مستقیم و انرژی غیرمستقیم می‌باشد. انرژی مستقیم شامل مصرف انرژی جهت بالا آوردن و ایجاد فشار متناسب با نیاز سامانه آبیاری می‌باشد. انرژی غیرمستقیم آبیاری شامل انرژی تجهیزات مورد استفاده در عملیات پمپاژ آب، آبیاری و حفر چاه و به‌طور کلی شامل انرژی مواد خام مصرفی و همچنین ساخت و انتقال کلیه عواملی که در آبیاری دخالت دارند، می‌باشد که با توجه به طول عمر سامانه محاسبه می‌شود (Khan et al., 2009).
 در این مطالعه برای محاسبه میزان الکتریسیته از قبوض برق در یک دوره تولید استفاده شد. همچنین برای محاسبه میزان انرژی غیرمستقیم تمامی تجهیزات و عملیات مختلف در سامانه‌های آبیاری لحاظ گردید. در برخی از روش‌های تولید کاهو، برای کوتاه شدن دوره کشت و کاهش هزینه‌ها و سموم شیمیایی، از نشاء استفاده می‌شود. برای محاسبه محتوای انرژی نشاء، کلیه نهاده‌های مصرفی در تولید نشاء محاسبه گردید تا تخمینی از هم‌ارز انرژی نشاء به دست آید. در جدول ۲ ضرایب مورد نیاز برای تمامی نهاده‌ها آورده شده است. نکته قابل توجه اینکه در برخی مزارع از سوخت فسیلی برای استحصال آب استفاده می‌شود که با توجه به دوره آبیاری میزان سوخت مصرفی لحاظ شد.

جدول ۲. محتوای انرژی نهاده‌ها و ستانده در تولید کاهو

منبع	هم‌ارز انرژی	واحد	نهاده‌ها
(Albright & de Villiers, 2008)	۱۶/۷	کیلوگرم	۱- بذر
(Nabavi-Pelesaraei et al., 2017)	۱/۹۶	ساعت	۲- نیروی انسانی
(Ghasemi-Mobtaker et al., 2020)	۶۲/۷۰	کیلوگرم	۳- ماشین‌ها
(Bakhtiari et al., 2015)	۵۶/۳۱	لیتر	۴- سوخت دیزل
		کیلوگرم	۵- کودهای شیمیایی
(Nabavi-Pelesaraei et al., 2018)	۶۶/۱۴	کیلوگرم	اوره
(Mostashari-Rad et al., 2019)	۱۲/۴۴	کیلوگرم	فسفات
(Bakhtiari et al., 2015)	۱۱/۱۵	کیلوگرم	پتاسیم
			۶- سموم شیمیایی
(Zangeneh et al., 2010)	۱۰۱/۲	کیلوگرم	حشره‌کش
(Zangeneh et al., 2010)	۲۱۶	کیلوگرم	قارچ‌کش
(Ghasemi-Mobtaker et al., 2020)	۱۱/۹۳	کیلووات ساعت	۷- الکتریسیته
(Mohammadi et al., 2010)	۰/۳	تن	۸- کود حیوانی
(Canakci et al., 2005)	۶۰	کیلوگرم	۹- پلاستیک
(Calculated)	۰/۵	عدد	۱۰- نشاء
			ستانده
(Razavinia et al., 2015)	۰/۷	کیلوگرم	کاهو

شاخص‌های انرژی

برای مطالعه جریان انرژی محصول کاهو از شاخص‌های نسبت انرژی، بهره‌وری انرژی، شدت انرژی و افزوده خالص انرژی طبق روابط (۴) تا (۶) استفاده شد (Ghasemi-Mobtaker et al., 2010). همچنین در این مطالعه برای مقایسه سامانه‌ها از نظر کارایی مصرف آب از شاخص بهره‌وری آب طبق رابطه (۷) استفاده شد (Khan et al., 2009).

$$\text{نسبت انرژی} = \frac{\text{انرژی خروجی (مگاژول بر هکتار)}}{\text{انرژی ورودی (مگاژول بر هکتار)}} \quad \text{رابطه ۴}$$

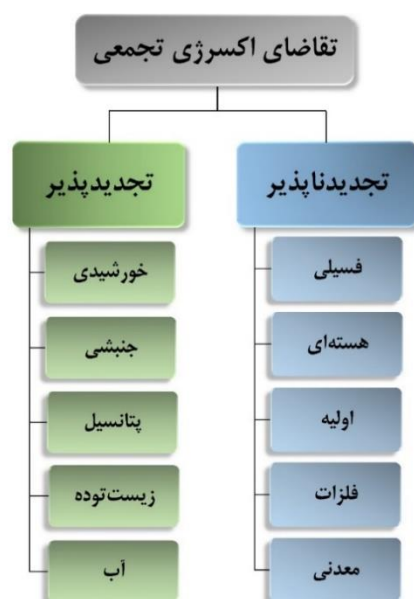
$$\text{رابطه ۵)} \quad \text{عملکرد (کیلوگرم بر هکتار)} = \frac{\text{انرژی ورودی (مگاژول بر هکتار)}}{\text{بهره‌وری انرژی}}$$

$$\text{رابطه ۶)} \quad \text{انرژی ورودی (مگاژول بر هکتار)} - \text{انرژی خروجی (مگاژول بر هکتار)} = \text{افزوده خالص انرژی}$$

$$\text{رابطه ۷)} \quad \text{آب مصرفی (مترمکعب بر هکتار)} = \frac{\text{عملکرد (کیلوگرم بر هکتار)}}{\text{بهره‌وری آب}}$$

تقاضای اکسرژی تجمعی

تقاضای اکسرژی تجمعی (CExD) بیانگر مجموع تمامی منابع مورد نیاز برای تولید یک محصول یا ارائه یک خدمت است که به صورت معادل مگاژول (MJ eq) نمایش داده می‌شود و اکسرژی کل تمام ورودی‌های منابع مورد نیاز برای تولید یک محصول یا خدمات را کمی‌سازی می‌کند (Jafrodi et al., 2022). این رویکرد به عنوان یک چارچوب تحلیلی، مصرف پیش‌بینی شده انرژی در فرآیندهای تولید را به طور مؤثر برجسته کرده و به طور گسترده به عنوان یکی از کارآمدترین روش‌ها برای کاهش تلفات اکسرژی شناخته می‌شود (Fouzi et al., 2025). این شاخص نشان‌دهنده میزان واکنش منابع طبیعی به تمامی شبکه‌های درگیر در فرآیند است (Cheng et al., 2024). یکی از مزیت‌های کلیدی شاخص تقاضای اکسرژی تجمعی، توجه به کیفیت انرژی در کنار کمیت آن هنگام ارزیابی منابع است.



شکل ۲. زیرگروه‌های شاخص تقاضای اکسرژی تجمعی براساس روش CExD V1.07 در نرم‌افزار SimaPro

برخلاف شاخص‌های متداول مانند تقاضای انرژی تجمعی (CED) که تنها بر مقدار انرژی اولیه تمرکز دارند، شاخص تقاضای اکسرژی تجمعی علاوه بر منابع انرژی تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر، منابع غیرانرژی نظیر آب، فلزات و مواد معدنی را نیز در محاسبات خود لحاظ می‌کند. این جامعیت سبب می‌شود این شاخص به عنوان شاخصی فراگیر و کل‌نگر در مقایسه با سایر شاخص‌های انرژی شناخته شود. در این مطالعه، ده دسته از اشکال انرژی اکسرژی تجمعی مورد بررسی قرار گرفتند که در شکل ۲ نشان داده شده است. برای ارزیابی تقاضای اکسرژی تجمعی در این مطالعه، روش CExD V1.07 موجود در نرم‌افزار SimaPro V9.4.0.3 که از داده‌های پایگاه اطلاعاتی مانند Ecoinvent V3 استفاده می‌کند، به منظور تعیین اکسرژی تجمعی منابع تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر روش‌های مختلف تولید کاهو به کار گرفته شد.

یافته‌های پژوهشی

تحلیل انرژی ورودی و خروجی

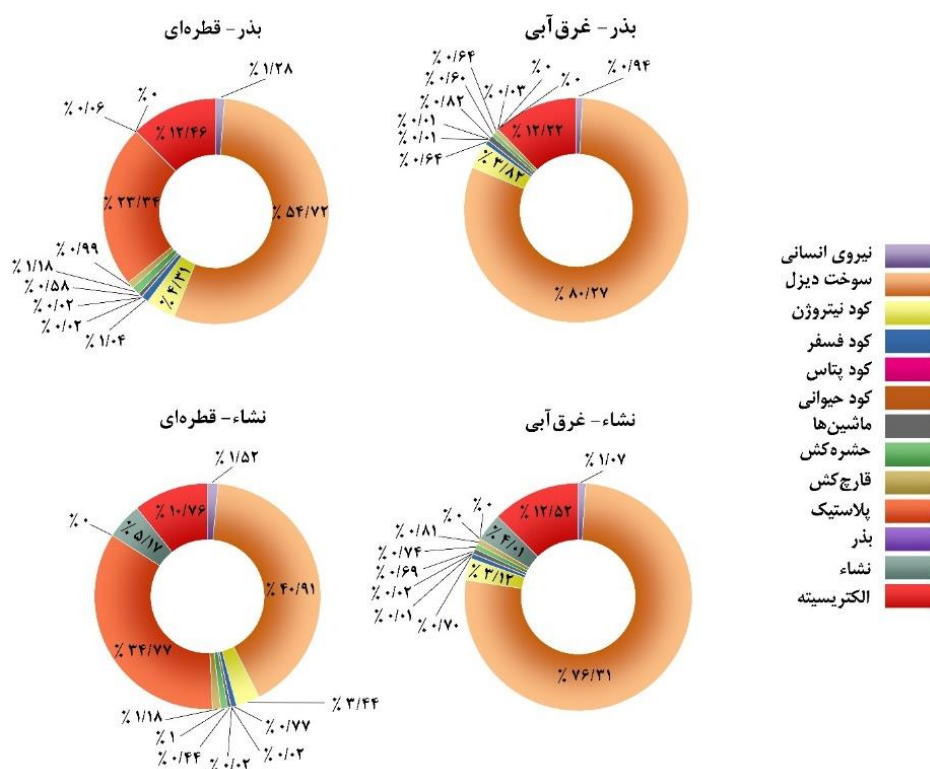
میزان انرژی ورودی و خروجی روش‌های مختلف تولید کاهو در جدول ۳ نشان داده شده است. متوسط انرژی مصرفی در روش‌های مختلف شامل بذر- غرق آبی، بذر- قطره‌ای، نشاء- غرق آبی و نشاء- قطره‌ای به ترتیب برابر با $۱۰۷۴۰۹/۷۹$ ، $۵۴۷۳۴/۰۴$ ، $۸۵۱۳۶/۴۴$ و $۶۵۹۳۱/۵۰$ مگاژول در هکتار محاسبه گردید که از این مقادیر بیش‌ترین انرژی مصرفی مربوط به روش بذر- غرق آبی می‌باشد، که عمده این مصرف انرژی مربوط به انرژی سوخت دیزل با $۸۶۲۱۹/۱۰$ مگاژول بوده است. در حالی که کم‌ترین انرژی ورودی به روش بذر- قطره‌ای با مقدار $۵۴۷۳۴/۰۴$ مگاژول بر هکتار اختصاص دارد. اختلاف انرژی مصرفی بین روش‌های مختلف تولید کاهو عمدتاً ناشی از مصرف بالای سوخت دیزل در آبیاری غرق آبی و همچنین نیاز به نهاده‌ها و عملیات اضافی در تولید و انتقال نشاء برای آبیاری قطره‌ای است. با توجه به استفاده از آب چاه برای آبیاری کاهو و عمق نسبتاً زیاد چاه‌ها (حدود ۱۸۰ متر) در مناطق مورد مطالعه، میزان مصرف سوخت دیزل برای استحصال آب و پمپاژ آن قابل توجه است. علاوه بر این، در روش آبیاری غرق آبی به دلیل تعداد دفعات بالای آبیاری و بازدهی پایین این روش، مصرف سوخت‌های فسیلی به‌طور معناداری بیش‌تر از روش‌های نوین مانند آبیاری قطره‌ای است. بنابراین، کاربرد منابع انرژی تجدیدپذیر نظیر پنل‌های خورشیدی برای استحصال آب و جایگزینی روش‌های نوین آبیاری به‌منظور کاهش مصرف سوخت فسیلی در فرآیند تولید کاهو توصیه می‌شود. نتایج نشان داد که در تولید هر تن کاهو بیش‌ترین میزان مصرفی انرژی در روش‌های بذر- غرق آبی، بذر- قطره‌ای، نشاء- غرق آبی و نشاء- قطره‌ای مربوط به نهاده سوخت دیزل به‌ترتیب با $۸۰/۲۷$ درصد، $۵۴/۷۲$ درصد، $۷۶/۳۱$ درصد و $۴۰/۹۱$ درصد بوده است. در رده بعد سهم از کل انرژی مصرفی، نهاده الکتریسیته با $۱۲/۲۲$ و $۱۲/۵۲$ درصد برای روش‌های غرق آبی و نهاده نایلون با $۲۳/۳۴$ و $۳۴/۷۷$ درصد برای روش‌های قطره‌ای قرار داشتند (شکل ۳).

جدول ۳. مقادیر انرژی مصرفی نهاده‌ها و ستانده در روش‌های مختلف تولید کاهو در استان البرز

انرژی مصرفی در روش‌های مختلف تولید کاهو (مگاژول بر هکتار)				نهاده‌ها
بذر- غرق آبی	بذر- قطره‌ای	نشاء- غرق آبی	نشاء- قطره‌ای	
۳۳/۴۰	۳۳/۴۰	.	.	۱- بذر
۱۰۰۷/۶۴	۶۹۷/۹۶	۹۰۸/۴۶	۱۰۰۱/۱۷	۲- نیروی انسانی
۸۷۷/۱۷	۳۱۶/۶۴	۵۹۰/۶۳	۲۸۹/۶۷	۳- ماشین‌ها
۸۶۲۱۹/۱۰	۳۹۹۵۲/۷۲	۶۴۹۶۵/۴۵	۲۶۹۷۴/۹۷	۴- سوخت دیزل
۴۱۰۰/۶۸	۲۳۶۱/۲۰	۲۶۵۸/۸۳	۲۲۶۸/۶۰	۵- کودهای شیمیایی
۶۸۹/۱۸	۵۶۹/۷۵	۵۹۹/۶۱	۵۰۶/۳۱	نیتروژن
۱۰/۰۴	۱۰/۰۴	۱۲/۲۷	۱۲/۲۷	فسفات
۶۴۷/۶۸	۶۴۷/۶۸	۶۲۷/۴۴	۶۵۷/۸۰	پتاسیم
۶۹۱/۲۰	۵۴۰	۶۹۱/۲۰	۷۷۷/۶۰	۶- سموم شیمیایی
۱۳۱۲۳	۶۸۱۷/۷۱	۱۰۶۵۸/۸۸	۷۰۹۲/۵۸	حشره‌کش
۱۰/۷۱	۱۲/۹۶	۱۳/۱۷	۱۴/۰۴	قارچ‌کش
.	۱۲۷۷۴	.	۲۲۹۲۶	۷- الکتریسیته
.	.	۳۴۱۰/۵۰	۳۴۱۰/۵۰	۸- کود حیوانی
۱۰۷۴۰۹/۷۹	۵۴۷۳۴/۰۴	۸۵۱۳۶/۴۴	۶۵۹۳۱/۵۰	۹- پلاستیک
				۱۰- نشاء
				کل انرژی ورودی
				ستانده
۳۴۵۱۰	۳۷۳۴۰	۴۱۷۲۰	۴۳۲۶۰	کاهو

تحقیقی در استان تهران به‌منظور بررسی شرایط مصرف انرژی در تولید سبزیجات خیار و گوجه‌فرنگی گلخانه‌ای صورت گرفت. کل انرژی ورودی برای این سبزیجات به‌ترتیب برابر $۴۰۵۴۰۵/۷۵$ و $۴۱۲۹۱۱/۹۹$ مگاژول بر هکتار بود. با وجود آن که انرژی ورودی گوجه‌فرنگی کمی بیشتر بود، اما انرژی خروجی آن $۲۲۸۲۸۱/۳۷$ مگاژول بر هکتار بوده است که به‌مراتب بالاتر از انرژی خروجی خیار با

۱۰۴۹۸۲/۹۴ مگاژول بر هکتار می باشد؛ در نتیجه، گوجه فرنگی در بازدهی انرژی عملکرد بهتری نسبت به خیار داشت. بررسی ترکیب منابع انرژی در این تحقیق نشان داد که بیشترین سهم مصرف انرژی در تولید خیار به ترتیب مربوط به سوخت دیزل (۶۰ درصد)، برق (۱۲ درصد)، کود نیتروژن (۱۱ درصد) و نیروی انسانی (۸ درصد) است (Ahmadbeyki et al., 2023). در استان خوزستان تحقیقی تولید سه سبزی شامل خیار، گوجه فرنگی و بادمجان گلخانه ای را از نظر مصرف انرژی مورد بررسی قرار داد. مقادیر انرژی ورودی این محصولات به ترتیب برابر ۴۸۷۰۷۵۹/۹۷، ۴۳۶۷۲۸۰/۱۲ و ۳۸۵۷۳۲۳/۶۱ مگاژول بر هکتار بود که نشان می دهد خیار بیشترین و بادمجان کمترین مصرف انرژی را داشته است. طبق نتایج این تحقیق نهاده های الکتریسیته، کودها و سموم شیمیایی سهم به سزایی را در کل مصرف انرژی این محصولات را به خود اختصاص دادند (Saadi et al., 2025). مقایسه یافته های پژوهش حاضر با نتایج مطالعات مذکور حاکی از مصرف بالای انرژی در تولید گلخانه ای دارد.



شکل ۳. سهم هر یک از نهاده های انرژی در روش های مختلف تولید کاهو

تحلیل شکل های انرژی

در ادامه به منظور درک بهتر نتایج به دست آمده از بخش تحلیل انرژی، انرژی نهاده های مورد استفاده به دو دسته ی مستقیم و غیرمستقیم و همچنین تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر تقسیم بندی می شود. انواع مختلف انرژی و سهم هر کدام از انرژی های مصرفی برای روش های مختلف تولید کاهو در جدول ۴ نشان داده شده است. نتایج نشان می دهد که در تولید کاهو به روش های مختلف بخش اعظم مصرف انرژی مربوط به انرژی مستقیم با حداقل ۹۱/۸۵ درصد برای روش بذر - قطره ای و حداکثر ۹۳/۹۰ درصد برای روش نشاء - غرق آبی بوده است. این مقادیر زیاد انرژی مستقیم در روش های مورد بررسی ناشی از مصرف زیاد انرژی نهاده الکتریسیته و سوخت دیزل در روش های بذر - قطره ای و نشاء - غرق آبی جهت دوره های آبیاری منظم گیاه و مصرف سوخت در ماشین های کشاورزی و راه اندازی پمپ آبیاری بوده است. در دسته بندی انرژی های تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر، انرژی تجدیدناپذیر در همه روش ها بالاتر از انرژی تجدیدپذیر بود. علت اختلاف زیاد این موضوع به ماهیت تجدیدناپذیر بودن سوخت دیزل، نایلون و الکتریسیته برمی گردد. بنابراین برای پایداری بیشتر، پیشنهاد می شود مقدار این موارد با مدیریت درست مزرعه کنترل شود تا ضمن حفظ عملکرد محصول بتوان میزان مصرف انرژی کاهش داده شود. پیشنهاد دیگر می تواند جایگزینی منابع فعلی انرژی الکتریسیته با منابع پایدارتر انرژی مانند سامانه های انرژی تجدیدپذیر مانند پنل های خورشیدی باشد. همچنین استفاده از سوخت های جایگزین تجدیدپذیر به جای منابع تجدیدناپذیر فسیلی (سوخت دیزل) می تواند در کاهش وابستگی به منابع فسیلی و ارتقای پایداری تولید نقش مهمی ایفا کند.

در مجموع، یافته‌ها نشان می‌دهد که ساختار مصرف انرژی در تولید کاهو به شدت تحت تأثیر نهاده‌های انرژی بر مانند سوخت دیزل، الکتریسیته و نایلون است. از دیدگاه علمی، به‌کارگیری رویکردهای مدیریت بهینه انرژی، مانند زمان‌بندی دقیق آبیاری، استفاده از ماشین‌های با راندمان بالاتر و بهره‌گیری از منابع تجدیدپذیر می‌تواند منجر به بهبود بهره‌وری در سامانه‌های تولیدی شود. استفاده از منابع تجدیدپذیر و اتخاذ شیوه‌های کارآمد مدیریت انرژی در کشاورزی، موجب کاهش فشار بر شبکه برق و کاهش هزینه‌های تولید شده و در نهایت امنیت غذایی را تضمین خواهد کرد (Majeed et al., 2023).

جدول ۴. تقسیم‌بندی انواع انرژی در تولید کاهو

نوع انرژی	مقدار محاسبه‌شده (مگاژول بر هکتار)		
	بذر - غرق‌آبی	بذر - قطره‌ای	نشاء - غرق‌آبی
مستقیم	۱۰۰۳۸۳/۱۴	۵۰۲۷۵/۷۸	۷۹۹۴۳/۲۹
غیرمستقیم	۷۰۲۶/۶۵	۴۴۵۸/۲۶	۵۱۹۳/۱۵
تجدیدپذیر	۱۰۵۱/۷۵	۷۴۴/۳۲	۴۳۳۲/۱۳
تجدیدناپذیر	۱۰۶۳۵۸/۰۵	۵۳۹۸۹/۷۳	۸۰۸۰۴/۳۱

در استان مازندران مطالعه‌ای که برای محصول کاهو انجام گرفت، گزارش شد که از کل انرژی مصرفی سهم انرژی‌های مستقیم، غیرمستقیم، تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر به‌ترتیب ۴۹/۴۳ درصد، ۵۰/۵۷ درصد، ۲/۸۹ درصد و ۹۷/۱۱ درصد بوده است. از آن‌جا که مصرف انرژی ورودی رابطه مستقیم با راندمان انرژی دارد، پیشنهاد شد که استانداردهای عملیاتی برای غنی‌سازی خاک و کاهش مصرف کودهای شیمیایی تعریف شوند تا دستیابی به کشاورزی پایدار امکان‌پذیر شود (Razavinia et al., 2015). موسوی و همکاران در مطالعه‌ای برای محصول کاهو در استان البرز که برای بررسی ترکیب انرژی نهاده‌ها صورت گرفت، نشان دادند که سهم انرژی مستقیم در تولید کاهو ۵۵/۷۸ درصد و انرژی غیرمستقیم ۴۴/۲۲ درصد برآورد شده است. همچنین، بیش از ۹۹ درصد انرژی مصرفی تجدیدناپذیر بوده و سهم منابع انرژی تجدیدپذیر بسیار ناچیز (کمتر از ۱ درصد) بوده است. عمده این مصارف انرژی در انرژی‌های مستقیم و تجدیدناپذیر مربوط به انرژی‌های سوخت دیزل، کودهای شیمیایی و الکتریسیته بوده است، بنابراین استفاده از کود دامی و کود سبز به‌جای کود شیمیایی و به‌کارگیری ماشین‌های جدید پیشنهاد شد تا بتواند عملکرد انرژی را بهبود دهد (Mousavi et al., 2022).

تحلیل شاخص‌های انرژی

انواع مختلف شاخص‌های انرژی و مقادیر هر یک از آن‌ها در جدول ۵ نشان داده شده است. نتایج نشان داد، بالاترین مقدار این شاخص مربوط به روش بذر - قطره‌ای با مقدار ۰/۶۸ و سپس روش نشاء - قطره‌ای با ۰/۶۶ است که بیانگر کارایی نسبتاً بهتر این روش‌ها در استفاده از انرژی می‌باشد. روش نشاء - غرق‌آبی با مقدار ۰/۴۹ در رتبه بعدی قرار دارد. در مقابل، روش بذر - غرق‌آبی با مقدار ۰/۳۲ پایین‌ترین نسبت انرژی را داشته و نشان می‌دهد که این روش کم‌ترین بازدهی در تبدیل انرژی ورودی به محصول را دارد. به‌طور کلی، همه مقادیر کمتر از یک بوده و نشان‌دهنده آن است که تولید کاهو در تمامی روش‌ها از منظر انرژی، انرژی‌بر است. طبق بررسی‌های انجام شده برای مقایسه این شاخص برای برخی سبزیجات، در پژوهشی در استان آنتالیا کشور ترکیه نسبت انرژی برای چهار محصول گوجه‌فرنگی، فلفل، خیار و بادمجان کمتر از یک و به‌ترتیب برابر با ۰/۳۲، ۰/۱۹، ۰/۳۱ و ۰/۲۳ به‌دست آمد (Canakci & Akinci, 2006). در پژوهشی توسط لطفیان دهکردی و فارسی در استان اصفهان نسبت انرژی برای تولید محصول اسفناج ۱/۰۲ گزارش شد (Lotfalian Dehkordi & Farsi, 2022). طی پژوهش‌هایی در استان‌های ایلام و البرز نیز شاخص نسبت انرژی برای تولید خیار و توت‌فرنگی برابر با ۰/۴۳ و ۰/۱۶ گزارش شد (Rashidi et al., 2024; Hosseini-Fashami et al., 2019).

شاخص بهره‌وری انرژی نیز تفاوت معناداری در میان روش‌های مختلف داشت. بیش‌ترین بهره‌وری انرژی مربوط به روش بذر - قطره‌ای با مقدار ۰/۹۷ و سپس نشاء - قطره‌ای با ۰/۹۴ است. پس از آن روش نشاء - غرق‌آبی با ۰/۷۰ قرار دارد. کم‌ترین مقدار این شاخص مربوط به بذر - غرق‌آبی با ۰/۴۶ است. این نتایج نشان می‌دهد که سامانه‌های قطره‌ای (چه بذر و چه نشاء) از نظر بهره‌وری انرژی عملکرد مطلوب‌تری دارند. در مطالعه‌ای در شهرستان گتوند استان خوزستان مقدار شاخص بهره‌وری انرژی محصول خیار ۲/۱۲ کیلوگرم بر مگاژول گزارش شد (Eskandari & Mosavian, 2023).

همان‌گونه که در جدول ۵ نشان داده شده است، همه روش‌ها دارای مقادیر منفی شاخص افزوده خالص انرژی هستند که بیانگر افت انرژی در تولید کاهو می‌باشد. بیش‌ترین افت مربوط به روش بذر - غرق‌آبی با مقدار ۷۲۸۹۹/۷۹ - مگاژول بر هکتار است که نشان‌دهنده

ناکارآمدی شدید انرژی در این روش است. پس از آن، روش نشاء- غرق آبی با $43416/44$ - مگاژول بر هکتار در رتبه دوم قرار دارد. در مقایسه، روش نشاء- قطره ای با $22671/50$ - مگاژول بر هکتار و روش بذر- قطره ای با $17494/04$ - مگاژول بر هکتار افت کمتری داشته اند، اما همچنان مقادیر منفی آن ها نشان می دهد که مصرف انرژی از انرژی تولیدی بیش تر است. بنابراین، از نظر مقایسه ای، روش بذر- غرق آبی ضعیف ترین عملکرد را داشته، روش نشاء- غرق آبی در رتبه بعد قرار گرفته و دو روش قطره ای گرچه افت کمتری دارند، اما باز هم از دیدگاه کارایی انرژی ناکارآمد محسوب می شوند. نتایج یک مطالعه نشان داد در کشور چین مقدار شاخص افزوده خالص انرژی برای گشنیر برابر با $3796/90$ - مگاژول بر هکتار بود (Painkra et al., 2025).

جدول ۵. شاخص های انرژی در تولید کاهو

شاخص انرژی	واحد	مقدار محاسبه شده			
		بذر- غرق آبی	بذر- قطره ای	نشاء- غرق آبی	نشاء- قطره ای
نسبت انرژی	بدون واحد	۰/۳۲	۰/۶۸	۰/۴۹	۰/۶۶
بهره وری انرژی	کیلوگرم بر مگاژول	۰/۴۶	۰/۹۷	۰/۷۰	۰/۹۴
شدت انرژی	مگاژول بر کیلوگرم	۲/۱۷	۱/۰۳	۱/۴۳	۱/۰۶
افزوده خالص انرژی	مگاژول بر هکتار	-۷۲۸۹۹/۷۹	-۱۷۴۹۴/۰۴	-۴۳۴۱۶/۴۴	-۲۲۶۷۱/۵۰
بهره وری آب	کیلوگرم بر مترمکعب	۴/۳۷	۱۵/۱۴	۵/۳۵	۱۸/۷۵

شاخص بهره وری آب که بر حسب کیلوگرم محصول به ازای هر مترمکعب آب مصرفی بیان می شود، معیاری کلیدی برای سنجش بهره وری منابع آبی در تولید محصولات کشاورزی به ویژه در شرایط کم آبی محسوب می شود (Heydari, 2024). طبق جدول ۵ برای تولید کاهو، بیش ترین مقدار بهره وری آب مربوط به روش نشاء- قطره ای با مقدار $18/75$ کیلوگرم بر مترمکعب است که نشان دهنده بهره وری بسیار بالای آب در این روش می باشد. این امر بیانگر بهره وری بالای آب در روش نشاءکاری- قطره ای است. بنابراین، این ترکیب از نظر مدیریت منابع آبی یک گزینه بهینه محسوب می شود. در مقابل، کم ترین مقدار بهره وری آب مربوط به روش بذر- غرق آبی با مقدار $4/37$ کیلوگرم بر مترمکعب است. این نشان می دهد که هدررفت آب در این روش زیاد بوده و بازدهی محصول نسبت به میزان آب مصرفی، بسیار پایین است. همچنین روش بذر- قطره ای با بهره وری آب برابر با $13/97$ عملکرد مناسبی دارد. در مقایسه دو روش آبیاری قطره ای، شاخص بهره وری آب در روش بذر- قطره ای پایین تر بود که دلیل این موضوع دوره رشد طولانی تر این روش در مقایسه با روش نشاء- قطره ای است. به طور کلی، از نظر بهره وری مصرف آب، روش نشاء- قطره ای به عنوان بهترین و روش بذر- غرق آبی به عنوان ضعیف ترین گزینه در تولید کاهو شناخته می شوند.

برای محصول کنگر فرنگی در کشور ایتالیا مقدار شاخص بهره وری آب برابر $10/79$ کیلوگرم به ازای هر مترمکعب آب مصرفی به دست آمد (D'Antonio et al., 2025). برای محصول سیب در کشور چین نیز مقدار این شاخص برابر $13/49$ کیلوگرم بر مترمکعب گزارش شد (Wen et al., 2024). در استان اصفهان طی پژوهشی مقدار شاخص بهره وری مصرف آب برای روش های مختلف تولید محصول جو شامل آبیاری غرق آبی، قطره ای و بارانی) محاسبه شد. بالاترین بهره وری مصرف آب مربوط به سامانه آبیاری قطره ای با مقدار $1/79$ کیلوگرم در هر مترمکعب گزارش شد و آبیاری بارانی با مقدار $1/70$ کیلوگرم بر مترمکعب در جایگاه دوم قرار گرفته و روش غرق آبی با کم ترین کارایی مصرف آب یعنی $1/20$ کیلوگرم بر مترمکعب، نشان دهنده مصرف بالای آب و بهره وری پایین تر در مقایسه با روش های نوین آبیاری بود (Kaab et al., 2024).

نتایج تحلیل تقاضای اکسرژی جمعی

نتایج جدول ۶ و شکل ۴ بیانگر این است که در فرآیند تولید یک تن کاهو، بیش ترین سهم از شاخص تقاضای اکسرژی جمعی مربوط به منابع تجدیدناپذیر فسیلی است. این بخش در تمامی روش های کشت مذکور بیش ترین مقدار را به خود اختصاص داده است، به طوری که بیش ترین مقدار آن در روش بذر- غرق آبی با $3438/51$ مگاژول بود. این نتایج بیانگر وابستگی شدید سامانه های تولید کاهو به مصرف سوخت های فسیلی بوده و نشان می دهد که عمده انرژی ورودی مزارع از این منبع تأمین می شود. مطالعات مشابه با روش تقاضای اکسرژی جمعی در محصولات دیگر نیز همین الگو را تأیید می کنند. به عنوان مثال، نتایج حاصل از بررسی محصولات خیار و گوجه فرنگی نشان داد که تمامی اشکال انرژی های تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر در خیار بالاتر از گوجه فرنگی بوده و در هر دو محصول، انرژی تجدیدناپذیر فسیلی بیش ترین سهم را داشته است ($28028/88$ مگاژول در هر تن خیار و $1301/14$ مگاژول در هر تن گوجه). همچنین انرژی زیست توده

و آب در رتبه‌های بعدی قرار داشته و انرژی تجدیدناپذیر اولیه کم‌ترین مقدار را نشان داده است (Ahmadbeyki et al., 2023). مطابق با یافته‌های (Nucci et al., 2014)، راهکارهایی مانند کاهش استفاده و به‌کارگیری جایگزین‌های زیست‌سازگار برای نایلون می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی بازده انرژی و اکسرژی را بهبود بخشد. در حالی که این پیشنهادات می‌توانند اثرات مثبتی بر کاهش مصرف منابع تجدیدناپذیر داشته باشند، اما باید توجه داشت که جایگزینی پلاستیک‌ها با مواد زیست‌سازگار ممکن است با چالش‌هایی مانند هزینه‌های بالاتر تولید، محدودیت‌های عملکردی و نیاز به تغییرات زیرساختی در سطح وسیع روبه‌رو شود (Chen et al., 2024; Raphael et al., 2025). علاوه بر این، این تغییرات تنها یکی از بخش‌های زنجیره تأمین کشاورزی را هدف قرار می‌دهند، در حالی که سایر نهاده‌های انرژی‌بر مانند سوخت دیزل و کودهای شیمیایی نیز نقش قابل‌توجهی در بار محیط‌زیستی و تقاضای اکسرژی دارند. بنابراین، برای دستیابی به پایداری واقعی در کشاورزی، علاوه بر کاهش مصرف پلاستیک، باید به بهینه‌سازی مصرف دیگر منابع انرژی‌بر و جایگزینی آن‌ها با منابع تجدیدپذیر نیز توجه شود.

مطالعات نشان داده‌اند که کشاورزی در میدان‌های باز بخش قابل‌توجهی از انرژی را مصرف می‌کند که بیشتر این انرژی از منابع فسیلی تأمین می‌شود. تولید کودها بزرگترین مصرف‌کننده انرژی در کشاورزی است و بخش عمده‌ای از انرژی ورودی را تشکیل می‌دهند. این یافته‌ها بر لزوم استفاده از فن‌آوری‌های انرژی تجدیدپذیر و کاهش وابستگی به منابع فسیلی در کشاورزی تأکید دارند (Paris et al., 2021; Rokicki et al., 2022). در مطالعه‌ای دیگر مقدار انرژی تجدیدناپذیر فسیلی برای تولید هر تن سیب‌زمینی حدود ۸۱۲/۱۶ مگاژول گزارش شد که عمدتاً ناشی از مصرف کود نیتروژن و سوخت دیزل بوده است. در این مطالعه پیشنهاد شد که تمرکز بر کاهش مصرف نیتروژن و بهینه‌سازی مصرف دیزل می‌تواند راهبرد مؤثری برای ارتقای پایداری تولید سیب‌زمینی باشد (Hessampouret al., 2023). مطالعه‌ای که بر روی محصول برنج صورت گرفت، نشان داد که این محصول وابستگی زیادی به منابع تجدیدناپذیر فسیلی دارد که مقدار آن ۲۳۱۰/۴۰ مگاژول بود. بخش عمده این بار انرژی (حدود ۹۰ درصد) مربوط به نایلون بود که به‌دلیل فرایندهای پس‌زمینه تولید آن بار محیط‌زیستی بالایی داشت (Nabavi-Pelesaraei et al., 2019).

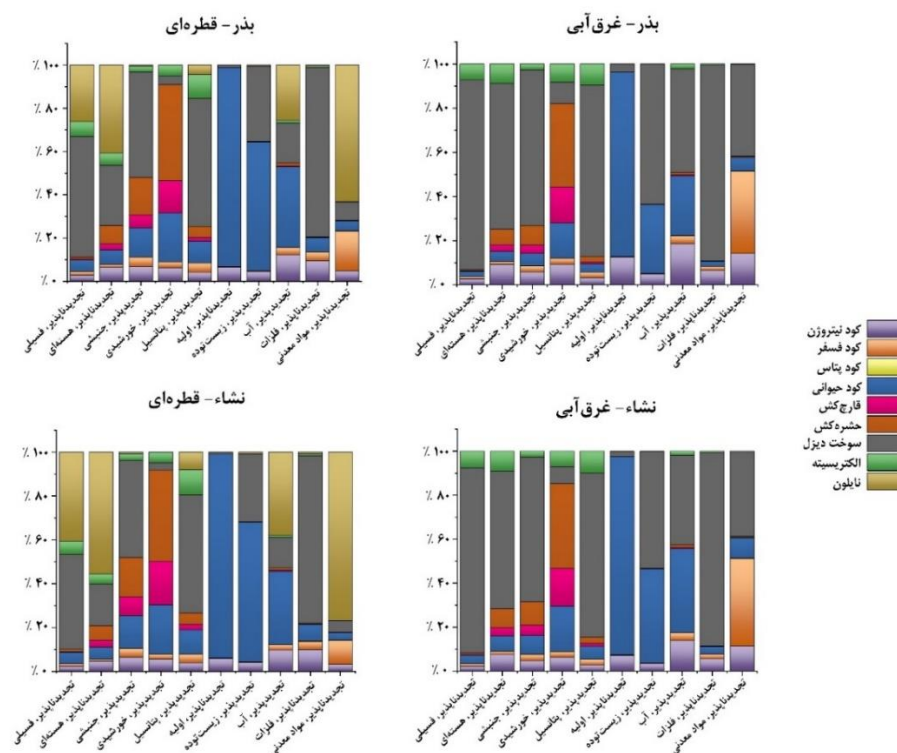
در میان منابع تجدیدپذیر، سهم زیست‌توده و انرژی آب در مقایسه با سایر انواع انرژی برجسته‌تر است. به‌ویژه در روش بذر - غرق‌آبی، انرژی زیست‌توده به حدود ۳۹۶ مگاژول و انرژی آبی به بیش از ۶۶ مگاژول افزایش یافته است. این امر نشان‌دهنده نقش مصرف قابل‌توجه سوخت دیزل، نهاده‌های آلی (کود حیوانی) و مصرف آب در الگوی انرژی مزارع کاهو است. در مقابل، سهم انرژی تجدیدپذیر به‌شکل خورشیدی و جنبشی در تمامی روش‌ها بسیار اندک بود است. به‌طور خاص، سهم انرژی خورشیدی در روش‌های مختلف تولید کاهو بین ۰/۷۶ (نشاء - قطره‌ای) تا ۱/۰۴ (بذر - غرق‌آبی) مگاژول و سهم انرژی جنبشی بین ۳/۸۴ تا ۹/۶۶ مگاژول گزارش شد. در یک مطالعه، روش تقاضای اکسرژی تجمعی برای بررسی پایداری تولید گوجه‌فرنگی در ترکیه به‌کار گرفته شد. یافته‌های این مطالعه بیانگر آن بود که مصرف آب سهم بالایی از بار اکسرژی را به خود اختصاص داده که بخش عمده آن با استفاده از سوخت‌های فسیلی برای پمپاژ آب تأمین می‌شد. همچنین کودهای شیمیایی و سوخت دیزل بیش‌ترین سهم را در مصرف کل انرژی داشتند. با این حال، در تحلیل مبتنی بر اکسرژی، سهم نسبی این نهاده‌ها کاهش یافت و در مقابل، سهم آب آبیاری و برق در مصرف کل انرژی افزایش نشان داد (Yildizhan & Taki, 2018). به‌دلیل نگرانی‌های محیط‌زیستی فزاینده ناشی از این کاربرد منابع انرژی تجدیدناپذیر، نیاز به بررسی و توسعه منابع انرژی جایگزین برای تأمین توان پمپ‌های آب در سامانه‌های آبیاری به‌شدت احساس می‌شود. در این راستا، منابع انرژی تجدیدپذیر به‌عنوان راه‌حلی برای کارآمد برای جایگزینی سوخت‌های فسیلی مطرح شده‌اند. در میان این گزینه‌ها، انرژی خورشیدی به دلیل مزایای فراوان خود، به‌ویژه در کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و کاهش گازهای گلخانه‌ای، به‌عنوان یک گزینه امیدبخش در نظر گرفته می‌شود (Aliyu et al., 2018). از این رو، ادغام سامانه‌های آبیاری هوشمند و فن‌آوری‌های انرژی تجدیدپذیر می‌تواند راهی مؤثر برای حفظ منابع آبی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای باشد (Abdelhamid et al., 2025).

نتایج شکل ۴ نشان می‌دهد که در تمامی روش‌ها، نهاده‌هایی مانند سوخت دیزل، حشره‌کش، کود نیتروژن و نایلون بیش‌ترین سهم را در ایجاد شاخص‌های اکسرژی تجمعی داشته‌اند. در روش‌های آبیاری قطره‌ای سهم نهاده‌های شیمیایی و فسیلی بیش‌تر بوده است. نتایج نشان می‌دهد که سامانه‌های قطره‌ای موجب افزایش راندمان مصرف آب می‌شوند و همچنین از دیدگاه اکسرژی تجمعی، بار کم‌تری بر منابع تجدیدناپذیر تحمیل می‌کنند. در مقابل، در سامانه‌های غرق‌آبی مصرف آب بالاتر است و شدت وابستگی به نهاده‌های شیمیایی و فسیلی در مقایسه با قطره‌ای بیش‌تر مشاهده شد. مقایسه بین دو روش کشت بذر و نشاء نیز حاکی از آن است که در کشت نشایی، سهم نهاده‌هایی نظیر برق، تجهیزات و کودهای شیمیایی افزایش یافته است. دلیل این امر فرایندهای اضافی در آماده‌سازی نشاء و مصرف انرژی

بیش تر در مراحل اولیه کشت است. به عبارت دیگر، اگرچه کشت نشایی می تواند مصرف انرژی اولیه بالایی در آماده سازی نشاء داشته باشد اما منجر به افزایش یکنواختی و بهبود کیفیت مزرعه می شود و از منظر اکسرژی، بار کمتری بر منابع تجدیدناپذیر وارد می کند. سایر مطالعات در زمینه تحلیل اکسرژی در تولید محصولات باغی و سبزیجات نشان داده اند که بخش کشاورزی پرمصرف ترین مرحله در کل چرخه تولید سبزیجات است و در این میان، سوخت دیزل به عنوان نهاده اصلی در این تحلیل شناخته شده و پس از آن، کودهای شیمیایی بیش ترین نقش را کیفیت کل انرژی سامانه های تولیدی را دارند. در این مطالعات، استفاده از سوخت های تجدیدپذیر و کاهش مصرف بی رویه کودهای شیمیایی می تواند تقاضای اکسرژی جمعی را به طور چشمگیری کاهش دهد (Mostashari-Rad et al., 2021; Nadi & Campbell, 2023; Ordikhani et al., 2021).

جدول ۶. سهم هر یک از زیرگروه های (انواع انرژی) شاخص تقاضای اکسرژی جمعی روش های مختلف تولید یک تن کاهو

مقدار محاسبه شده (مگاژول)	بذر - غرق آبی	بذر - قطره ای	نشاء - غرق آبی	نشاء - قطره ای	شکل انرژی
تجدیدپذیر، خورشیدی	۱/۰۴	۰/۸۲	۰/۸۲	۰/۷۶	
تجدیدپذیر، جنبشی	۹/۶۶	۴/۵۱	۶/۴۵	۳/۸۴	
تجدیدپذیر، پتانسیل	۶۱/۷۴	۲۶/۰۶	۴۰/۰۴	۲۲/۲۴	
تجدیدپذیر، زیست توده	۳۹۶/۲۰	۲۳۲/۵۷	۲۹۴/۲۲	۲۰۳/۶۹	
تجدیدپذیر، آب	۶۶/۳۸	۵۴/۰۴	۴۷/۸۹	۵۶/۲۸	
تجدیدناپذیر، فسیلی	۳۴۳۸/۵۱	۱۷۰۹/۰۸	۲۱۸۸/۷۰	۱۷۰۴/۳۱	
تجدیدناپذیر، هسته ای	۱۰۳/۴۴	۷۸/۹۵	۶۷/۹۸	۸۹/۳۰	
تجدیدناپذیر، فلزات	۴۳/۹۵	۱۶/۰۳	۲۷/۶۳	۱۲/۷۵	
تجدیدناپذیر، اولیه	۵/۵۷	۵/۶۷	۵/۲۴	۵/۲۳	
تجدیدناپذیر، مواد معدنی	۲۶/۱۹	۴۰/۶۴	۱۷/۶۲	۵۱/۶۳	



شکل ۴. سهم تأثیر هر ورودی در ایجاد شاخص های تقاضای اکسرژی جمعی روش های مختلف تولید یک تن کاهو

در حالت کلی، نتایج تحلیل تقاضای اکسرژی جمعی نشان داد که سوخت دیزل، کودهای شیمیایی (به ویژه نیتروژن و فسفر)، الکتریسیته و نایلون مهم ترین نهاده های اثرگذار بر بار اکسرژی در روش هلی مختلف تولید کاهو هستند. این نهاده ها عمدتاً در گروه منابع تجدیدناپذیر فسیلی قرار گرفته و سهم غالبی از شاخص تقاضای اکسرژی جمعی را به خود اختصاص دادند. بنابراین کاهش مصرف دیزل،

استفاده از ماشین‌های با راندمان بالاتر، مدیریت و بهینه‌سازی مصرف کودها، استفاده از منابع تجدیدپذیر برای الکتریسیته و جایگزینی نایلون با موارد مشابه زیست‌تخریب‌پذیر می‌تواند بیش‌ترین اثر را در کاهش بار اکسرژی و ارتقای پایداری سامانه‌های تولید کاهو داشته باشد.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

پژوهش حاضر در پاسخ به نگرانی‌های فزاینده درباره سلامت و انتشار کربن، به بررسی کارایی مصرف انرژی و تقاضای اکسرژی تجمعی در روش‌های مختلف تولید کاهو در استان البرز پرداخت. نتایج نشان داد که کل انرژی ورودی سامانه‌های تولید کاهو در استان البرز بین ۵۴۷۳۴/۰۴ مگاژول بر هکتار در روش بذر-قطره‌ای تا ۱۰۷۴۰۹/۷۹ مگاژول بر هکتار در روش بذر-غرق‌آبی متغیر بود. بیش‌ترین سهم انرژی مصرفی در تمامی روش‌های تولید مربوط به سوخت دیزل مشاهده شد. همچنین، در تفکیک انرژی مستقیم، غیرمستقیم، تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر، سهم انرژی‌های مستقیم و تجدیدناپذیر در همه روش‌ها غالب بود که مربوط به نهاده‌های سوخت دیزل، نایلون و الکتریسیته بود. بالاترین مقدار شاخص نسبت انرژی مربوط به روش بذر-قطره‌ای با مقدار ۰/۶۸ مشاهده شد، هر چند این شاخص در تمامی روش‌ها کوچکتر از یک بود. از منظر شاخص بهره‌وری آب، بیش‌ترین مقدار به روش نشاء-قطره‌ای با ۱۸/۷۵ کیلوگرم بر مترمکعب و کم‌ترین مقدار به روش بذر-غرق‌آبی با ۴/۳۷ کیلوگرم بر مترمکعب تعلق گرفت. این الگو نشان می‌دهد که در سامانه‌های قطره‌ای بهبود کارایی آب همزمان با افزایش کارایی انرژی رخ داده است.

در تحلیل تقاضای اکسرژی تجمعی، سهم منابع تجدیدناپذیر فسیلی در همه روش‌ها غالب بود و در روش‌های بذر-غرق‌آبی و نشاء-غرق‌آبی به ترتیب به ۳۴۳۸/۵۱ و ۲۱۸۸/۷۰ مگاژول رسید. نهاده‌هایی مانند دیزل و نایلون نقش اصلی را در این وابستگی داشتند و بیانگر نقش تعیین‌کننده نهاده‌های انرژی‌بر در افزایش بار اکسرژی و کاهش پایداری سامانه‌های تولیدی کاهو هستند. در میان منابع تجدیدپذیر نیز سهم زیست‌توده و انرژی آب نسبت به سایر اشکال بیشتر بود، اما در مجموع اثر آن‌ها نسبت به بار فسیلی محدودتر باقی ماند. برای کاهش مصرف انرژی و بار اکسرژی تجمعی و همچنین حرکت به سوی تولید پایدارتر کاهو، ضروری است که بهینه‌سازی مصرف نهاده‌های پرانرژی و پرانشار (همچون سوخت دیزل و کودهای شیمیایی) در اولویت قرار گیرد. علاوه بر این، پیشنهاد می‌شود که کودهای شیمیایی با منابع آلی جایگزین شده، از سوخت‌ها و برق تجدیدپذیر در عملیات مزرعه استفاده گردد و نایلون با مواد زیست‌تخریب‌پذیر جایگزین شود. همچنین، آموزش کشاورزان در خصوص الگوهای مدیریتی کارآمد و کم‌آلاینده از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این اقدامات، که به‌طور مستقیم بر نهاده‌های اثرگذار مانند دیزل، الکتریسیته و نایلون تمرکز دارند، می‌توانند با حفظ عملکرد محصولات، انرژی ورودی و وابستگی به منابع فسیلی را به‌طور قابل‌توجهی کاهش دهند. با اتخاذ چنین رویکردهایی، نه تنها کارایی انرژی و منابع بهبود می‌یابد، بلکه می‌توان گام‌های مؤثری در راستای کاهش اثرات منفی محیط‌زیستی کشاورزی برداشت. این اقدامات می‌توانند به پایداری بیشتر سامانه‌های تولیدی کاهو و بهبود سلامت محیط‌زیست کمک کنند.

منابع

حسینی، طیب؛ شریفیان، حسین؛ کیانی، علیرضا؛ آبیاری، نورمحمد و فیض‌بخش، محمدتقی. (۱۴۰۰). جریان انرژی و پتانسیل گرمایش جهانی در روش کشت نشایی و خشکه‌کاری برنج در سامانه‌های مختلف آبیاری. *نشریه پژوهش آب در کشاورزی*، ۳۵(۴)، ۳۳۷-۳۵۶.

حیدری سلطان‌آبادی، محسن. (۱۳۹۴). بررسی و تعیین انرژی مصرفی در دو روش تولید پیاز خوراکی. *نشریه انرژی ایران*، ۱۸(۱)، ۱۷-۲۸.

راهی، سحر؛ مبلی، حسین؛ جمشیدی، بهاره؛ عزیزی، اصلا و شریفی، محمد. (۱۳۹۹). فناوری تصویربرداری ابرطیفی فروسرخ نزدیک برای شناسایی آلودگی میکروبی: مطالعه موردی اشریشیاکلی در کاهو. *مهندسی بیوسیستم ایران*، ۵۱(۳)، ۵۹۹-۶۱۰.

محبی، عبدالحمید و موسوی، سید حسن. (۱۳۹۹). مدیریت تغذیه در تولید ارقام تجاری کاهو. *نشر آموزش کشاورزی*.

REFERENCES

- Abdelhamid, M. A., Baraka, S. M., Ali, K. A. M., Zhang, Z., & Hendy, Z. M. (2025). Energy and Life Cycle Assessment of Potato Production under Groundwater and Surface Water Irrigation Systems in Egypt: A Pathway to Sustainable Agriculture. *Potato Research*, 68(3), 3447-3473.
- Ahmadbeyki, A., Ghahderijani, M., Borghae, A., & Bakhoda, H. (2023). Energy use and environmental impacts analysis of greenhouse crops production using life cycle assessment approach: A case study of cucumber and tomato from Tehran province, Iran. *Energy Reports*, 9, 988-999.

- Albright, L. D., & de Villiers, D. S. (2008). Energy investments and CO2 emissions for fresh produce imported into New York State compared to the same crops grown locally. *Final Report prepared for the New York State Energy Research and Development Authority, Cornell University, Ithaca, (NY), USA*.
- Ali, M., Koh, L., Acquaye, A., Leake, J., Nickles, J., Evans, T. P., Roberts, G., & Kemp, D. (2024). Sustainability assessment of peri-urban organic horticulture — A case study in the United Kingdom. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 29(3), 456–468.
- Aliyu, M., Hassan, G., Said, S. A., Siddiqui, M. U., Alawami, A. T., & Elamin, I. M. (2018). A review of solar-powered water pumping systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 87, 61–76.
- Bakhtiari, A. A., Hematian, A., & Sharifi, A. (2015). Energy analyses and greenhouse gas emissions assessment for saffron production cycle. *Environmental Science and Pollution Research*, 22, 16184–16201.
- Canakci, M., Topakci, M., Akinci, I., & Ozmerzi, A. (2005). Energy use pattern of some field crops and vegetable production: case study for Antalya region, Turkey. *Energy Conversion & Management*, 46, 655–666.
- Chen, G., Li, J., Sun, Y., Wang, Z., Leeke, G. A., Moretti, C., Cheng, Z., Wang, Y., Li, N., Mu, L., Li, J., Tao, J., Yan, B., & Hou, L. (2024). Replacing Traditional Plastics with Biodegradable Plastics: Impact on Carbon Emissions. *Engineering*, 32, 152–162.
- Chen, X., Thorp, K. R., Ouyang, Z., Hou, Y., Zhou, B., & Li, Y. (2019). Energy consumption due to groundwater pumping for irrigation in the North China Plain. *Science of The Total Environment*, 669, 1033–1042.
- Cheng, H., Zhou, X., Yang, Y., Xu, L., Ding, Y., Yan, T., & Li, Q. (2024). Environmental damages, cumulative exergy demand, and economic assessment of *Panus giganteus* farming with the application of solar technology. *Science of The Total Environment*, 907, 168020.
- D'Antonio, P., Canaj, K., Cantore, V., Boari, F., Mehmeti, A. and Calabrese, N. (2025). Energy balance, water use indices, and GHG footprint of artichoke cultivars grown in different regions of Italy. *XI International Symposium on Artichoke, Cardoon and Their Wild Relatives 1424*, 155-162.
- Eskandari, H., & Mosavian, S. N. (2023). Energy analysis for two production systems of cucumber. *Iranica Journal of Energy & Environment*, 14(2), 96-101.
- Foteinis, S., & Chatzisyseon, E. (2016). Life cycle assessment of organic versus conventional agriculture. A case study of lettuce cultivation in Greece. *Journal of Cleaner Production*, 112, 2462–2471.
- Fouzi, M. H. A., Namjoo, A., & Kohestani, A. (2025). Analysis of energy scenarios and cumulative exergy demand of CDQ steam power plant based on life cycle perspective. *Energy*, 318, 134793.
- Ghasemi-Mobtaker, H., Keyhani, A., Mohammadi, A., Rafiee, S., & Akram, A. (2010). Sensitivity analysis of energy inputs for barley production in Hamedan Province of Iran. *Agriculture Ecosystems Environment*, 137, 367–372.
- Ghasemi-Mobtaker, H., Mostashari-Rad, F., Saber, Z., Chau, K. W., & Nabavi-Pelesaraei, A. (2020). Application of photovoltaic system to modify energy use, environmental damages and cumulative exergy demand of two irrigation systems-A case study: Barly production of Iran. *Renewable Energy*, 160, 1316–1334.
- Hatim, M., Majidian, M., Tahmasebi, M., & Nabavi-Pelesaraei, A. (2023). Life cycle assessment, life cycle cost, and exergoeconomic analysis of different tillage systems in safflower production by micronutrients. *Soil and Tillage Research*, 233, 105795.
- Hessampour, R., Bastani, A., Hassani, M., Failla, S., Vaverková, M. D., & Halog, A. (2023). Joint life cycle assessment and data envelopment analysis for the benchmarking of energy, exergy, environmental effects, and water footprint in the canned apple supply chain. *Energy*, 278, 127795.
- Hesampour, R., Hassani, M., Yildizhan, H., Failla, S., & Gorjian, S. (2022). Exergoenvironmental damages assessment in a desert-based agricultural system: A case study of date production. *Agronomy Journal*, 114(6), 3155–3172.
- Heydari, N. (2024). Hidden issues and challenges of the concept and use of water productivity index. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 54(12), 1995-2015.
- Heydari-Soltan Abadi, M. (2015). An Investigation and Determination of Energy Consumption for Two Methods of Onion Cropping. *Iranian Journal of Energy* 18, 17–28. (In Persian).
- Hosseini, S. T., Sharifan, H., Kiani, Abyar, N., & Feyzbakhsh, M. T. (2022). Energy Flow and Global Warming Potential in Direct Seeded and Transplantation of Rice under Different Irrigation Systems. *Journal of Water Research in Agriculture*, 35(4), 337-356. doi: 10.22092/jwra.2021.355385.885. (In Persian).
- Hosseini-Fashami, F., Motevali, A., Nabavi-Pelesaraei, A., Hashemi, S. J., & Chau, K. W. (2019). Energy-

- Life cycle assessment on applying solar technologies for greenhouse strawberry production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 116, 109411.
- Jafrodi, H. M., Parashkoohi, M. G., Afshari, H., & Zamani, D. M. (2022). Comparative life cycle cost-energy and cumulative exergy demand of paddy production under different cultivation scenarios: A case study. *Ecological Indicators*, 144, 109507.
- Kaab, A., Khanali, M., Shadamanfar, S., & Jalalvand, M. (2024). Assessment of energy audit and environmental impacts throughout the life cycle of barley production under different irrigation systems. *Environmental and Sustainability Indicators*, 22, 100357.
- Kaab, A., Sharifi, M., Mobli, H., Nabavi-Pelesaraei, A., & Chau, K. W. (2019). Use of optimization techniques for energy use efficiency and environmental life cycle assessment modification in sugarcane production. *Energy*, 181, 1298–1320.
- Khan, S., Khan, M. A., Hanjra, M. A., & Mu, J. (2009). Pathways to reduce the environmental footprints of water and energy inputs in food production. *Food policy*, 34(2), 141–149.
- Kowalczyk, Z., & Cupiał, M. (2020). Environmental analysis of the conventional and organic production of carrot in Poland. *Journal of Cleaner Production*, 269, 122169.
- Maarefi, T., Ebrahimian, H., Dehghanisanij, H., Sharifi, M., & Delbaz, R. (2022). Life cycle assessment for major agricultural crops and different irrigation systems around Lake Urmia. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 16(3), 624–638.
- Majeed, Y., Khan, M. U., Waseem, M., Zahid, U., Mahmood, F., Majeed, F., ... & Raza, A. (2023). Renewable energy as an alternative source for energy management in agriculture. *Energy Reports*, 10, 344-359.
- Maynard, R., & Quinn, J. C. (2025). The future of sustainable food: Evaluating the effect of dynamic life cycle assessment methods on lettuce production ecoefficiency. *Journal of Cleaner Production*, 522, 146245.
- Mohammadi, A., Rafiee, Sh., Mohtasebi, S.S., & Rafiee, H. (2010). Energy inputs–yield relationship and cost analysis of kiwifruit production in Iran. *Renewable Energy*, 35, 1071–1075.
- Mohebi, A., & Mousavi, S. H. (2020). *Nutrient management in the production of commercial lettuce varieties*. Agricultural Education Publication. (In Persian).
- Mousavi, A., Aghbolaghi, E. A., Khorramifar, A., Gancarz, M., Darvishi, Y., Stasiak, M., Miernik, A., Karami, H. 2022. Life Cycle Assessment for Environmental Impact Reduction and Evaluation of the Energy Indices in Lettuce Production. *Applied Sciences*, 12(20), 10348.
- Mostashari-Rad, F., Ghasemi-Mobtaker, H., Taki, M., Ghahderijani, M., Kaab, A., Chau, K., & Nabavi-Pelesaraei, A. (2021). Exergoenvironmental damages assessment of horticultural crops using ReCiPe2016 and cumulative exergy demand frameworks. *Journal of Cleaner Production*, 278, 123788.
- Mostashari-Rad, F., Nabavi-Pelesaraei, A., Soheilifard, F., Hosseini-Fashami, F., & Chau, K. W. (2019). Energy optimization and greenhouse gas emissions mitigation for agricultural and horticultural systems in Northern Iran. *Energy*, 186, 115845.
- Nabavi-Pelesaraei, A., Rafiee, S., Mohtasebi, S. S., Hosseinzadeh-Bandbafha, H., & Chau, K. W. (2017). Energy consumption enhancement and environmental life cycle assessment in paddy production using optimization techniques. *Journal of Cleaner Production*, 162, 571–586.
- Nabavi-Pelesaraei, A., Rafiee, S., Mohtasebi, S. S., Hosseinzadeh-Bandbafha, H., & Chau, K. W. (2019). Comprehensive model of energy, environmental impacts and economic in rice milling factories by coupling adaptive neuro-fuzzy inference system and life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 217, 742-756.
- Nabavi-Pelesaraei, A., Rafiee, S., Mohtasebi, S. S., Hosseinzadeh-Bandbafha, H., & Chau, K. W. (2018). Integration of artificial intelligence methods and life cycle assessment to predict energy output and environmental impacts of paddy production. *Science of the Total Environment*, 631, 1279–1294.
- Nadi, F., & Campbell, D. (2023). Assessment of the thermodynamic, environmental and economic output of agro-ecosystems: onion set versus onion production. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 25(4), 1223–1240.
- Naseri, H., Parashkoohi, M. G., Ranjbar, I., & Zamani, D. M. (2021). Energy-economic and life cycle assessment of sugarcane production in different tillage systems. *Energy*, 217, 119252.
- Nucci, B., Puccini, M., Pelagagge, L., Vitolo, S., & Nicoletta, C. (2014). Improving the environmental performance of vegetable oil processing through LCA. *Journal of Cleaner Production*, 64, 310–322.
- Ordikhani, H., Parashkoohi, M. G., Zamani, D. M., & Ghahderijani, M. (2021). Energy-environmental life cycle assessment and cumulative exergy demand analysis for horticultural crops (Case study: Qazvin province). *Energy Reports*, 7, 2899–2915.
- Painkra, S., Singh, K. P., Singh, B., Jhariya, M. K., Banerjee, A., Sahu, K., ... & Kumar, B. (2025). Energy

- budgeting and economic analysis of coriander crop production in central India. *Environment, Development and Sustainability*, 1-21.
- Paratscha, R., von der Thannen, M., Smutny, R., Lampalzer, T., Strauss, A., & Rauch, H. P. (2019). Screening LCA of torrent control structures in Austria. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 24, 129–141.
- Paris, B., Vadorou, F., Balafoutis, A. T., Vaiopoulos, K., Kyriakarakos, G., Manolagos, D., & Papadakis, G. (2022). Energy use in open-field agriculture in the EU: A critical review recommending energy efficiency measures and renewable energy sources adoption. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 158, 112098.
- Pereira, B. d. J., Cecílio Filho, A. B., & La Scala, N. (2021). Greenhouse gas emissions and carbon footprint of cucumber, tomato and lettuce production using two cropping systems. *Journal of Cleaner Production*, 282, 124517.
- Rahi, S., Mobli, H., Jamshidi, B., Azizi, A., & Sharifi, M. (2020). Microbial Contamination Assessment of Lettuce using NIR Hyperspectral Imaging: Case Study on Escherichia coli. *Iranian Journal of Biosystem Engineering*, 51(3), 599-610. doi: 10.22059/ijbse.2020.296281.665267. (In Persian).
- Raphael, A., Iluz, D., & Mastai, Y. (2025). Agricultural Plastic Waste Challenges and Innovations. *Sustainability*, 17(17), 7941.
- Rashidi, K., Azizpanah, A., Fathi, R., & Taki, M. (2024). Efficiency and sustainability: Evaluating and optimizing energy use and environmental impact in cucumber production. *Environmental and Sustainability Indicators*, 22, 100407.
- Razavinia, B., Fallah, H., & Niknejad, Y. (2015). Energy efficiency and economic analysis of winter cultivation (lettuce, bersim clover, broad bean) in Mazandaran province of Iran. *Biological Forum – An International Journal*, 7(1), 1452–1460.
- Rokicki, T., Perkowska, A., Klepacki, B., Bórawski, P., Beldycka-Bórawska, A., & Michalski, K. (2021). Changes in Energy Consumption in Agriculture in the EU Countries. *Energies*, 14(6), 1570.
- Saadi, H., Behnia, M., Taki, M., & Kaab, A. (2025). A comparative study on energy use and environmental impacts in various greenhouse models for vegetable cultivation. *Environmental and Sustainability Indicators*, 25, 100553.
- Tarjuelo, J. M., Rodriguez-Diaz, J. A., Abadía, R., Camacho, E., Rocamora, C., & Moreno, M. A., 2015. Efficient water and energy use in irrigation modernization: Lessons from Spanish case studies. *Agricultural Water Management*, 162, 67–77.
- Wen, S., Cui, N., Li, M., Gong, D., Xing, L., Wu, Z., ... & Wang, Z. (2024). Optimizing irrigation and nitrogen fertilizer management to improve apple yield, quality, water productivity and nitrogen use efficiency: A global meta-analysis. *Scientia Horticulturae*, 332, 113221.
- Yildizhan, H., & Taki, M. (2018). Assessment of tomato production process by cumulative exergy consumption approach in greenhouse and open field conditions: Case study of Turkey. *Energy*, 156, 401–408.
- 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.