



Evaluation of Emergy and Economic Indices in the Camelina (*Camelina sativa* L.) Production System in Lorestan Province

Movahed Sepahvand¹ Majid Khanali² Mohammad Ali Ghahremani Aghbolagh Rostamkhan³ Ali Hajiahmad⁴ Rasoul Loghmanpour Zarini⁵

1. Agricultural Engineering Research Group, Lorestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Khorramabad, Iran. E-mail: m.sepahvand@areeo.ac.ir
2. 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: 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: hajiahmad@ut.ac.ir
5. Department of Agricultural Engineering, National University of Skills, Tehran, Iran. E-mail: r-loghmanpour@nus.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received: February 26, 2025

Revised: May 11, 2025

Accepted: May 14, 2025

Extended Abstract

Introduction. Analyzing energy consumption in agricultural production is critical due to resource limitations and the negative impacts of inefficient energy use on health and the environment. Sustainable agriculture requires focusing on both energy efficiency and environmental conservation. Emergy analysis which measures the total solar energy required for production, is widely used to evaluate sustainability in agriculture by considering both quantitative and qualitative aspects of energy and inputs. This method helps guide policies for better interactions between humans and the environment. Economic analysis is also essential for assessing agricultural systems' viability and profitability. By evaluating costs, income, and resource use benefits, economic analysis offers insights into cost-effectiveness and profitability. Combining emergy and economic analyses allows for a comprehensive understanding of ecological sustainability and economic performance trade-offs. This integrated approach identifies ways to optimize resource use, to reduce dependency on non-renewable inputs, and to increase profitability while maintaining environmental balance. This study focuses on *Camelina sativa* oil production in Lorestan, using both analyses to estimate emergy indices and sustainability, and to suggest strategies for sustainable resource management. The findings contribute to developing agricultural systems that are both environmentally and economically sustainable.

Materials and Methods. This research was conducted in Lorestan province. According to Cochran's formula, the required data for this study were obtained from 69 completed questionnaires by farmers. For the emergy analysis, the raw data for each input, expressed in Joules, grams, or Dollars, were multiplied by the corresponding transformity coefficients to obtain the emergy value for each input, based on Iran's conditions. Inputs were divided into four categories: Renewable local inputs (R), non-renewable local inputs (N_0), renewable market inputs (F_R), and non-renewable market inputs (F_N). This study utilized indicators such as transformity (Tr), specific emergy (SE), emergy renewability ($\%R$), emergy yield ratio (EYR), emergy investment ratio (EIR), environmental loading ratio (ELR), modified environmental loading ratio (ELR^*), emergy self-support ratio (ESR), environmental sustainability (ESI), modified environmental sustainability (ESI^*), and the emergy index of agricultural product safety ($EIPS$). The key economic indicators examined in *Camelina sativa* production include net profit, benefit to cost ratio, total production cost, product sales return percentage, and return on investment (cost) percentage.

Results and Discussion. The subtotal emergy for *Camelina sativa* production system was calculated to be $8.67E+15$ sej.ha⁻¹.y⁻¹. Rainfall emergy was the largest source of free environmental input. In this study system, environmental non-renewable inputs accounted for the largest portion of total emergy input, which was 79.38 percent. The emergy indicators including transformity (Tr), specific emergy (SE), Emergy renewability ($\%R$), Emergy yield ratio (EYR), Emergy investment ratio (EIR), Environmental loading ratio (ELR), Modified environmental loading ratio (ELR^*), Emergy self-support ratio (ESR), and Emergy index of agricultural product safety ($EIPS$) were calculated $2.11E+08$ sej.J⁻¹, $4.57E+9$ sej.g⁻¹, 3.65, 0.02, 0.21, 36, 26.4, 200, and respectively. The total income from *Camelina sativa* production, based on the selling price is estimated at 152527.49 Rials per hectare. The net profit, obtained by subtracting total costs from total income, is calculated at 66689.35 Rials per hectare, indicating the profitability of *Camelina sativa* production in the province. The total production cost and economic productivity of the product are 150699 Rials per kilogram and 3.73 kilograms per million Rials, respectively. Additionally, the benefit-cost ratio, product sales return percentage, and return on investment (cost) percentage are calculated as 1.72, 43.72, and 77.69, respectively. In general, *Camelina sativa* is considered a viable oilseed option, but improving resource management and adopting sustainable practices are essential for enhancing profitability and reducing environmental impacts. Key strategies include organic fertilizers, optimizing tillage methods, and minimizing diesel consumption. These approaches can improve soil health, reduce costs, and boost both ecological and economic sustainability.

Conclusion. To ensure future food security, developing sustainable agricultural systems that provide sufficient production, optimal economic returns, and minimal environmental impact is essential. This study evaluates the ecological health and input use efficiency of *Camelina sativa* production in Lorestan province using emergy and economic analysis. Results showed significant reliance on non-renewable environmental inputs, which may affect environmental sustainability. The total emergy input was $8.67E+15$ solar enjoules per hectare per year annually, with non-renewable inputs accounting for 79.38% and renewable inputs for 2.70%. The total production cost was 85838.14 Rials per hectare, and the total revenue was 152527.49 Rials per hectare, demonstrating profitability. Strategies for sustainable management include reducing chemical fertilizer use, optimizing diesel fuel consumption, and addressing soil erosion. These approaches can enhance productivity, ecological health, and environmental sustainability.

Keywords:

Economic analysis, emergy approach, environmental pressure, solar energy joule, sustainability.

Cite this article: Sepahvand, M., Khanali, M., Ghahremani Aghbolagh Rostamkhan, M.A., Hajiahmad, A., & Loghmanpour Zarini, R. (2025). Evaluation of emergy and economic indices in the camelina (*Camelina sativa* L.) production system in Lorestan province. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 56(3), 147-165. DOI: [10.22059/ijfcs.2025.391143.655129](https://doi.org/10.22059/ijfcs.2025.391143.655129).





انتشارات دانشگاه تهران

علوم گیاهان زراعی ایران

شماره الکترونیکی: ۸۰۸۲-۲۴۲۳

Homepage: <https://ijfcs.ut.ac.ir/>

ارزیابی شاخص‌های امرژی و اقتصادی در نظام تولید کاملینا (*Camelina sativa* L.) در استان لرستان

موحد سپهوند^۱ | مجید خانعلی^۲ | محمدعلی قهرمانی آقبلاغ رستم‌خان^۳ | علی حاجی احمد^۴ | رسول لقمانپور زرینی^۵

۱. گروه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی لرستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی (AREEO)، خرم‌آباد، ایران. رایانامه: m.sepahvand@areeo.ac.ir
۲. نویسنده مسئول، 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: hajiahmad@ut.ac.ir
۵. گروه مهندسی کشاورزی، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران. رایانامه: r-loghmanpour@nus.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۰۸ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۲/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۲۴ کلیدواژه‌ها: ام‌ژول خورشیدی، پایداری، تحلیل اقتصادی، رویکرد امرژی، فشار محیط‌زیستی.	تلفیق تحلیل امرژی و اقتصادی با ارزیابی هم‌زمان تأثیرات محیط‌زیستی و هزینه‌های تولید، دیدگاه جامعی را از منظر کارایی نظام‌های کشاورزی ارائه می‌دهد. این مطالعه با هدف ارزیابی شاخص‌های امرژی و اقتصادی نظام تولید کاملینا (<i>Camelina sativa</i>) در استان لرستان انجام شد. اطلاعات موردنیاز از طریق پرسشنامه و مصاحبه حضوری با ۶۹ کاملیناکار برای سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۲ جمع‌آوری شد. بر اساس نتایج، متوسط امرژی کل حمایت‌کننده برابر $10^{15} \times 8/67$ ام‌ژول خورشیدی در هکتار در سال به‌دست آمد. همچنین بیشترین سهم از امرژی ورودی مربوط به ورودی‌های محیطی تجدیدناپذیر (N_0) شامل تلفات فرسایشی خاک با ۶۴/۸۷ درصد و آب زیرزمینی با ۱۴/۵۱ درصد بود. وابستگی نظام مورد بررسی به ورودی‌های محیطی تجدیدناپذیر، اثرگذاری بالایی بر پایداری محیط‌زیستی داشته است. شاخص‌های امرژی نشان دادند که گرچه این محصول دارای مزایای اقتصادی است، اما نیاز به بهینه‌سازی مصرف منابع جهت کاهش فشار محیط‌زیستی دارد. از نظر کارایی اقتصادی، نسبت فایده به هزینه ۱/۷۸ تعیین شد که نشان‌دهنده سوددهی این محصول بوده است. با این حال برای تقویت پتانسیل اقتصادی کشت کاملینا در استان، بهبود مدیریت منابع، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر (خورشید و باد)، کاهش وابستگی به کودهای شیمیایی و سوخت‌های فسیلی می‌تواند به افزایش سودآوری و پایداری آن کمک کند.

استناد: سپهوند، م.، خانعلی، م.، قهرمانی آقبلاغ رستم‌خان، م.ع.، حاجی احمد، ع.، و لقمانپور زرینی، ر. (۱۴۰۴). ارزیابی شاخص‌های امرژی و اقتصادی در نظام تولید کاملینا (*Camelina sativa* L.) در استان لرستان. *علوم گیاهان زراعی ایران*، ۵۶(۳)، ۱۶۵-۱۴۷.

DOI: 10.22059/ijfcs.2025.391143.655129



© نویسندگان

ناشر: موسسه انتشارات دانشگاه تهران.

۱. مقدمه

برای دستیابی به هدف تأمین امنیت غذایی آینده، معرفی نظام‌های کشاورزی پایدار که ضمن ارائه تولیدات کشاورزی کافی و سالم، بازده اقتصادی مناسب و حداقل تأثیرات منفی برای محیط‌زیست را داشته باشد یک امر ضروری است (Abbona *et al.*, 2007; Amiri *et al.*, 2021). بوم‌نظام‌های کشاورزی به‌دلیل ساختار و کارکردهای متعدد، به‌عنوان نظام‌های زیستی پیچیده تلقی می‌شوند. به همین‌منظور، تعیین میزان پایداری نظام‌های کشاورزی برای شناسایی الگوهای مناسب تولید، نیازمند روشی علمی و جامع است (Quintero-Angel & González-Acevedo, 2018). تحلیل امرژی دارای قابلیت سنجش اثرات محیط‌زیستی، اقتصادی، کیفیت محصول و حتی ارزیابی اجتماعی نظام‌های کشت مختلف است (Mirshekari *et al.*, 2021). روش تحلیل امرژی بر مبنای نظام ارزش‌گذاری طبیعت بنا نهاده شده و اساس آن بر جریان انرژی در دسترس استوار است که این انرژی به‌صورت اختصاصی و یا به‌صورت فرم‌های تبدیلی می‌تواند ظرفیت انجام کار بیشتری را داشته باشد (Kohkan *et al.*, 2017). تحلیل جریان انرژی به تنهایی برای ارزش‌گذاری کالاها و خدمات بوم‌نظام کافی نیست، زیرا کار انجام‌شده توسط محیط‌زیست و اقتصاد برای تولید یک کالا یا ارائه خدمات را لحاظ نمی‌کند. بنابراین، استفاده از شاخص‌های امرژی برای ارزیابی پایداری یک بوم‌نظام، بینش ارزشمندی را درباره پایداری سیاست‌گذاری‌های حال و آینده به ما می‌دهد (Brown & Ulgianti, 2004).

دانه‌های روغنی پس از غلات دومین ذخایر غذایی دنیا را تشکیل می‌دهند. وابستگی ۹۰ درصدی کشور به واردات روغن‌های گیاهی، افزایش هفت برابری سرانه مصرف روغن در کشور، خروج ۳/۷ میلیارد دلار ارز از کشور و کاهش ۶۰ درصدی تولید روغن در داخل کشور طی ۴۵ سال اخیر از جمله موضوعات قابل تامل در سیستم کشاورزی و صنایع غذایی کشور می‌باشند (Rostami Ahmadvandi *et al.*, 2021). کاملینا گیاهی راهبردی برای کاهش واردات روغن است که با توجه به تشدید خشکسالی‌های اخیر و بحران منابع آب در کشور، نقش بسیار مهمی در اجرای طرح اصلاح الگوی کشت دارد و معرفی این گیاه می‌تواند گامی موثر در اقتصادی‌کردن کشاورزی، ایجاد اشتغال جدید و پایدار باشد. این گیاه در برخی از استان‌های کشور در شرایط دیم کشت و عملکرد رضایت‌بخشی داشته است و به کشاورزان توصیه می‌شود که زمین‌های آیش و دیم‌زارها را خالی رها نکنند و این گیاه کم‌توقع و اقتصادی را کشت کنند (Rostami Ahmadvandi *et al.*, 2021). همچنین به‌منظور افزایش عملکرد کاملینا در کشور؛ انتخاب بهترین تاریخ کشت، رعایت عمق کاشت مناسب، کنترل علف‌های هرز و برداشت مکانیزه محصول حائز اهمیت می‌باشد (Rostami Ahmadvandi *et al.*, 2021).

تاکنون مطالعات زیادی در زمینه تحلیل انرژی صورت گرفته است که به‌دلیل نادیده‌گرفتن سهم عوامل طبیعی و رایگان محیطی در بوم‌نظام کشاورزی، از دقت کافی برخوردار نیستند. به‌منظور جبران این چالش، مطالعه حاضر در قالب یک دیدگاه طبیعت‌محور، شاخص امرژی را معرفی می‌نماید که با دیدگاهی جامع در سطح یک نظام تولید محصولات کشاورزی، تمام ورودی‌ها اعم از نهاده‌های تجدیدپذیر محیطی رایگان (نور خورشید، باد و باران) و تجدیدنپذیر رایگان (آب زیرزمینی و خاک)، انرژی‌های خریداری‌شده و خدمات را مورد ارزیابی قرار داده و پایداری یک بوم‌نظام کشاورزی از لحاظ مصرف انرژی را ممیزی و تعیین می‌کند. به‌طوری‌که می‌توان با محاسبه شاخص‌های امرژی مطابق با اصل حداکثر توانمندسازی، کارایی منابع اقتصادی مصرفی در تولیدات کشاورزی را بهبود بخشید تا حداکثر استفاده بهینه از منابع انرژی به‌دست آید و به سازماندهی نظام برای تولید و ازبین‌بردن کمبودها و قیود اقدام کرد.

با استفاده از شاخص امرژی و تحلیل آن، تحقیقات مختلفی در ارتباط با انرژی‌های ورودی و ارزیابی پایداری محصولات و نظام‌های کشاورزی انجام شده است. محققان دانمارکی طی مطالعه‌ای از تحلیل امرژی جهت مقایسه ارزیابی پایداری نظام ترکیبی غذا و انرژی با نظام تولید گندم معمولی به‌منظور تولید پایدار غذا، علوفه و انرژی بدون مواد شیمیایی مانند کود، علف‌کش و قارچ‌کش استفاده نمودند. نتایج این تحقیق حاکی از آن بود که نظام مورد مطالعه به‌طور قابل توجهی نیاز به منابع خریداری‌شده کمتری دارد و متکی به منابع رایگان محیطی بوده و به تولید پایدار بیشتر تمایل دارد (Ghaley & Porter, 2013). در پژوهشی دیگر در کشور برزیل، برای سه مزرعه با روش‌های مدیریتی مختلف از نظر نوع و میزان نهاده‌ها به‌ویژه توسط پایش فرسایش

خاک به عنوان ورودی تجدیدناپذیر، به کمک تحلیل امرژی، برنامه حوزه آبخیز طراحی گردید. در نهایت، نظامی که از ورودی‌های خریداری‌شده و شیمیایی کمتری استفاده نموده و تعامل بهتری با محیط‌زیست داشت، پایدارتر اعلام شد (Agostinho et al., 2008). در تحقیقی دیگر، مقایسه سه نظام مختلف کشاورزی باتوجه به منابع، بهره‌وری، اثرات محیط‌زیستی و پایداری کلی برای سه نظام کشت ذرت، شاه‌توت و کشت ترکیبی در ایالات مختلف آمریکا بر اساس تحلیل امرژی انجام شد. نتایج این مطالعه نشان داد که بیشترین ورودی‌های مصرفی در بین سه نظام کشت، مربوط به کوددهی و آبیاری در نظام تولید ذرت بود. این دو نهاد، ۹۵ درصد از ورودی‌های خریداری‌شده این نظام را تشکیل می‌دادند. همچنین نتایج این تحقیق حاکی از آن بود که نظام کشت ترکیبی بومی، بیشترین وابستگی به منابع تجدیدپذیر را داشته است. در مورد شاخص پایداری نیز نتایج بیانگر پایداری بیشتر و اختلاف معنی‌دار آن در نظام تولید ترکیبی بومی نسبت به نظام کشت محصولات ذرت و شاه‌توت بوده است (Martin et al., 2006). در ایران نیز تحقیقاتی پیرامون تحلیل امرژی برای نظام‌های کشت و تولید محصولات کشاورزی صورت گرفته است. در تحقیقی، پایداری پنج نظام کشت و تولید لوبیا در استان مرکزی مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفت. نتایج این مقایسه نشان داد که از کل ورودی‌های امرژی، ورودی‌های خریداری‌شده بیشترین سهم را به خود اختصاص داده‌اند. همچنین نهاده‌های کود نیتروژن و فسفات بیشترین مصرف امرژی را داشتند (Asgharipour et al., 2019). مطالعه‌ای با هدف محاسبه میزان پایداری اکولوژیکی نظام‌های کشاورزی تولید دانه‌های روغنی استان سیستان و بلوچستان با تحلیل امرژی انجام شد. میزان امرژی کل نظام‌های تولید کلزا، گلرنگ و کنجد به ترتیب $10^{16} \times 7/28$ ، $10^{16} \times 4/75$ و $10^{16} \times 3/55$ ام‌ژول خورشیدی بر هکتار برآورد شد. از این بین بیشترین سهم از ورودی امرژی کل در هر سه نظام کشت در منطقه مورد مطالعه مربوط به ورودی‌های تجدیدناپذیر محیطی بود که سهم آن برای نظام‌های تولید کلزا، گلرنگ و کنجد برابر $42/83$ درصد، $11/80$ درصد و $41/84$ درصد به دست آمد (Pordel et al., 2024). نتایج مقایسه سه نظام تولیدی سیر، پیاز و گندم بر اساس ارزیابی شاخص‌های امرژی و اقتصادی نشان داد که روند مطلوبیت در عملکرد اقتصادی و عملکرد محیط‌زیستی طی فرآیند تولید در نظام‌های مورد بررسی دارای تناقض است (Yasini et al., 2020).

با وجود اینکه تحلیل امرژی در بخش‌های مختلفی از نظام تولید محصولات کشاورزی به کار گرفته شده است، اما تاکنون بررسی جامعی از ارزیابی امرژی برای گیاهان روغنی از جمله کاملینا انجام نشده است. این مطالعه سعی دارد تا ضمن جبران این خلأ، بینشی عملیاتی در راستای مدیریت پایدار تولید گیاهان روغنی ارائه نماید. لذا هدف از این پژوهش، بررسی نظام تولید کاملینا با استفاده از رویکرد تحلیل امرژی و محاسبه شاخص‌های امرژی به منظور تعیین میزان پایداری و ارائه راهکار و پیشنهاداتی برای مدیریت پایدار و بهینه منابع و نهاده‌های نظام کشت این محصول که می‌تواند نقش پررنگی در تولید و خودکفایی روغن با وجود محدودیت‌های منابع و آب ایفا نماید، می‌باشد.

۲. روش‌شناسی پژوهش

این مطالعه در استان لرستان صورت پذیرفت که بیشترین سطح زیرکشت و میزان تولید این گیاه روغنی در سطح کشور را دارد. میزان سطح زیرکشت کاملینا در این استان ۵۲۶۷ هکتار و میزان تولید آن ۳۰۰۰ تن برآورد شده است. استان لرستان با مساحت ۲۸۰۹۹ کیلومترمربع در ناحیه جنوب‌غربی ایران بین ۴۶ درجه و ۵۰ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۱ دقیقه طول شرقی و ۳۲ درجه و ۴۰ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۲۳ دقیقه عرض شمالی واقع شده است (Anonymous, 2023).

۱-۲. جمع‌آوری داده‌ها

به منظور محاسبه شاخص‌های امرژی و اقتصادی در این مطالعه، ابتدا تمامی جریان‌های ورودی تولید محصول کاملینا طی سال ۱۴۰۱-۱۴۰۲ در سه دسته‌بندی ورودی‌های محیطی رایگان تجدیدپذیر، ورودی‌های محیطی رایگان تجدیدناپذیر و ورودی‌های غیر رایگان طبقه‌بندی می‌شوند. ورودی‌های محیطی رایگان تجدیدپذیر شامل نور خورشید، باد و باران؛ و ورودی‌های محیطی رایگان تجدیدناپذیر شامل آب زیرزمینی و فرسایش و تلفات ماده آلی خاک؛ و ورودی‌های غیر رایگان شامل نیروی انسانی،

کودهای شیمیایی، سوخت دیزل، ماشین‌ها، علف‌کش و بذر کاملینا در نظر گرفته شد که از طریق پرسشنامه و مصاحبه حضوری با کاملیناکاران دریافت شده است. همچنین خروجی نظام مورد مطالعه دانه و کاه محصول کاملینا بود. باتوجه به گسترده بودن جامعه آماری در این پژوهش از روش نمونه‌گیری تصادفی ساده که یکی از روش‌های آماری معمول در ارتباط با مطالعه متغیرهای کیفی می‌باشد برای تعیین حجم نمونه استفاده شد. حجم نمونه مورد نیاز برای محصول کاملینا با- استفاده از رابطه کوکران (رابطه ۱) برابر ۶۹ نمونه برآورد شد.

$$n = \frac{Nt^2s^2}{Nd^2 + t^2s^2} \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در آن n حجم نمونه، N حجم جامعه یا تعداد کل کاملیناکاران (۱۵۸۰)، t ضریب اطمینان قابل قبول که با فرض نرمال- بودن توزیع صفت مورد نظر از جدول t - استیودنت به دست می‌آید (۱/۶۴۵)، S انحراف معیار جامعه (۰/۵) و d دقت احتمالی مطلوب است (۰/۱) (Cochran, 2003).

۲-۲. تحلیل انرژی

اولین مرحله در تحلیل انرژی، تعیین مرزهای مکانی و زمانی نظام‌های مورد بررسی و ترسیم دیاگرام انرژی به منظور دسته‌بندی نهاده‌های نظام به منابع تجدیدپذیر یا تجدیدنپذیر، محیطی رایگان یا غیر رایگان است. دیاگرام انرژی به طور خاص برای نمایش دقیق ورودی‌ها و خروجی‌های نظام مورد استفاده قرار می‌گیرد. این فرآیند نه تنها برای مدیریت روابط بین اجزای اصلی و فرآیندهای نظام ضروری است، بلکه بنیان‌های محیط‌زیستی نظام و ارتباط آن با اقتصاد کلان را نیز به تصویر می‌کشد (Odum et al., 2000b). دیاگرام انرژی مربوط به نظام کشت کاملینا در استان لرستان در شکل ۱ ارائه شده است. دومین مرحله، ترسیم جدول ارزیابی انرژی است. برای ترسیم این جدول باید اطلاعات خام هر نهاده بر حسب گرم، ژول، دلار یا ریال در ضرایب تبدیل خورشیدی متناظر هر نهاده ضرب شود تا مقدار انرژی معادل به دست آید. مقدار کل انرژی نظام مورد بررسی از مجموع انرژی تمامی نهاده‌های مستقل به دست می‌آید (Odum et al., 2000b). در نظام تولیدی گیاه روغنی کاملینا در استان لرستان، ورودی‌های محیطی رایگان تجدیدپذیر^۱ (R) شامل نور خورشید، باد و باران؛ ورودی‌های محیطی رایگان تجدیدنپذیر^۲ (N_0) شامل آب زیرزمینی، فرسایش و تلفات ماده آلی خاک؛ ورودی‌های غیر رایگان تجدیدپذیر^۳ (F_R) شامل نیروی انسانی و بذر کاملینا؛ ورودی‌های غیر رایگان تجدیدنپذیر^۴ (F_N) شامل کود نیتروژن، کود فسفات، علف‌کش، سوخت دیزل و ماشین‌ها بود. داده‌های مربوط به میزان فرسایش و ماده آلی خاک و داده‌های اقلیمی برای محاسبه ورودی‌های محیطی رایگان از اداره منابع طبیعی و آبخیزداری، اداره هواشناسی استان لرستان و منابع بررسی شده جمع‌آوری شد. اطلاعات جدول ۱ برای محاسبه مقادیر انرژی ورودی‌های محیطی رایگان روابط ۲ تا ۶ مورد استفاده قرار گرفت. برای محاسبه انرژی تابشی خورشید در منطقه مورد مطالعه از رابطه (۲) استفاده شد:

$$E(J) = A \times I \times (1 - Fab) \quad (\text{رابطه ۲})$$

که در آن A مساحت زمین (m^2)، I متوسط تابش خورشیدی در طول فصل رشد محصول ($J.m^{-2}$)، Fab ضریب آلودگی (۰/۲) در نظر گرفته شد و E انرژی تابشی خورشیدی (J) است (Ghaley et al., 2018). انرژی باد طبق رابطه (۳) محاسبه شد:

$$\text{Wind energy (J)} = A \times r \times c \times v^3 \times t \quad (\text{رابطه ۳})$$

که در آن A مساحت زمین (m^2)، r چگالی هوا ($1/3 \text{ kg.m}^{-3}$)، c ثابت درگ (10^{-3})، v سرعت باد ($m.s^{-1}$) و t زمان (s) است (Ghaley et al., 2018).

1. Renewable local inputs
2. Non-renewable local inputs
3. Renewable Purchased inputs
4. Non-renewable Purchased inputs
1. Drag coefficient

انرژی باران طبق رابطه (۴) محاسبه شد:

$$\text{Rain energy (J)} = A \times p \times r \times d \times \Delta G \quad (\text{رابطه ۴})$$

که در آن A مساحت زمین (m^2)، p میانگین بارندگی (mm.yr^{-1})، r ضریب رواناب ($0/317$)، d جرم مخصوص آب (10^6 g.m^{-3}) و ΔG انرژی آزاد گیبس ($4/94 \text{ J.g}^{-1}$) است (Ghaley et al., 2018). مقدار انرژی آب زیرزمینی طبق رابطه (۵) محاسبه شد:

$$\text{Ground water energy (J)} = A \times p \times d \times \Delta G \quad (\text{رابطه ۵})$$

که در آن A مساحت زمین (m^2)، p متوسط آب زیرزمینی ($\text{m}^3.\text{m}^{-2}$)، d جرم مخصوص آب (10^6 g.m^{-3}) و ΔG انرژی آزاد گیبس ($4/94 \text{ J.g}^{-1}$) است (Kohkan et al., 2017). مقدار انرژی خاک تلف شده طبق رابطه (۶) محاسبه شد:

$$\text{Energy of soil loss (J)} = A \times \text{Erod}_{\text{soil}} \times \text{OM} (\%) \times E_{\text{OM}} \times 4186 \text{ J kcal}^{-1} \quad (\text{رابطه ۶})$$

که در آن A مساحت زمین (m^2)، $\text{Erod}_{\text{soil}}$ مقدار خاک فرسایش شده ($\text{g.m}^2.\text{yr}^{-1}$)، OM درصد ماده آلی خاک و E_{OM} محتوای انرژی مواد آلی خاک ($5/4 \text{ kcal.g}^{-1}$ یا $22604/4 \text{ J.g}^{-1}$) است (Odum & Odum, 1983). برای تبدیل انرژی به انرژی تمامی ورودی‌های محیطی رایگان اعم از نور خورشید، باران، باد، آب زیرزمینی و فرسایش خاک و تلفات ماده آلی خاک از ضرایب تبدیل خورشیدی استفاده شد و اطلاعات خام هر نهاده بر حسب واحد هر کدام در ضرایب تبدیل خورشیدی ضرب شد تا مقدار انرژی آن ورودی حاصل شود.

سومین و آخرین مرحله در تحلیل انرژی استفاده از شاخص‌های انرژی است. در تحلیل انرژی، شاخص‌های مبتنی بر انرژی به عنوان ابزارهای کلیدی برای انجام ارزیابی‌های محیط‌زیستی و اقتصادی مورد استفاده قرار می‌گیرند (Lu et al., 2018; Lu et al., 2010). در این مطالعه برای تحلیل انرژی از شاخص‌های ضریب تبدیل (T_R)، درصد تجدیدپذیری انرژی ($\%R$)، انرژی ویژه (SE^y)، نسبت عملکرد انرژی (EYR^x)، نسبت سرمایه‌گذاری انرژی (EIR^z)، نسبت بار محیط‌زیستی (ELR^v)، نسبت بار محیط‌زیستی اصلاح شده (ELR^{*v})، نسبت خودحمایتی انرژی (ESR^{**})، پایداری محیط‌زیستی (ESI^{**})، پایداری محیط‌زیستی اصلاح شده (ESI^{*v}) و شاخص انرژی ایمنی محصولات کشاورزی ($EIPS^{**}$) استفاده شد. مشخصات و روابط شاخص‌های انرژی مورد استفاده در این مطالعه در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۱. میانگین سالانه متغیرهای اقلیمی و خاکی در استان لرستان.

Table 1. Annual average of climatic and soil variables in Lorestan province.

متغیر								
تابش خورشیدی	بارندگی	مساحت زمین	متوسط آب زیرزمینی	زمان	سرعت باد	مقدار فرسایش خاک	ماده آلی خاک	رطوبت نسبی هوا
Jm^{-2}	mm	m^2	$\text{m}^3.\text{m}^{-2}$	s	ms^{-1}	gm^{-2}	%	%
6×10^9	۵۱۶/۷	۱۰۰۰۰	۰/۱۳۲۶	۳۱۵۳۶۰۰۰	۲/۸۴	۱۳۹۰	۱/۹	۵۱/۹
میانگین سالانه								

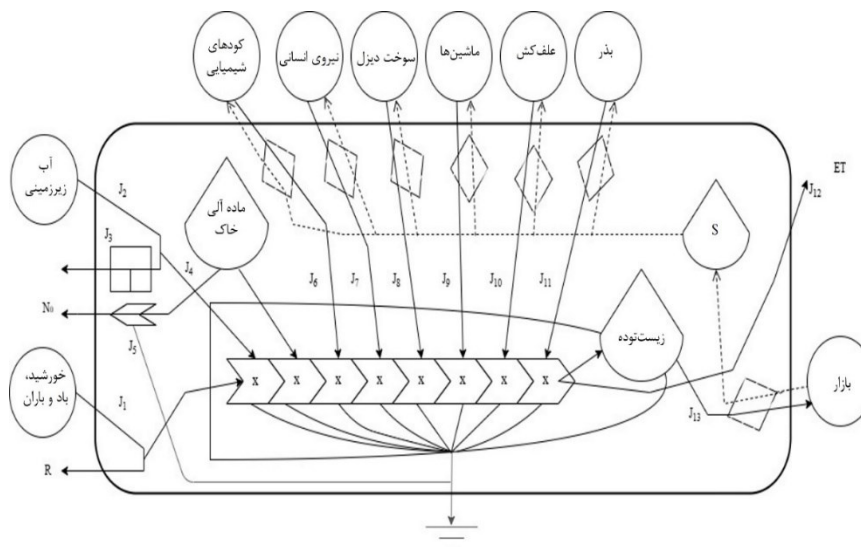
1. Emergy renewability
2. Specific emergy
3. Emergy yield ratio
4. Emergy investment ratio
5. Environmental loading ratio
6. Modified environmental loading ratio
7. Emergy self-support ratio
8. Environmental sustainability
9. Modified environmental sustainability
10. Emergy index of agricultural product safety

جدول ۲. روابط و خصوصیات شاخص‌های انرژی برای تحلیل پایداری نظام تولید کاملینا.

Table 2. Relationships and characteristics of energy indicators for analyzing the sustainability of the camelina production system.

منبع	خصوصیات	رابطه	شاخص
(Guo <i>et al.</i> , 2023)	جریان‌های تجدیدپذیر از منابع محلی رایگان	R	ورودی‌های محیطی تجدیدپذیر
(Guo <i>et al.</i> , 2023)	جریان‌های تجدیدناپذیر از منابع محلی رایگان	N_0	ورودی‌های محیطی تجدیدناپذیر
(Guo <i>et al.</i> , 2023)	جریان‌های تجدیدپذیر از منابع غیر رایگان	F_R	ورودی‌های غیر رایگان تجدیدپذیر
(Guo <i>et al.</i> , 2023)	جریان‌های تجدیدناپذیر از منابع غیر رایگان	F_N	ورودی‌های غیر رایگان تجدیدناپذیر
(Asgharipour <i>et al.</i> , 2019)	کل جریان انرژی مورد نیاز برای پشتیبانی از نظام تولیدی	$U = R + N_0 + F_R + F_N$	کل انرژی ورودی
(Guo <i>et al.</i> , 2023)	مجموع انرژی محصولات نظام تولیدی	Y	کل انرژی خروجی
(Brown & Ulgiati, 2004)	مقدار انرژی برای تولید یک واحد خروجی (ژول). AE نشان‌دهنده محتوای انرژی محصول (جدول ۳) است.	$T_r = U/AE$	ضریب تبدیل
(Brown & Ulgiati, 2004)	مقدار انرژی برای تولید یک واحد خروجی بر حسب گرم است. W جرم در دسترس محصول است.	$SE = U/W$	انرژی ویژه
(Wang <i>et al.</i> , 2022)	درصد انرژی تجدیدپذیر استفاده‌شده در نظام تولیدی	$\%R = (R + F_R)/U$	تجدیدپذیری انرژی
(Wang <i>et al.</i> , 2022)	میزان بهره‌برداری از منابع محیطی در مقایسه با سرمایه‌گذاری در منابع اقتصادی	$EYR = Y/F_R + F_N$	نسبت عملکرد انرژی
(Asgharipour <i>et al.</i> , 2019)	نسبت منابع غیر رایگان به انرژی رایگان	$EIR = (F_R + F_N)/(R + N_0)$	نسبت سرمایه‌گذاری انرژی
(Lu <i>et al.</i> , 2014)	نسبت انرژی غیر رایگان و تجدیدناپذیر به ورودی‌های تجدیدپذیر محیطی رایگان	$ELR = (N_0 + F_R + F_N)/R$	نسبت بار محیط‌زیستی
(Asgharipour <i>et al.</i> , 2019)	نسبت انرژی تجدیدناپذیر به انرژی تجدیدپذیر مصرف‌شده توسط نظام که به‌عنوان شاخصی معکوس برای ارزیابی پایداری نظام عمل می‌کند.	$ELR^* = (N_0 + F_N)/(R + F_R)$	نسبت بار محیط‌زیستی اصلاح‌شده
(Wang <i>et al.</i> , 2022)	این شاخص برای ارزیابی نقش محیط طبیعی در نظام تولیدی به کار می‌رود.	$ESR = (R + N_0)/Y$	نسبت خود حمایتی انرژی
(Wang <i>et al.</i> , 2022)	نسبت عملکرد نظام به ورودی‌های غیر رایگان در مقایسه با کل بار محیطی را ارزیابی می‌کند.	$ESI = (EYR/ELR)$	پایداری محیط‌زیستی
(Asgharipour <i>et al.</i> , 2019)	عملکرد نظام را نسبت به معیار معکوس پایداری آن ارزیابی می‌کند.	$ESI^* = (EYR/ELR^*)$	پایداری محیط‌زیستی اصلاح‌شده
(Guo <i>et al.</i> , 2023)	برای سنجش تأثیر مصرف کودهای شیمیایی، آفت‌کش‌ها و علف‌کش‌ها بر ایمنی محصول تولیدی. C^* نشان‌دهنده مقدار مصرف مواد شیمیایی است.	$EIPS = 1 - [(C/F_R + F_N)]$	شاخص انرژی ایمنی محصولات کشاورزی

*. C نشان‌دهنده مقدار مصرف مواد شیمیایی شامل کودهای نیتروژن (۲۸۹۲۰ گرم) و فسفات (۱۳۳۰ گرم مصرف شده) و سموم (۱۰۰ گرم) می‌باشد که حاصل جمع آن‌ها برابر با مقدار ۴۰۳۵۰ گرم است.



شکل ۱. دیاگرام انرژی نظام کشت کاملینا.

Figure 1. Energy diagram of the camelina cultivation system.

۲-۳. شاخص‌های اقتصادی

مهم‌ترین شاخص‌های اقتصادی که در تولید کاملینا مورد بررسی قرار گرفت (روابط ۷ تا ۱۱)، عبارتند از: سود خالص، نسبت فایده به هزینه، هزینه تمام‌شده محصول، درصد بازده فروش محصول و درصد بازگشت سرمایه محصول (Asadi et al., 2024).

$$NR = TR - TC \quad (\text{رابطه ۷})$$

$$\frac{B}{C}R = \frac{TR}{TC} \quad (\text{رابطه ۸})$$

$$TP = \frac{Y}{Y} \quad (\text{رابطه ۹})$$

$$SRP = \frac{NR}{TR} \times 100 \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

$$RRP = \frac{TR}{TC} \times 100 \quad (\text{رابطه ۱۱})$$

که در آن‌ها NR سود خالص (Rial ha^{-1})، $\frac{B}{C}R$ نسبت فایده به هزینه، TP هزینه تمام‌شده محصول (Rial kg^{-1})، SRP درصد بازده فروش محصول، RRP درصد بازگشت سرمایه (هزینه) محصول، TR درآمد کل (Rial ha^{-1})، TC هزینه کل (Rial ha^{-1}) و Y عملکرد محصول (دانه یا زیست‌توده) (kg ha^{-1}) می‌باشد.

۳. یافته‌های پژوهش و بحث

۳-۱. ساختار استفاده از تحلیل انرژی

ورودی‌های منابع طبیعی و نهاده‌های غیر رایگان برای نظام تولید کاملینا در جدول ۳ فهرست شده است. تمام ورودی‌های ارائه شده در این جدول از طریق ضرب مقادیر خام در ضرایب تبدیل خورشیدی تبدیل شده‌اند. علاوه بر این، تمامی ورودی‌های بر طبق نسبت‌های تجدیدپذیری به دو بخش تجدیدپذیر و تجدیدنپذیر گروه‌بندی شده است. کل ورودی انرژی حمایت‌کننده نظام تولید کاملینا $10^{15} \times 8/67$ ام‌ژول خورشیدی در هکتار در سال برآورد شد. در پژوهشی مقدار انرژی ورودی کل نظام‌های تولیدی گیاهان روغنی کلزا، گلرنگ و کنجد در منطقه سیستان به ترتیب $10^{16} \times 7/28$ ، $10^{16} \times 4/75$ و $10^{16} \times 3/55$ ام‌ژول خورشیدی در هکتار بود (Pordel et al., 2024). طبق شکل ۲ مقایسه کل انرژی ورودی نظام‌های تولیدی گیاهان روغنی (کلزا، گلرنگ و کنجد) با مطالعه حاضر بیانگر این حقیقت است که نظام مورد مطالعه از نظر معادل کل انرژی ورودی نسبت به سایر گیاهان روغنی مقدار کمتری را دارا می‌باشد، بنابراین محصول کاملینا نسبت به کلزا، گلرنگ و کنجد فشار محیط‌زیستی کمتری دارد.

بالاترین مقدار امرژی ورودی در نظام تولیدی کاملینا مربوط به ورودی‌های محیطی تجدیدپذیر در نظر گرفته شده شامل تلفات فرسایشی خاک با $10^{15} \times 5/62$ امژول خورشیدی در هکتار در سال (سهم $64/87$ درصدی) و آب زیرزمینی با $10^{15} \times 1/26$ امژول خورشیدی در هکتار در سال (سهم $14/51$ درصدی) بود (جدول ۳).

۳-۱-۱. ورودی‌های محیطی تجدیدپذیر (R)

در نظام تولید کاملینا ورودی‌های محیطی تجدیدپذیر (R) شامل انرژی خورشیدی، انرژی باران و انرژی باد در نظر گرفته شد. در این مطالعه، بزرگ‌ترین ورودی محیطی رایگان در تمامی نظام تولیدی مورد بررسی، انرژی باران بود. از آنجایی که کلیه ورودی‌های محیطی تجدیدپذیر منشأ خورشیدی دارند، برای جلوگیری از ارزیابی مضاعف، مجموع انرژی خورشیدی مورد استفاده در فرآیند فتوسنتز گیاهان و بزرگ‌ترین جزء ورودی‌های محیطی تجدیدپذیر (باران) به عنوان معادل کل ورودی‌های محیطی تجدیدپذیر در نظر گرفته شد. جریان‌های محیطی تجدیدپذیر با $10^{14} \times 2/34$ امژول خورشیدی در هکتار در سال سهمی حدود $2/70$ درصد از کل جریان امرژی ورودی نظام تولیدی را به خود اختصاص داده بودند (جدول ۳) که بیانگر دخالت کم نهاده‌های رایگان در دسترس طبیعی در معادل امژول خورشیدی کلیه ورودی‌های نظام مورد مطالعه بوده است. در طی پژوهشی توسط (Pordel et al., 2024)، مقادیر ورودی‌های تجدیدپذیر برای کلزا، گلرنگ و کنجد به ترتیب $10^{14} \times 7/07$ و $10^{14} \times 6/76$ و $10^{14} \times 1/39$ امژول خورشیدی در هکتار بود (شکل ۲). در پژوهشی دیگر واقع در شهرستان خرم‌آباد استان لرستان، تحلیل امرژی برای دو نظام تولیدی تجاری و معیشتی محصول کلزا صورت گرفت و گزارش شد که میزان امژول خورشیدی معادل ورودی‌های محیطی تجدیدپذیر برای نظام تجاری و معیشتی کلزا برابر با $10^{15} \times 1/99$ و $10^{15} \times 1/80$ امژول خورشیدی در هکتار بوده است (Amiri et al., 2019). مقایسه سهم ورودی‌های محیطی تجدیدپذیر از کل امرژی ورودی پژوهش حاضر با پژوهش‌هایی برای محصول سویا در شهرستان‌های آق‌قلا و علی‌آباد کتول (Asdkhani et al., 2024) و محصول کلزا در شهرستان گرگان (Shahhoseini & Kazemi, 2022) که به ترتیب برابر با $1/04$ ، $0/99$ و $8/89$ درصد بوده است، با مقدار محاسبه‌شده برای کاملینا ($2/70$ درصد) در محدوده‌ی مشابهی با سایر محصولات قرار دارد (شکل ۳). مقدار بالای امرژی حاصل از باران در مقایسه با سایر ورودی‌های محیطی تجدیدپذیر، عمدتاً به شرایط توپوگرافی منطقه، میزان بارندگی سالانه و تعداد روزهای بارانی در نواحی کشت این گیاه روغنی در استان لرستان مرتبط است. این عوامل باعث افزایش جریان انرژی نهفته در بارش‌های جوی شده و سهم بیشتری از کل ورودی‌های محیطی تجدیدپذیر را به خود اختصاص می‌دهند.

۳-۱-۲. ورودی‌های محیطی تجدیدناپذیر (N_0)

در این مطالعه ورودی‌های محیطی تجدیدناپذیر (N_0) شامل تلفات فرسایشی خاک و آب زیرزمینی بود. طبق جدول ۳ مقدار معادل کل امرژی ورودی‌های محیطی تجدیدناپذیر برابر با $10^{15} \times 6/88$ امژول خورشیدی در هکتار در سال بود که تلفات فرسایش خاک و آب زیرزمینی به ترتیب با $10^{15} \times 5/62$ و $10^{15} \times 1/26$ امژول خورشیدی در هکتار در سال سهمی حدود $64/87$ و $14/51$ از کل امرژی حمایت‌کننده نظام را دارا بودند. در پژوهشی توسط Lu & Campbell (2009) میزان امرژی تلفات فرسایش خاک در نظام‌های تولید میوه‌های گرمسیری و نیمه‌گرمسیری گواوا، وامپی و پاپایا در چین به ترتیب برابر با $10^{16} \times 1/32$ ، $10^{15} \times 8/93$ و $10^{15} \times 6/51$ امژول خورشیدی در هکتار بوده است که به ترتیب سهمی $21/36$ ، 20 و $11/2$ درصد از کل ورودی امرژی در این نظام‌ها را تشکیل می‌داد. میزان امرژی ورودی‌های محیطی تجدیدناپذیر در پژوهشی در سیستان برای گیاهان روغنی کلزا، گلرنگ و کنجد (شکل ۲) برابر $10^{16} \times 6/07$ ، $10^{16} \times 3/81$ و $10^{16} \times 3$ امژول خورشیدی در هکتار بود (Pordel et al., 2024). در شکل ۳ مقایسه‌ای از لحاظ سهم ورودی‌های محیطی تجدیدناپذیر پژوهش حاضر با گیاهان روغنی سویا توسط Asdkhani et al. (2024) و کلزا توسط Shahhoseini & Kazemi (2022) در استان گلستان صورت گرفته است. مقادیر سهم ورودی‌های محیطی تجدیدناپذیر برای سویا (در آق‌قلا و علی‌آباد کتول) و کلزا در گرگان برابر با $75/77$ ، $73/23$ و $9/06$ درصد بوده که بجز محصول کلزا این مقادیر در محدوده‌ای نزدیک به مقدار حاصل از پژوهش حاضر ($79/37$ درصد) قرار داشته است. سهم بالای ورودی‌های تجدیدناپذیر در این مطالعه نشان‌دهنده فشار اکولوژیکی بالای نظام کشت کاملینا در استان لرستان است که عمدتاً ناشی از کمبود منابع آبی، شدت فرسایش خاک و آلودگی زمین‌های کشاورزی می‌باشد.

میزان بالای تلفات مواد آلی خاک، فرسایش گسترده و بهره‌برداری بیش از حد از منابع آب زیرزمینی بیانگر این واقعیت است که تولید محصولات کشاورزی در این منطقه با هزینه‌های محیط‌زیستی قابل توجهی همراه است.

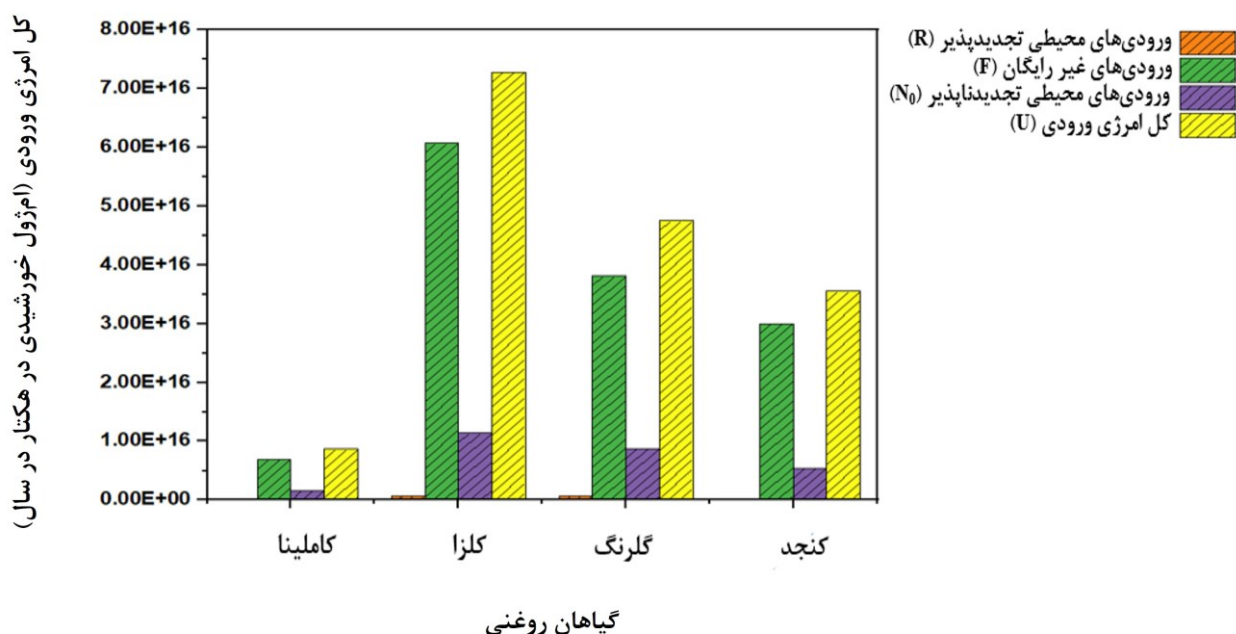
۳-۱-۳. ورودی‌های غیر رایگان (F_R و F_N)

ورودی‌های غیر رایگان در نظام مورد مطالعه شامل نیروی انسانی ($18/2$ ساعت-نفر)، ماشین‌ها، سوخت دیزل، کودهای شیمیایی (نیتروژن و فسفر)، علف‌کش و بذر مصرفی می‌باشند. مقدار انرژی کل به‌دست‌آمده حاصل از این ورودی‌ها همان‌طور که در جدول ۳ گزارش شده است برابر با $10^{15} \times 1/55$ ام‌ژول خورشیدی در هکتار در سال بود که $17/92$ درصد سهم آن‌ها از کل انرژی ورودی نظام کاملینا بود. سوخت دیزل و کود شیمیایی نیتروژن (ورودی‌های غیر رایگان تجدیدناپذیر) بیشترین اثرگذاری در معادل انرژی ورودی‌های غیر رایگان را به خود اختصاص داده بودند. مدیریت و مصرف بهینه ورودی‌های غیر رایگان به‌ویژه منابع تجدیدناپذیر، به‌منظور کنترل و کاهش وابستگی به این منابع در تولید محصول امری ضروری است (Lotfi et al., 2023). در پژوهشی انرژی معادل ورودی‌های غیر رایگان در سیستم برای کلزا، گلرنگ و کنجد (شکل ۲) با $10^{16} \times 1/14$ ، $10^{15} \times 8/78$ و $10^{15} \times 5/40$ ام‌ژول خورشیدی در هکتار با مقدار محاسبه‌شده برای کاملینا در پژوهش حاضر ($10^{15} \times 1/55$) ام‌ژول خورشیدی در هکتار) بیانگر وابستگی نظام‌های ذکر شده به ورودی‌های غیر رایگان بوده و برای حل این مشکل باید از طریق مدیریت بهینه ورودی‌ها مانند جایگزینی کودهای شیمیایی با کود آلی و روش‌های خاک‌ورزی مناسب با مناطق کشت این محصولات مدنظر قرار گیرد (Pordel et al., 2024).

جدول ۳. نتایج تحلیل انرژی و ساختار مصرف انرژی نظام تولید کاملینا (واحد در هکتار).

Table 3. Results of energy analysis and energy consumption structure of camelina production system (unit ha⁻¹).

منبع ضریب تبدیل خورشیدی	سهم انرژی	انرژی خورشیدی (sej)	ضریب تجدیدپذیری	ضریب تبدیل خورشیدی	جریان یک‌ساله	واحد	متغیر
ورودی‌های محیطی تجدیدپذیر							
(Shahhoseini et al., 2023)	۰/۵۵	$4/80 \times 10^{13}$	۱	۱	$4/80 \times 10^{13}$	ژول	نور خورشید
(Shahhoseini et al., 2023)	۲/۱۵	$1/86 \times 10^{14}$	۱	۱	$8/09 \times 10^9$	ژول	باران
(Shahhoseini et al., 2023)		$1/76 \times 10^{13}$	۱	۱	$9/38 \times 10^9$	ژول	باد
	۲/۷۰	$2/34 \times 10^{14}$					جمع
ورودی‌های محیطی تجدیدناپذیر							
(Ghaley et al., 2018)	۶۴/۸۷	$5/62 \times 10^{15}$	۰	۰	$5/97 \times 10^{10}$	ژول	فرسایش خاک
(Cuadra & Rydberg, 2006)	۱۴/۵۱	$1/26 \times 10^{15}$	۰	۰	$6/55 \times 10^9$	ژول	آب زیرزمینی
	۷۹/۳۸	$6/88 \times 10^{15}$					جمع
ورودی‌های غیر رایگان							
(Kohkan et al., 2017)	۰/۰۷	$5/98 \times 10^{12}$	۰/۱	۰/۱	$3/57 \times 10^7$	ژول	نیروی انسانی
(Shahhoseini et al., 2023)	۲/۶۲	$2/27 \times 10^{14}$	۰	۰	$2/68 \times 10^9$	ژول	سوخت دیزل
(Shahhoseini et al., 2023)	۰/۰۳	$2/47 \times 10^{12}$	۰	۰	$2/45 \times 10^2$	گرم	ماشین‌ها
(Mirshakari et al., 2021)	۱۳/۸۷	$1/2 \times 10^{15}$	۰	۰	$3/89 \times 10^4$	گرم	کود نیتروژن
(Brandt-Williams, 2002)	۰/۴۳	$3/75 \times 10^{13}$	۰	۰	$1/33 \times 10^3$	گرم	کود فسفات
(Mirshakari et al., 2021)	۰/۰۲	$1/89 \times 10^{12}$	۰	۰	1×10^2	گرم	علف‌کش
(Stolarski et al., 2019)	۰/۸۸	$7/63 \times 10^{13}$	۰	۰	$6/35 \times 10^6$	ژول	بذر
	۱۷/۹۲	$1/55 \times 10^{15}$					جمع
	۱۰۰	$8/67 \times 10^{15}$					جمع کل انرژی
خروجی (عملکرد محصول)							
(Stolarski et al., 2019)					$1/42 \times 10^{13}$	ژول	کاملینا
(Stolarski et al., 2019)					$2/14 \times 10^{13}$	ژول	کاه
(Stolarski et al., 2019)					$2/5 \times 10^4$	ژول بر گرم	انرژی تولید (AE)



شکل ۲. مقایسه ساختار امرژی ورودی نظام تولیدی کاملینا با سایر نظام‌های تولید گیاهان روغنی (Pordel *et al.*, 2024).

Figure 2. Comparison of the input energy structure of the camelina production system with other oilseed production systems (Pordel *et al.*, 2024).

در پژوهش‌هایی مقادیر سهم ورودی‌های غیر رایگان برای سویا در شهرستان‌های آق‌قلا و علی‌آباد کتول توسط Asdkhani *et al.* (2024) و کلزا در گرگان توسط Shahhoseini & Kazemi (2022) به‌ترتیب برابر با ۲۳/۱۹، ۲۵/۷۸ و ۸۲/۰۵ درصد بوده است (شکل ۳). در پژوهشی در کشور هند، تحلیل امرژی نظام‌های تولید بیودیزل و انرژی زیستی مبتنی بر گیاهان روغنی سویا، پونگامیا و جاتروفا و ساج مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش سهم ورودی‌های غیر رایگان از کل امرژی حمایت‌کننده نظام‌های ذکرشده به‌ترتیب برابر با ۹۲/۴۴ درصد، ۶۱ درصد، ۷۸/۷۷ درصد و ۹۷/۹۶ درصد گزارش شد (Edrisi *et al.*, 2022). سهم ورودی‌های غیر رایگان تجدیدپذیر این مطالعه شامل نیروی انسانی (۰/۰۷ درصد) و بذر (۰/۸۸ درصد)، نسبت به مقادیر بالاتر ورودی‌های غیر رایگان تجدیدناپذیر کمتر می‌باشد.

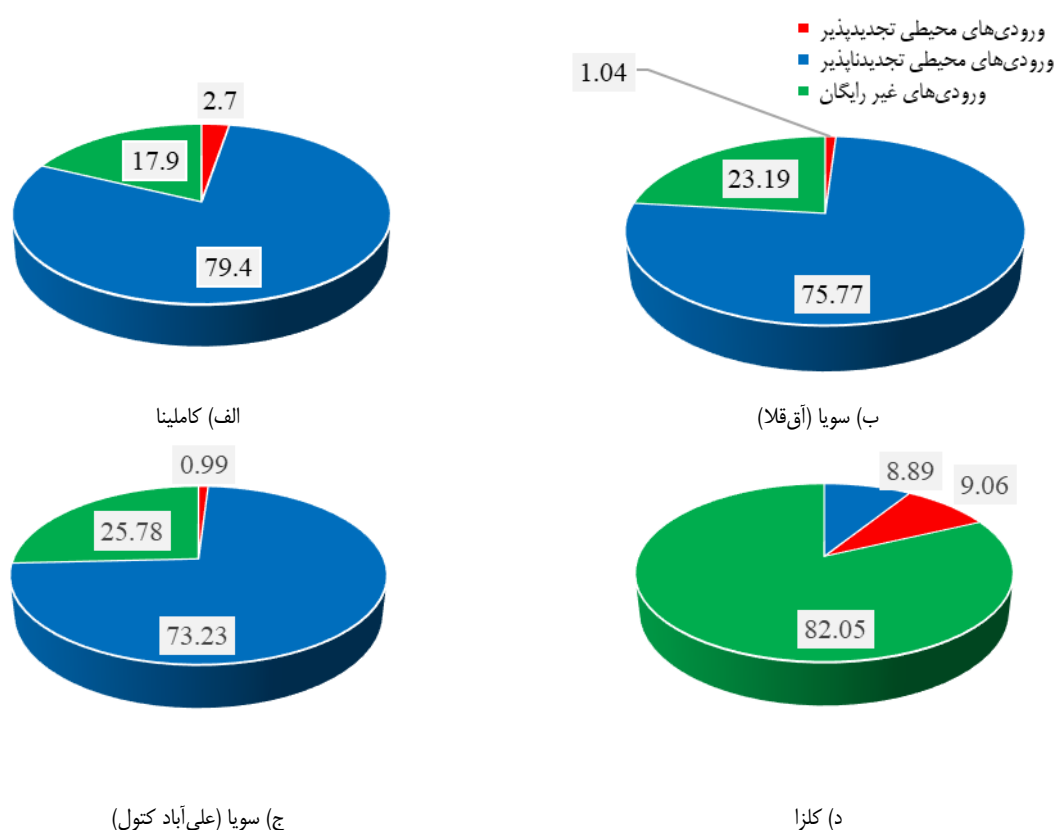
۲-۳. شاخص‌های مبتنی بر امرژی

شاخص‌های امرژی به‌عنوان معیاری برای ارزیابی کارایی مصرف نهاده‌ها، میزان پایداری، سهم منابع تجدیدپذیر و فشارهای محیطی بر نظام‌های تولیدی مورد استفاده قرار می‌گیرند. تحلیل این شاخص‌ها امکان شناسایی و کمی‌سازی اثرات محیطی و اقتصادی را فراهم کرده و نتایج حاصل از آن می‌تواند به‌عنوان راهنمایی برای کشاورزان و سیاست‌گذاران در جهت توسعه کشاورزی پایدار عمل کند (Jafari *et al.*, 2018). مقادیر شاخص‌های مبتنی بر امرژی پژوهش حاضر در جدول ۴ نمایش داده شده است.

۱-۲-۳. ضریب تبدیل (T_r) و امرژی ویژه (SE)

شاخص‌های ضریب تبدیل (T_r) و امرژی ویژه (SE) به‌عنوان مقادیر امرژی واحد، معیارهایی برای سنجش کارایی یک فرآیند تولیدی محسوب می‌شوند. کاهش مقادیر این شاخص‌ها نشان‌دهنده بهره‌وری بالاتر و عملکرد بهینه‌تر نظام است، زیرا میزان منابع مصرفی برای تولید محصول کاهش می‌یابد (Yang *et al.*, 2013). مقادیر شاخص‌های ضریب تبدیل و امرژی ویژه برای نظام تولید کاملینا طبق جدول ۴ به‌ترتیب $10^{-8} \times 2/11$ ام‌ژول خورشیدی بر ژول $4/57 \times 10^{-9}$ ام‌ژول خورشیدی بر گرم محاسبه شد. در کشور آمریکا مقدار شاخص ضریب تبدیل برای نظام‌های چندکشتی و تولید مکانیزه ذرت به‌ترتیب $10^{-5} \times 2/32$ و $10^{-4} \times 9/30$ ام‌ژول خورشیدی بر ژول گزارش شد (Martin *et al.*, 2006). همچنین مقدار این شاخص در شمال کشور چین

برای گندم برابر $۱۰.۵ \times ۱/۶۳$ امژول خورشیدی بر ژول بود (Wang *et al.*, 2014). در استان لرستان برای تولید دو نظام تجاری و معیشتی کلزا، شاخص ضریب تبدیل برابر $۱۰.۵ \times ۳/۰۸$ و $۱۰.۵ \times ۹/۴۸$ امژول خورشیدی بر ژول گزارش شد (Amiri *et al.*, 2019). همچنین مقدار شاخص امرژی ویژه برای نظام‌های تولید کلزا $۱۰.۱ \times ۹/۷۱$ ، گلرنگ $۱۰.۱ \times ۵/۵۳$ و کنجد $۱۰.۱ \times ۶/۴۶$ امژول خورشیدی بر گرم گزارش شد (Pordel *et al.*, 2024). به‌صورت کلی، شاخص امرژی ویژه محصول کاملینا نسبت به برخی محصولات مشابه دیگر دارای مقدار کمتری است که بیانگر بهره‌وری نسبی کاملینا در مقایسه با دیگر گیاهان روغنی است. این مقایسه نشان می‌دهد که نظام تولید کاملینا در مقایسه با سایر محصولات به‌ویژه در شرایط مشابه کشاورزی و منطقه‌ای، پتانسیل رقابتی قابل‌توجهی در بهینه‌سازی مصرف منابع و بهره‌وری دارد. این مقایسه همچنین بر لزوم توجه به توسعه روش‌های پایدار، مانند استفاده از کودهای آلی به‌منظور افزایش عملکرد و کاهش مصرف ورودی‌های تجدیدناپذیر تأکید می‌کند.



شکل ۳. سهم (درصد) ورودی‌های محیطی تجدیدپذیر، محیطی تجدیدناپذیر و غیر رایگان نظام تولید کاملینا با سایر نظام‌های تولید گیاهان روغنی (Asdkhani *et al.*, 2024; Shahhoseini & Kazemi, 2022).

Figure 3. Share (percentage) of renewable and non-renewable environmental and non-free inputs of the camelina production system compared to other oilseed production systems (Asdkhani *et al.*, 2024; Shahhoseini & Kazemi, 2022).

۳-۲-۲. تجدیدپذیری امرژی (%R)

شاخص تجدیدپذیری امرژی (%R) نمایانگر سهم منابع تجدیدپذیر در حمایت از یک نظام تولیدی می‌باشد (Odum *et al.*, 2000a). این شاخص، تجدیدپذیری ورودی‌های امرژی را به‌عنوان درصدی از کل ورودی‌ها نشان می‌دهد (Zhang & Long, 2010). به‌طور کلی، نظام‌های تولیدی زمانی پایدارتر هستند که بخش بزرگ‌تری از ورودی‌های امرژی از منابع تجدیدپذیر تأمین شود یا زمانی که فرآیندهای تولید از منابع تجدیدپذیر بیشتری استفاده کنند (La Rosa *et al.*, 2008). با کاهش مصرف ورودی‌های تجدیدناپذیر و افزایش بهره‌برداری از منابع تجدیدپذیر در یک نظام تولیدی، عملکرد آن در رقابت‌های اقتصادی در بلندمدت بهبود خواهد یافت زیرا منابع تجدیدناپذیر در طول زمان کمیاب‌تر می‌شوند (Amiri *et al.*, 2019). شاخص

تجدیدپذیر امرژی برای کاملینا ۳/۶۵ درصد محاسبه شد (جدول ۴). با کاهش سهم ورودی‌های تجدیدناپذیر در نظام حاضر شامل کودهای شیمیایی و سوخت دیزل می‌توان تجدیدپذیری و پایداری نظام را ارتقا بخشید. در واقع، افزایش سهم منابع تجدیدپذیر و کاهش وابستگی به منابع تجدیدناپذیر بهبود رقابت‌پذیری اقتصادی و در نتیجه تقویت پایداری نظام تولیدی را به ارمغان می‌آورد (Asgharipour *et al.*, 2020). در پژوهشی مقدار این شاخص برای تولید سویا در کشور برزیل ۳۵/۶ درصد محاسبه شد (Cavalett & Ortega, 2009). همچنین مقدار محاسبه‌شده شاخص تجدیدپذیری امرژی در پژوهش حاضر (۳/۶۵ درصد) مقدار بیشتری از ذرت با ۰/۱۷ درصد و گندم با ۰/۸۷ درصد و مقدار کمتری از پسته با ۳۵/۴ درصد و خرما با ۴۳/۲ درصد داشت (Houshyar *et al.*, 2018; Jafari *et al.*, 2018). سهم بیشتر از منابع تجدیدناپذیر خصوصاً تلفات ماده آلی خاک در نظام تولید کاملینا، باعث کاهش سهم منابع تجدیدپذیر شده و درصد تجدیدپذیری امرژی ورودی را کاهش داده است.

۳-۲-۳. نسبت عملکرد امرژی (EYR) و نسبت سرمایه‌گذاری امرژی (EIR)

شاخص نسبت عملکرد امرژی (EYR) از تقسیم کل امرژی مصرفی بر ورودی‌های غیر رایگان محاسبه می‌شود و معیاری برای ارزیابی توانایی یک فرآیند در جذب منابع محیطی به‌زای سرمایه‌گذاری در منابع اقتصادی است. هرچه مقدار این شاخص بیشتر باشد، نشان‌دهنده بازگشت بالاتر امرژی در مقابل امرژی سرمایه‌گذاری‌شده است (Chen *et al.*, 2006). این شاخص برای پژوهش حاضر ۰/۰۲ محاسبه شد (جدول ۴). این شاخص به‌دلیل اطلاعات ارزشمندی که در اختیار قرار می‌دهد، یکی از شاخص‌های اصلی تحلیل امرژی عنوان شده است. مقدار کم برای شاخص EYR بیانگر این است که در آن سهم منابع محیطی در یک نظام تولیدی در پایین‌ترین حد خود بوده و وابستگی به منابع اقتصادی در بالاترین سطح قرار دارد. بنابراین مقادیر بالاتر این شاخص مطلوب‌تر هستند (Asgharipour *et al.*, 2019). پژوهشی توسط Ren *et al.* (2013) مقدار شاخص عملکرد امرژی برای سویا، کلزا، آفتابگردان، پالم و جatroفا در کشور چین را به‌ترتیب ۱/۰۸، ۱/۰۴، ۱/۰۷، ۱/۰۱ و ۱/۰۰۶ به‌دست آورد. همچنین این شاخص محصول سیب‌زمینی در ایران توسط Shahhoseini *et al.* (2023) و در چین توسط Zhai *et al.* (2017)، ۱/۴۴ و ۱/۰۴ محاسبه شد.

شاخص نسبت سرمایه‌گذاری امرژی (EIR) نشان‌دهنده شدت سرمایه‌گذاری، سطح توسعه اقتصادی، میزان دسترسی به منابع محیطی و درجه وابستگی سیستم به منابع طبیعی محیط است. مقادیر پایین‌تر نسبت سرمایه‌گذاری امرژی بیانگر وابستگی بیشتر نظام به منابع محیطی، کاهش هزینه‌های اقتصادی و افزایش اتکا به منابع طبیعی به‌عنوان خروجی نظام هستند (Odum *et al.*, 2000a). این شاخص‌ها میزان سرمایه اقتصادی به‌کاررفته در فرآیند تولید را مشخص می‌کنند؛ بنابراین، مقادیر کمتر آن نشان‌دهنده وابستگی بیشتر نظام به محیط بوده و مطلوب‌تر است (Odum *et al.*, 2000a). طبق جدول ۴ مقدار این شاخص در نظام تولیدی کاملینا ۰/۲۱ برآورد شد. مقدار شاخص نسبت سرمایه‌گذاری امرژی (EIR) برای سویا، کلزا، آفتابگردان، پالم و جatroفا در کشور چین ۱۲/۲۰، ۲۶/۵۸، ۱۴/۴۱، ۶۹/۶۱ و ۱۷۱/۰۸ (Ren *et al.*, 2013) و برای نظام معیشتی و تجاری کلزا در خرم‌آباد لرستان، ۰/۷۶ و ۱/۸۶ گزارش شد (Amiri *et al.*, 2019). به‌صورت کلی مقایسه مقدار شاخص نسبت سرمایه‌گذاری امرژی (EIR) پژوهش حاضر با سایر پژوهش‌ها بیانگر این است که نظام تولیدی کاملینا در مقایسه با سایر پژوهش‌های مشابه وابستگی بیشتری به محیط داشته است.

۳-۲-۴. نسبت بار محیط‌زیستی (ELR) و نسبت بار محیط‌زیستی اصلاح‌شده (ELR*)

شاخص نسبت بار محیط‌زیستی (ELR) نسبت ورودی‌های غیر رایگان به ورودی‌های تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر محیطی را نشان می‌دهد (La Rosa *et al.*, 2008). شاخص نسبت بار محیط‌زیستی امرژی (ELR) به‌طور مستقیم با ورودی‌های تجدیدپذیر ارتباط دارد و میزان فشار محیطی وارده از نظام تولیدی در اثر تولید را نشان می‌دهد. مقادیر این شاخص کمتر از دو بیانگر فشار محیط کم، بین دو تا ۱۰ بیانگر فشار محیط متوسط و بیش از ۱۰ بیانگر فشار محیطی زیاد نظام تولیدی است (Brown & Uligiati, 2004). مقدار این شاخص طبق جدول ۴ برای نظام تولیدی کاملینا ۳۶ محاسبه شد که گویای فشار محیطی زیاد حاصل از نظام حاضر می‌باشد و علت اصلی آن سهم زیاد منابع تجدیدناپذیر محیطی مانند فرسایش خاک (۶۴/۸۷ درصد) از کل امرژی ورودی است. چنان‌چه کاهش شاخص ذکر شده مدنظر باشد می‌بایست سهم منابع تجدیدناپذیر

محیطی را کاهش داد و به سهم منابع تجدیدپذیر محیطی افزود که در این صورت نظام تولیدی فشار محیط‌زیستی کمتری را متحمل خواهد شد. در پژوهشی در استان لرستان مقدار شاخص ELR در چهار نظام مکانیزه، سنتی، حفاظتی و طبیعی محصول موسیر برابر با ۲۳/۷۰، ۲۶/۳۰، ۴۱/۶۹ و ۷/۴۳ بود (Amiri et al., 2021).

شاخص نسبت بار محیط‌زیستی اصلاح‌شده (ELR^*)، نسبت ورودی‌های خریداری‌شده و تجدیدناپذیر محیطی بر ورودی‌های تجدیدپذیر محیطی در نظام تولیدی را نشان می‌دهد. در واقع، این شاخص معیاری معکوس برای سنجش پایداری نظام بوده و بیانگر میزان خدمات محیط‌زیستی مورد استفاده در فرآیند تولید است (Campbell & Garmestani, 2012). مقدار شاخص ELR^* در پژوهش حاضر ۲۶/۴ است. تفاوت شاخص ELR از شاخص ELR^* جابجایی ورودی‌های تجدیدپذیر غیر رایگان از صورت کسر در ELR به مخرج کسر در ELR^* است. به دلیل سهم بسیار کم منابع اقتصادی تجدیدپذیر در کل ورودی امرژی نظام زراعی کاملینا، مقادیر این دو شاخص در این نظام تولید تفاوت کمی داشت (جدول ۴). بنابراین، راهکارهای پیشنهادی برای کاهش مقدار ELR به‌ویژه کاهش مصرف ورودی‌های تجدیدناپذیر، می‌تواند به کاهش مقدار ELR^* نیز کمک کند. این شاخص بر عدم تعادل بین منابع تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر تأکید داشته و به‌عنوان مکملی برای شاخص ضریب تبدیل (T_r) مطرح می‌شود (Martin et al., 2006). در حالت کلی، افزایش سهم منابع تجدیدپذیر چه در ورودی‌های محیطی و چه در ورودی‌های غیر رایگان، باعث کاهش فشار محیط‌زیستی و افزایش پایداری نظام تولیدی می‌شود.

۳-۲-۵. نسبت خودحمایتی امرژی (ESR)

شاخص خودحمایتی امرژی (ESR) بیانگر توانایی یک نظام در حفظ پایداری و میزان وابستگی آن به منابع محیطی است. بنابراین، مقادیر بالاتر آن نشان‌دهنده پایداری بیشتر و شرایط مطلوب‌تر نظام تولیدی می‌باشد (Xi & Qin, 2009). مقدار ESR در پژوهش حاضر طبق جدول ۴ برابر ۲۰۰ است که بسیار بیشتر از مقدار گزارش شده ۰/۰۳ برای سیب‌زمینی در چین (Zhai et al., 2017) است. افزایش این شاخص در نظام مورد بررسی نشان‌دهنده وابستگی کم این نظام به منابع محیطی و همچنین پتانسیل ضعیف آن برای افزایش بهره‌وری و سرمایه‌گذاری اقتصادی است. با استفاده از روش‌های نوین مدیریت مزرعه ضمن افزایش عملکرد اقتصادی محصول، بایستی میزان تلفات فرسایشی خاک در مناطق کشت این محصول را کاهش داد تا نظام از نظر وابستگی به منابع محیطی بهبود پیدا کند.

۳-۲-۶. پایداری محیط‌زیستی (ESI) و پایداری محیط‌زیستی اصلاح‌شده (ESI^*)

دو شاخص پایداری محیط‌زیستی (ESI) و پایداری محیط‌زیستی اصلاح‌شده (ESI^*) برای ارزیابی پایداری نظام‌ها استفاده می‌شوند. به‌طور کلی، دو شاخص پایداری ESI و ESI^* اصلاح‌شده برای تحلیل فرآیندهایی به کار می‌روند که هدف آن‌ها بهره‌برداری حداکثری از ورودی‌های محیطی، همراه با کمترین اثرات و تنش‌های محیطی است. این شاخص‌ها معیارهایی برای ارزیابی تعادل بین بهره‌وری اقتصادی و حفظ منابع طبیعی به شمار می‌آیند (Ortega et al., 2002). این شاخص‌ها پایداری نظام را از نظر اقتصادی و محیطی ارزیابی می‌کنند. در واقع وضعیت شاخص پایداری محیط‌زیستی (ESI) یک نظام تولیدی، به شاخص‌های نسبت عملکرد امرژی (EYR) و نسبت بار محیط‌زیستی (ELR) وابسته است. مقادیر این شاخص‌ها کمتر از یک بیانگر عدم پایداری، بین یک تا پنج نیمه‌پایداری و بیشتر از پنج بیانگر وضعیت پایدار می‌باشد (Hu et al., 2010). طبق جدول ۴ مقدار شاخص‌های ESI^* و ESI در این پژوهش، بسیار کمتر از یک به‌دست آمد. مقادیر این شاخص‌ها نشان‌دهنده وضعیت ناپایدار برای نظام مورد مطالعه بود. دلیل اصلی پایداری پایین، مصرف بالای ورودی‌ها مانند کودهای شیمیایی و تلفات ماده آلی خاک به عنوان ورودی‌های تجدیدناپذیر بود (سهم بسیار زیادی از ورودی‌های غیر رایگان در نظام، مربوط به این موضوع است). علاوه بر این، روش خاک‌ورزی مرسوم، مصرف سوخت‌های فسیلی به عنوان ورودی تجدیدناپذیر را افزایش داده است. گسترش روش‌های خاک‌ورزی حفاظتی میان کشاورزان و استفاده از مقدار و اندازه مناسب بذر، روش مناسبی برای کاهش بارگذاری محیطی و افزایش پایداری نظام زراعی کاملینا است. به‌صورت کلی آموزش کشاورزان در پذیرش این روش‌ها و دستیابی به توسعه پایدار بسیار مؤثر است (Lazar & Chithra, 2022). در پژوهشی شاخص پایداری محیط‌زیستی (ESI) و پایداری محیط‌زیستی

اصلاح شده (ESI^*) برای نظام تولید غیرفشرده لوبیا برابر 0.08 و $1/48$ محاسبه شد (Asgharipour *et al.*, 2019). مقادیر ESI و ESI^* برای نظام معیشتی و تجاری کلزا 0.87 ، $1/38$ ، 0.73 و 0.75 بود (Amiri *et al.*, 2019).

۳-۲-۷. شاخص امرژی ایمنی محصولات کشاورزی (EIPS)

شاخص امرژی ایمنی محصولات کشاورزی (EIPS)، معیاری برای ارزیابی پایداری نظام‌های تولیدی است که به نسبت استفاده از منابع تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر محیطی توجه دارد. مقادیر بالای این شاخص نشان‌دهنده وابستگی بیشتر به منابع تجدیدپذیر و پایداری بیشتر نظام تولیدی است؛ درحالی‌که مقادیر پایین‌تر آن نمایانگر اتکای بیشتر به منابع تجدیدناپذیر و فشار بالاتر بر محیط‌زیست است. این شاخص در مطالعات کشاورزی و صنعتی به منظور ارزیابی کارایی و پایداری فرآیندها به کار می‌رود (Guo *et al.*, 2023). طبق جدول ۴ شاخص امرژی ایمنی محصولات کشاورزی (EIPS)، برابر یک بود که به دلیل استفاده زیاد نظام تولیدی حاضر از منابع تجدیدپذیر محیطی مانند باران، می‌توان ادعا کرد نظام تولیدی کاملینا پایداری مطلوبی را از این منظر دارا می‌باشد. در پژوهشی در چین، مقدار میانگین کلی شاخص EIPS برای تولید سبزیجات در استان‌های مختلف چین برابر با 0.921 گزارش شد (Guo *et al.*, 2023). همچنین در ارزیابی شاخص EIPS در نظام‌های تلفیقی برنج-گندم و برنج-سبزیجات در شانگهای چین، مقدار EIPS به ترتیب 1 و 0.34 بود (Xi & Qin, 2009).

جدول ۴. مقادیر شاخص‌های مبتنی بر امرژی نظام تولید کاملینا.

Table 4. Values of energy-based indicators of the camelina production system.

شاخص	رابطه	واحد	مقدار
ورودی‌های محیطی تجدیدپذیر	R	امژول خورشیدی بر ژول	$2/34 \times 10^{14}$
ورودی‌های محیطی تجدیدناپذیر	N_0	امژول خورشیدی بر ژول	$6/88 \times 10^{15}$
ورودی‌های غیر رایگان تجدیدپذیر	F_R	امژول خورشیدی بر ژول	$8/22 \times 10^{13}$
ورودی‌های غیر رایگان تجدیدناپذیر	F_N	امژول خورشیدی بر ژول	$1/47 \times 10^{15}$
کل امرژی ورودی	$U = R + N_0 + F_R + F_N$	امژول خورشیدی بر ژول	$8/67 \times 10^{15}$
کل امرژی خروجی	Y	امژول خورشیدی بر ژول	$3/56 \times 10^{13}$
ضریب تبدیل	$T_r = U/AE$	امژول خورشیدی بر ژول	$2/11 \times 10^8$
امرژی ویژه	$SE = U/W^*$	امژول خورشیدی بر گرم	$4/57 \times 10^9$
تجدیدپذیری امرژی	$\%R = (R + F_R)/U$	درصد	$3/65$
نسبت عملکرد امرژی	$EYR = Y/F_R + F_N$	-	0.02
نسبت سرمایه‌گذاری امرژی	$EIR = (F_R + F_N)/(R + N_0)$	-	0.21
نسبت بار محیط‌زیستی	$ELR = (N_0 + F_R + F_N)/R$	-	36
نسبت بار محیط‌زیستی اصلاح‌شده	$ELR^* = (N_0 + F_N)/(R + F_R)$	-	$26/4$
نسبت خودحمایتی امرژی	$ESR = (R + N_0)/Y$	-	200
پایداری محیط‌زیستی	$ESI = (EYR/ELR)$	-	$5/55 \times 10^{-4}$
پایداری محیط‌زیستی اصلاح‌شده	$ESI^* = (EYR/ELR^*)$	-	$7/57 \times 10^{-4}$
شاخص امرژی ایمنی محصولات کشاورزی	$EIPS = 1 - [(C/F_R + F_N)]$	-	1

*. بیانگر جرم در دسترس محصولات تولیدی (دانه و کاه کاملینا) نظام می‌باشد و مقدار مجموع آن 1898670 گرم است.

۳-۳. تحلیل اقتصادی

هزینه نهاده‌ها و سهم هر کدام از هزینه کل در تولید کاملینا در استان لرستان در جدول ۵ نشان داده شده است. بر اساس نتایج، هزینه کل تولید $85838/14$ هزار ریال بر هکتار محاسبه شد. همچنین هزینه‌های اجاره زمین و داشت با $41/54$ و 0.9 درصد به ترتیب بیشترین و کمترین سهم از هزینه کل تولید کاملینا در استان لرستان را به خود اختصاص دادند. مقدار شاخص هزینه کل در تولید کاملینا در کشور اوکراین، 151 دلار بر هکتار به دست آمد (Hryhoriv *et al.*, 2022). همچنین در پژوهشی مقدار هزینه کل در نظام‌های تولید کلزا، گلرنگ و کنجد در سال زراعی $1399-1400$ در منطقه سیستان، به ترتیب 41500 ، 38200 و 26000

هزار ریال بر هکتار گزارش شد که نتایج حاکی از کمتر بودن مقدار هزینه کل در نظام تولید کنبج نسبت به دو نظام دیگر بود (Pordel et al., 2024).

جدول ۵. هزینه نهاده‌ها و سهم هر کدام از هزینه کل در تولید کاملینا.

Table 5. Input costs and their share of the total cost in camelina production.

هزینه نهاده‌ها	مقدار (هزار ریال بر هکتار)	درصد
اجاره زمین	۳۵۶۶۰/۲۲	۴۱/۵۴
آماده‌سازی زمین	۱۲۵۶۹/۷۲	۱۴/۶۴
کاشت	۱۴۷۶۶/۱۴	۱۷/۲
داشت	۷۶۹/۴	۰/۹
برداشت و حمل و نقل	۲۲۰۷۲/۶۶	۲۵/۷۲
هزینه کل	۸۵۸۳۸/۱۴	۱۰۰

شاخص‌های اقتصادی در تولید کاملینا در استان لرستان در جدول ۶ نشان داده شده است. طبق نتایج درآمد کل حاصل از تولید کاملینا با توجه به قیمت فروش، ۱۵۲۵۲۷/۴۹ هزار ریال بر هکتار می‌باشد. سود خالص که از تفاضل هزینه کل از درآمد کل به‌دست می‌آید، ۶۶۶۸۹/۳۵ هزار ریال بر هکتار برآورد شد که نشان‌دهنده سوددهی تولید کاملینا در استان بوده است. قیمت تمام‌شده و بهره‌وری اقتصادی محصول به‌ترتیب ۱۵۰۶۹۹ ریال بر کیلوگرم و ۳/۷۳ کیلوگرم بر میلیون ریال به‌دست آمد. همچنین نسبت فایده به هزینه، درصد بازده فروش و درصد بازگشت سرمایه محصول به‌ترتیب ۱/۷۲، ۴۳/۷۲ و ۷۷/۶۹ محاسبه شد. مقدار سود خالص و نسبت فایده به هزینه (سود خالص به هزینه کل) در تولید کاملینا در کشور اوکراین به‌ترتیب ۱۵۸ دلار بر هکتار و ۱/۰۴ گزارش شد (Hryhoriv et al., 2022). همچنین مقدار سود خالص و نسبت فایده به هزینه در نظام‌های تولید کلزا، گلرنگ و کنبج در سال زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ در منطقه سیستان، به‌ترتیب ۴۱۰۰۰، ۳۴۹۰۰ و ۱۰۳۲۵۰ هزار ریال بر هکتار و ۰/۹۹، ۰/۹۱ و ۳/۹۷ برآورد شد که نشان‌دهنده اقتصادی‌تر بودن تولید کنبج نسبت به کلزا و گلرنگ در منطقه سیستان بود (Pordel et al., 2024).

جدول ۶. شاخص‌های اقتصادی در تولید کاملینا.

Table 6. Economic indicators in camelina production.

شاخص	واحد	مقدار
قیمت فروش	ریال بر کیلوگرم	۲۶۷۷۸۰
درآمد کل	هزار ریال بر هکتار	۱۵۲۵۲۷/۴۹
سود خالص	هزار ریال بر هکتار	۶۶۶۸۹/۳۵
قیمت تمام‌شده	ریال بر کیلوگرم	۱۵۰۶۹۹
بهره‌وری اقتصادی	کیلوگرم بر میلیون ریال	۳/۷۳
نسبت فایده به هزینه	-	۱/۷۲
درصد بازده فروش	-	۴۳/۷۲
درصد بازگشت سرمایه	-	۷۷/۶۹

۴. نتیجه‌گیری

این پژوهش به منظور ارزیابی سلامت اکولوژیکی و بهره‌وری استفاده از نهاده‌ها در نظام تولید گیاه روغنی کاملینا در استان لرستان با استفاده از روش‌های تحلیل امرژی و اقتصادی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که نظام مورد بررسی وابستگی قابل توجهی به ورودی‌های محیطی تجدیدنپذیر دارد که می‌تواند بر پایداری محیط‌زیستی آن تأثیر بگذارد. نتایج تحلیل امرژی نشان داد که کل امرژی ورودی نظام مورد بررسی در استان لرستان برابر $۱۰^{۱۵} \times ۸/۶۷$ امژول خورشیدی در هکتار

در سال بود که بیشترین و کمترین سهم از امرژی ورودی کل به ترتیب مربوط به ورودی‌های محیطی تجدیدپذیر با ۷۹/۳۸ درصد و ورودی‌های محیطی تجدیدپذیر با ۲/۷۰ درصد بود. مقدار مهم‌ترین شاخص‌های مبتنی بر امرژی در این پژوهش شامل تجدیدپذیری امرژی (%R)، نسبت عملکرد امرژی (EYR)، نسبت بار محیط‌زیستی (ELR)، نسبت خودحمایتی امرژی (ESR) و امرژی ایمنی محصولات کشاورزی (EIPS) به ترتیب برابر ۳/۶۵، ۰/۰۲، ۳۶، ۲۰۰ و یک برآورد شد. در بررسی اقتصادی، نسبت فایده به هزینه در نظام تولید کاملینا ۱/۷۲ محاسبه شد که نشان‌دهنده سوددهی کشت این محصول در استان بوده است؛ در نتیجه کاملینا می‌تواند به عنوان یک گزینه مناسب از گیاهان روغنی برای کشت در نظر گرفته شود. با این حال، اجرای راهکارهایی همچون جایگزینی کودهای شیمیایی با کودهای آلی و بیولوژیک، کاهش مصرف سوخت دیزل از طریق بهینه‌سازی عملیات زراعی و استفاده از روش‌های خاک‌ورزی حفاظتی و اقداماتی نظیر افزایش پوشش گیاهی و استفاده از تناوب زراعی مناسب به منظور کاهش فرسایش خاک، می‌تواند علاوه بر کاهش هزینه‌های عملیاتی تأثیر قابل توجهی بر افزایش بهره‌وری، سلامت اکولوژیکی و بهبود پایداری محیط‌زیستی و اقتصادی کشت کاملینا داشته باشد.

۵. منابع

- Abbona, E.A., Sarandón, S.J., Marasas, M.E., & Astier, M. (2007). Ecological sustainability evaluation of traditional management in different vineyard systems in Berisso, Argentina. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 119(3-4), 335-345.
- Agostinho, F., Diniz, G., Siche, R., & Ortega, E. (2008). The use of emergy assessment and the Geographical Information System in the diagnosis of small family farms in Brazil. *Ecological Modelling*, 210(1-2), 37-57.
- Amiri, Z., Asgharipour, M.R., Campbell, D.E., & Armin, M. (2019). A sustainability analysis of two rapeseed farming ecosystems in Khorramabad, Iran, based on emergy and economic analyses. *Journal of Cleaner Production*, 226, 1051-1066.
- Amiri, Z., Asgharipour, M.R., Campbell, D.E., Azizi, K., Kakolvand, E., & Moghadam, E.H. (2021). Conservation agriculture, a selective model based on emergy analysis for sustainable production of shallot as a medicinal-industrial plant. *Journal of Cleaner Production*, 292, 126000.
- Anonymous (2023). Statistical yearbook of Lorestan province. Deputy of statistics and information, management and planning organization of Lorestan province.
- Asadi, H., Gholzardi, F., & Zamaniyan, M. (2024). Economic evaluation of the intercropping of forage sorghum and berseem clover in Alborz province. *Plant Production and Genetics*, 5(1), 91-100. (In Persian).
- Asdkhani, E., Ramroudi, M., Asgharipour, M.R., & Shahhoseini, H. (2024). Evaluation and comparison of the efficiency and sustainability of soybean production in Aq Qala and Aliabad-e-Katul counties based on the emergy analysis technique. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 34(4), 275-291. (In Persian).
- Asgharipour, M.R., Amiri, Z., & Campbell, D.E. (2020). Evaluation of the sustainability of four greenhouse vegetable production ecosystems based on an analysis of emergy and social characteristics. *Ecological Modelling*, 424, 109021.
- Asgharipour, M.R., Shahgholi, H., Campbell, D.E., Khamari, I., & Ghadiri, A. (2019). Comparison of the sustainability of bean production systems based on emergy and economic analyses. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191, 1-21.
- Brandt-Williams, S.L. (2002). Handbook of emergy evaluation: A compendium of data for emergy computation issued in a series of Folios. *Center for Environmental Policy Environmental Engineering Science. University of Florida, Gainesville*.
- Brown, M.T., & Ulgiati, S. (2004). Energy quality, emergy, and transformity: HT Odum's contributions to quantifying and understanding systems. *Ecological Modelling*, 178(1-2), 201-213.
- Campbell, D.E., & Garmestani, A.S. (2012). An energy systems view of sustainability: Emergy evaluation of the San Luis Basin, Colorado. *Journal of Environmental Management*, 95(1), 72-97.
- Cavalett, O., & Ortega, E. (2009). Emergy, nutrients balance, and economic assessment of soybean production and industrialization in Brazil. *Journal of Cleaner Production*, 17(8), 762-771.
- Chen, G., Jiang, M., Chen, B., Yang, Z., & Lin, C. (2006). Emergy analysis of Chinese agriculture. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 115(1-4), 161-173.
- Cochran, J. (2003). Patterns of sustainable agriculture adoption/non-adoption in Panamá.
- Cuadra, M., & Rydberg, T. (2006). Emergy evaluation on the production, processing and export of coffee in Nicaragua. *Ecological Modelling*, 196(3-4), 421-433.

- Edrisi, S.A., Sahiba, S.A., Chen, B., & Abhilash, P.C. (2022). Emergy-based sustainability analysis of bioenergy production from marginal and degraded lands of India. *Ecological Modelling*, 466, 109903.
- Ghaley, B.B., Kehli, N., & Mentler, A. (2018). Emergy synthesis of conventional fodder maize (*Zea mays* L.) production in Denmark. *Ecological Indicators*, 87, 144-151.
- Ghaley, B.B., & Porter, J.R. (2013). Emergy synthesis of a combined food and energy production system compared to a conventional wheat (*Triticum aestivum*) production system. *Ecological Indicators*, 24, 534-542.
- Guo, Y., Wang, H., Zhang, W., Chen, B., & Song, D. (2023). Sustainability evaluation of protected vegetables production in China based on emergy analysis. *Journal of Cleaner Production*, 388, 135928.
- Houshyar, E., Wu, X., & Chen, G. (2018). Sustainability of wheat and maize production in the warm climate of southwestern Iran: An emergy analysis. *Journal of Cleaner Production*, 172, 2246-2255.
- Hryhoriv, Y.Y., Butenko, A.O., Trotsenko, V.I., Onychko, V.I., Kriuchko, L.V., Hotvianska, A.S., Burdon, R.S., Tymchuk, D.S., Bondarenko, O.V., & Nozdrina, N.L. (2022). Economic and energy efficiency of growing *Camelina sativa* under conditions of precarpathians of Ukraine. *Modern Phytomorphology*, 16, 15-20.
- Hu, S., Mo, X., Lin, Z., & Qiu, J. (2010). Emergy assessment of a wheat-maize rotation system with different water assignments in the North China Plain. *Environmental Management*, 46, 643-657.
- Jafari, M., Asgharipour, M.R., Ramroudi, M., Galavi, M., & Hadarbadi, G. (2018). Sustainability assessment of date and pistachio agricultural systems using energy, emergy and economic approaches. *Journal of Cleaner Production*, 193, 642-651.
- Kohkan, S.A., Ghanbari, A., Asgharipour, M., & Fakheri, B. (2017). Emergy evaluation of Yaghti grape of Sistan. *Journal of Arid Biome*, 7(2), 73-84. (In Persian).
- La Rosa, A.D., Siracusa, G., & Cavallaro, R. (2008). Emergy evaluation of Sicilian red orange production. A comparison between organic and conventional farming. *Journal of Cleaner Production*, 16(17), 1907-1914.
- Lazar, N., & Chithra, K. (2022). Role of culture in sustainable development and sustainable built environment: A review. *Environment, Development and Sustainability*, 24(5), 5991-6031.
- Lotfi, S., Kazemi, H., Kamkar, B., & Shahhoseini, H. (2023). Evaluating the sustainability indices for rapeseed (*Brassica napus* L.) production systems using emergy analysis (Case study: Kalaleh county, Golestan province). *Journal of Agroecology*, 15(2), 319-335. (In Persian).
- Lu, H.F., Cai, C.J., Zeng, X.S., Campbell, D.E., Fan, S.H., & Liu, G.L. (2018). Bamboo vs. crops: An integrated emergy and economic evaluation of using bamboo to replace crops in south Sichuan province, China. *Journal of Cleaner Production*, 177, 464-473.
- Lu, H., Bai, Y., Ren, H., & Campbell, D.E. (2010). Integrated emergy, energy and economic evaluation of rice and vegetable production systems in alluvial paddy fields: Implications for agricultural policy in China. *Journal of Environmental Management*, 91(12), 2727-2735.
- Lu, H., & Campbell, D.E. (2009). Ecological and economic dynamics of the Shunde agricultural system under China's small city development strategy. *Journal of Environmental Management*, 90(8), 2589-2600.
- Lu, H., Yuan, Y., Campbell, D.E., Qin, P., & Cui, L. (2014). Integrated water quality, emergy and economic evaluation of three bioremediation treatment systems for eutrophic water. *Ecological Engineering*, 69, 244-254.
- Martin, J.F., Diemont, S.A.W., Powell, E., Stanton, M., & Levy-Tacher, S. (2006). Emergy evaluation of the performance and sustainability of three agricultural systems with different scales and management. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 115(1), 128-140.
- Mirshekari, S., Dahmardeh, M., Asgharipour, M.R., Ghanbari, A., & Seyedabadi, E. (2021). Sustainability assessment of six crop production systems based on emergy and economic analysis in hirmand city. *Journal of Agroecology*, 13(3), 539-561. (In Persian).
- Odum, H.T., Brown, M., & Brandt-Williams, S. (2000a). Handbook of emergy evaluation. *A Compendium of Data for Emergy Computation. Folio*, 2.
- Odum, H.T., Brown, M.T., & Brandt-Williams, S. (2000b). Handbook of emergy evaluation. Folio# 1: Introduction and global budget. Gainesville: Center for environmental policy. *Environmental Engineering Sciences, University of Florida*, 7-8.
- Odum, H.T., & Odum, E.C. (1983). Emergy analysis overview of nations.
- Ortega, E., Anami, M., & Diniz, G. (2002). Certification of food products using emergy analysis. Proceedings of III International Workshop Advances in Emergy Studies,
- Pordel, N., Asgharipour, M.R., & Seyedabadi, E. (2024). Monitoring and accounting of ecological sustainability of Sistan's oil crop using emergy and economic indicators. *Journal of Agroecology*, 16(1), 159-179. (In Persian).
- Quintero-Angel, M., & González-Acevedo, A. (2018). Tendencies and challenges for the assessment of agricultural sustainability. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 254, 273-281.

- Ren, J., Manzardo, A., Mazzi, A., Fedele, A., & Scipioni, A. (2013). Emergy analysis and sustainability efficiency analysis of different crop-based biodiesel in life cycle perspective. *The Scientific World Journal*, 2013(1), 918514.
- Rostami Ahmadvandi, H., Kahrizi, D., Ghobadi, R., & Akbarabadi, A. (2021). Camelina, a unique oilseed with high tolerance to drought and cold. *Journal of Oilseed Plants*, 2(2), 63-73.
- Shahhoseini, H., Ramroudi, M., & Kazemi, H. (2023). Emergy analysis for sustainability assessment of potato agroecosystems (Case study: Golestan province, Iran). *Environment, Development and Sustainability*, 25(7), 6393-6418.
- Shahhoseini, H.R., & Kazemi, H. (2022). Evaluation of sustainability of rainfed rapeseed production in Gorgan County using Emergy analysis. *Journal of Emergy, Life Cycle and System Analysis in Agriculture*, 2(1), 61-70.
- Stolarski, M.J., Krzyżaniak, M., Tworkowski, J., Załuski, D., Kwiatkowski, J., & Szczukowski, S. (2019). Camelina and crambe production–Emergy efficiency indices depending on nitrogen fertilizer application. *Industrial Crops and Products*, 137, 386-395.
- Wang, J., Hou, D., Liu, Z., Tao, J., Yan, B., Liu, Z., Yang, T., Su, H., Tahir, M.H., & Chen, G. (2022). Emergy analysis of agricultural waste biomass for energy-oriented utilization in China: Current situation and perspectives. *Science of the Total Environment*, 849, 157798.
- Wang, X., Chen, Y., Sui, P., Gao, W., Qin, F., Zhang, J., & Wu, X. (2014). Emergy analysis of grain production systems on large-scale farms in the North China Plain based on LCA. *Agricultural Systems*, 128, 66-78.
- Xi, Y.G., & Qin, P. (2009). Emergy evaluation of organic rice-duck mutualism system. *Ecological Engineering*, 35(11), 1677-1683.
- Yang, Q., Chen, G., Liao, S., Zhao, Y., Peng, H., & Chen, H. (2013). Environmental sustainability of wind power: An emergy analysis of a Chinese wind farm. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 25, 229-239.
- Yasini, H., Ghanbari, S.A., Asgharipour, M.R., & Seyedabadi, E. (2020). Evaluation of sustainability in wheat, onion and garlic cropping systems by joint use of emergy and economic accounting. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 30(2), 269-288. (In Persian).
- Zadehdabagh, N., Monavari, S.M., Kargari, N., Taghavi, L., & Pirasteh, S. (2022). Sustainability of agroecosystems by indices: A comparative study between indicators of ecological footprint sustainability and emergy analysis; a case study in Dez catchment, Iran. *Ecological Modelling*, 474, 110165.
- Zand, M., Miri, M., Damizadeh, M., & Porhemmat, J. (2022). Assessment of drought impact on irrigated agriculture in Lorestan province. *Journal of Rainwater Catchment Systems*, 10(1), 67-79. (In Persian).
- Zhai, X., Huang, D., Tang, S., Li, S., Guo, J., Yang, Y., Liu, H., Li, J., & Wang, K. (2017). The emergy of metabolism in different ecosystems under the same environmental conditions in the agro-pastoral ecotone of Northern China. *Ecological Indicators*, 74, 198-204.
- Zhang, G., & Long, W. (2010). A key review on emergy analysis and assessment of biomass resources for a sustainable future. *Energy Policy*, 38(6), 2948-2955.