

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 حاجی‌احمد^۴ | رسول لقمانپور زرینی^۵

۱. گروه تحقیقات فنی و مهندسی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی لرستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، خرم‌آباد، ایران. رایانامه: M.sepahvand@areeo.ac.ir
۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: Khanali@ut.ac.ir
۳. گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: Ali.ghahremani79@ut.ac.ir
۴. گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشکده‌گان 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

چکیده

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 (*Camelina sativa*) در استان لرستان انجام گرفت. 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.

واژه‌های کلیدی: ام‌ژول خورشیدی، پایداری، تحلیل اقتصادی، رویکرد امرژی، فشار محیط‌زیستی

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 Agriculture, 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 Agriculture, 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 Agriculture, 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

Abstract

Integrating emergy and economic analysis by simultaneously assessing environmental impacts and production costs provides a comprehensive perspective on the efficiency of agricultural systems. The present study aimed to Evaluation of emergy and economic indices in the camelina (*Camelina sativa* L.) production system in Lorestan province, Iran. The required information was collected through a questionnaire and face-to-face interviews with 69 camelina farmers for the 2022-2023 cropping year. Based on the results, the average total supporting emergy was determined to be $8.67E+15$ solar emjoules per hectare per year. The highest share of emergy input was attributed to non-renewable environmental inputs (N_0), including soil erosion losses (64.87%) and groundwater use (14.51%). The system's dependence on non-renewable environmental inputs significantly impacted environmental sustainability. Emergy indices showed that while *Camelina sativa* has economic advantages, optimal use of resources is essential to reduce environmental pressure. From the perspective of economic efficiency, the benefit to cost ratio was determined to be 1.78, indicating the profitability of this product. However, to strengthen the economic potential of *Camelina sativa* cultivation in the province, improving resource management, using renewable energy (solar and wind), and reducing dependence on chemical fertilizers and fossil fuels can help increase its profitability and sustainability.

Keywords: Economic analysis, Emergy approach, Environmental pressure, Solar emergy joule, Sustainability

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 همین منظور، 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 به صورت اختصاصی و یا به صورت 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 انجام شده 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 & Ulgiati, 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 اقتصادی کردن کشاورزی، ایجاد اشتغال جدید و پایدار باشد. این گیاه در برخی از استان‌های کشور در شرایط دیم کشت و عملکرد رضایت بخشی داشته است و به کشاورزان توصیه می‌شود که زمین‌های آیش و دیم‌زارها را خالی رها نکنند و این گیاه کم توقع 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 به دلیل نادیده گرفتن سهم عوامل طبیعی و رایگان محیطی در بوم‌نظام کشاورزی، از دقت کافی برخوردار نیستند. به منظور جبران این چالش، مطالعه حاضر در قالب یک دیدگاه طبیعت محور، شاخص انرژی 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 خریداری شده و خدمات را مورد ارزیابی قرار داده و پایداری یک بوم‌نظام کشاورزی از لحاظ مصرف انرژی را ممیزی و تعیین می‌کند. به‌طوری که می‌توان با محاسبه شاخص‌های انرژی مطابق با اصل حداکثر توانمندسازی، کارایی منابع اقتصادی مصرفی در تولیدات کشاورزی را بهبود بخشید تا حداکثر استفاده بهینه از منابع انرژی به دست آید و به سازماندهی نظام برای تولید و از بین بردن کمبودها و قیود اقدام کرد.

با استفاده شاخص انرژی و تحلیل آن، تحقیقات مختلفی در ارتباط با انرژی‌های ورودی و ارزیابی پایداری محصولات و نظام‌های کشاورزی انجام شده است. محققین دانمارکی طی مطالعه‌ای از تحلیل انرژی جهت مقایسه ارزیابی پایداری نظام ترکیبی غذا و انرژی با نظام تولید گندم معمولی به منظور 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 به طور قابل توجهی نیاز به منابع خریداری شده 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، سه مزرعه با روش‌های مدیریتی مختلف از نظر نوع و میزان نهاده‌ها به ویژه توسط پایش فرسایش خاک به‌عنوان ورودی تجدیدنپذیر، به کمک تحلیل انرژی، برنامه حوزه آبخیز طراحی گردید. در نهایت، نظامی که از ورودی‌های خریداری شده و شیمیایی کم‌تری استفاده نموده و تعامل بهتری با محیط‌زیست داشت، پایدارتر اعلام گردید (Agostinho *et al.*, 2008). در تحقیقی دیگر، مقایسه سه نظام مختلف کشاورزی با توجه به منابع، بهره‌وری، اثرات محیط‌زیستی و پایداری کلی برای سه نظام کشت ذرت، شاه‌توت و کشت ترکیبی در ایالات مختلف آمریکا بر اساس تحلیل انرژی 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 نهاده، ۹۵ درصد از ورودی‌های خریداری شده این نظام را تشکیل می‌دادند. همچنین نتایج این تحقیق حاکی از آن بود که نظام کشت ترکیبی بومی، بیشترین وابستگی به منابع تجدیدنپذیر 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 در پیرامون تحلیل انرژی 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 انرژی، ورودی‌های خریداری شده بیشترین سهم را به خود اختصاص داده‌اند. همچنین نهاده‌های کود نیتروژن و فسفات بیشترین مصرف انرژی را داشتند (Asgharipour *et al.*, 2019). مطالعه‌ای با هدف محاسبه میزان پایداری اکولوژیکی نظام‌های کشاورزی تولید دانه‌های روغنی استان سیستان و بلوچستان با تحلیل انرژی مورد ارزیابی قرار گرفت. میزان انرژی کل نظام‌های تولید کلزا، گلرنگ و کنجد به‌ترتیب $10^{16} \times 7/28$ ، $10^{16} \times 4/75$ و $10^{16} \times 3/55$ ام‌ژول خورشیدی بر هکتار برآورد شد. از این بین بیش‌ترین سهم از ورودی انرژی کل در هر سه نظام کشت در منطقه مورد مطالعه مربوط به به ورودی‌های تجدیدنپذیر محیطی بود که سهم آن برای نظام‌های تولید کلزا، گلرنگ و کنجد برابر $42/83$ درصد، $11/80$ درصد و $41/84$ درصد به‌دست آمد (Pordel *et al.*, 2024). نتایج مقایسه سه نظام تولیدی سیر، پیاز و گندم بر اساس ارزیابی شاخص‌های انرژی 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 کیلومتر مربع در ناحیه جنوب غربی 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).

۲-۱. جمع‌آوری داده‌ها

به منظور محاسبه شاخص‌های امرژی و اقتصادی در این مطالعه، ابتدا تمامی جریان‌های ورودی تولید محصول کاملینا طی سال ۱۴۰۱-۰۲ در سه دسته‌بندی ورودی‌های محیطی رایگان تجدیدپذیر، ورودی‌های محیطی رایگان تجدیدنپذیر و ورودی‌های غیر رایگان طبقه‌بندی می‌شوند. ورودی‌های محیطی رایگان تجدیدپذیر شامل نور خورشید، باد و باران؛ ورودی‌های محیطی رایگان تجدیدنپذیر شامل آب زیرزمینی و فرسایش و تلفات ماده آلی خاک؛ 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.

با توجه 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 گردید.

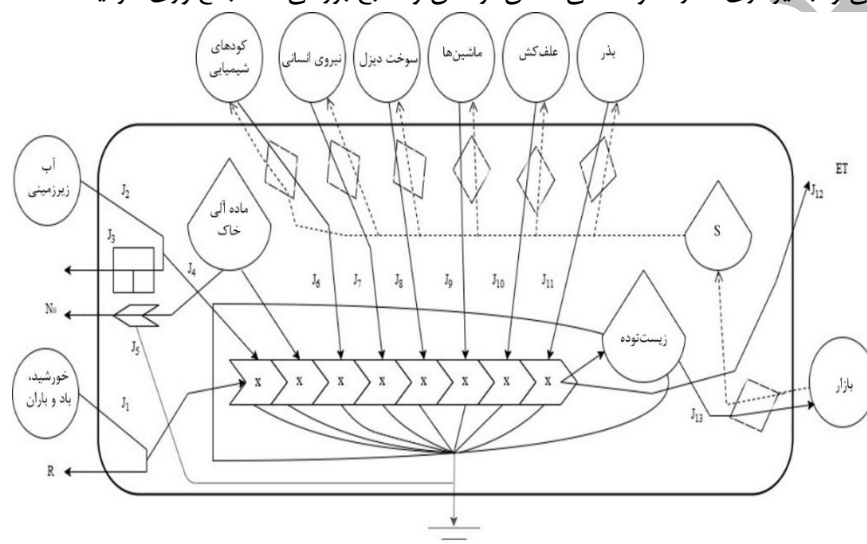
$$n = \frac{Nt^2S^2}{Nd^2 + t^2S^2} \quad (\text{رابطه ۱})$$

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 امرژی

اولین مرحله در تحلیل امرژی، تعیین مرزهای مکانی و زمانی نظام‌های مورد بررسی و ترسیم دیاگرام امرژی به منظور دسته‌بندی نهاده‌های نظام به منابع تجدیدپذیر یا تجدیدنپذیر، محیطی رایگان یا غیر رایگان است. دیاگرام امرژی 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 امرژی 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 داده 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 تجدیدناپذیر^۲ (N₀) 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 تجدیدناپذیر^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 گردید.



شکل ۱- دیاگرام انرژی نظام کشت کاملینا

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 گردید:

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

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).

انرژی باران طبق رابطه (۴) محاسبه گردید:

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

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

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

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

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 گردید:

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

که در آن A مساحت زمین (m^2)، $Erod_{soil}$ 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 داده 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 محیطی 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)، نسبت عملکرد انرژی (EYR)، نسبت سرمایه‌گذاری انرژی (EIR)، نسبت بار محیطی (ELR)، نسبت بار محیطی اصلاح شده (ELR^*)، نسبت خود حمایتی انرژی (ESR)، پایداری محیطی (ESI)، پایداری محیطی اصلاح شده (ESI^*) 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

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

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

جدول ۲- روابط و خصوصیات شاخص‌های امرژی برای تحلیل پایداری نظام تولید کاملینا

شاخص	رابطه	خصوصیات	منبع
ورودی‌های محیطی	R	جریان‌های تجدیدپذیر از منابع محلی رایگان	(Guo et al., 2023)
تجدیدپذیر			
ورودی‌های محیطی	N_0	جریان‌های تجدیدناپذیر از منابع محلی رایگان	(Guo et al., 2023)
تجدیدناپذیر			
ورودی‌های غیر رایگان	F_R	جریان‌های تجدیدپذیر از منابع غیر رایگان	(Guo et al., 2023)
تجدیدپذیر			
ورودی‌های غیر رایگان	F_N	جریان‌های تجدیدناپذیر از منابع غیر رایگان	(Guo et al., 2023)
تجدیدناپذیر			
کل امرژی ورودی	$U = R + N_0 + F_R + F_N$	کل جریان امرژی مورد نیاز برای پشتیبانی از نظام تولیدی	(Asgharipour et al., 2019)

ادامه جدول ۲- روابط و خصوصیات شاخص‌های امرژی برای تحلیل پایداری نظام تولید کاملینا

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

*. C نشان دهنده مقدار مصرف مواد شیمیایی شامل کودهای نیتروژن (۳۸۹۲۰ گرم) و فسفات (۱۳۳۰ گرم مصرف شده) و سموم (۱۰۰ گرم) می باشد که حاصل جمع آنها برابر با مقدار ۴۰۳۵۰ گرم است.

۲-۳. شاخص های اقتصادی

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

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

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

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

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

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

که در آنها NR سود خالص ($Rial ha^{-1}$)، $\frac{B}{C}R$ نسبت فایده به هزینه، TP هزینه تمام شده 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 زیست توده) ($kg ha^{-1}$) می باشد.

۳. نتایج پژوهش و بحث

۳-۱. ساختار استفاده از تحلیل امرژی

ورودی های منابع طبیعی و نهاده های غیر رایگان برای نظام تولید کاملینا در جدول (۳) فهرست شده است. تمام ورودی های ارائه شده در این جدول از طریق ضرب مقادیر خام در ضرایب تبدیل خورشیدی تبدیل شده اند. علاوه بر این، تمامی ورودی های بر طبق نسبت های تجدیدپذیری به دو بخش تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر گروه بندی شده است. کل ورودی امرژی حمایت کننده نظام تولید کاملینا $10^{15} \times 8/67$ امژول خورشیدی در هکتار در سال برآورد گردید. در پژوهشی مقدار امرژی ورودی کل نظام های 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 در بود (Pordel et al., 2024). طبق شکل (۲) مقایسه کل امرژی ورودی نظام های تولیدی گیاهان روغنی (کلزا، گلرنگ و کنجد) با مطالعه حاضر بیانگر این حقیقت است که نظام مورد مطالعه از نظر معادل کل امرژی ورودی نسبت به سایر گیاهان روغنی مقدار کمتری را دارا می باشد، بنابراین محصول کاملینا نسبت به کلزا، گلرنگ و کنجد فشار محیط زیستی کمتری دارد. بالاترین مقدار امرژی ورودی در نظام تولیدی کاملینا مربوط ورودی های محیطی تجدیدپذیر در نظر گرفته شده شامل تلفات فرسایشی خاک با $10^{15} \times 5/62$ امژول خورشیدی در هکتار در سال (سهام $64/87$ درصدی) و آب زیرزمینی با $10^{15} \times 1/26$ امژول خورشیدی در هکتار در سال (سهام $14/51$ درصدی) بود (جدول ۳).

۳-۱-۱. ورودی های 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 آن‌جا 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) به‌عنوان 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 انرژی ورودی نظام تولیدی را به‌خود 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 به‌ترتیب $10^{14} \times 7/07$ و $10^{14} \times 6/76$ و $10^{14} \times 1/39$ ام‌ژول خورشیدی در هکتار در بود (شکل ۲). در پژوهشی دیگر واقع در شهرستان خرم‌آباد استان لرستان، تحلیل انرژی 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 انرژی 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 به‌ترتیب برابر با $10^{14} \times 1/04$ ، $10^{14} \times 0/99$ و $10^{14} \times 8/89$ درصد بوده است، با مقدار محاسبه شده برای کاملینا ($2/70$ درصد) در محدوده‌ی مشابهی با سایر محصولات قرار دارد (شکل ۳). مقدار بالای انرژی 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 انرژی ورودی‌های محیطی تجدیدناپذیر برابر با $10^{15} \times 6/88$ ام‌ژول خورشیدی در هکتار در سال بود که تلفات فرسایش خاک و آب زیرزمینی به‌ترتیب 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 انرژی حمایت‌کننده نظام را دارا بودند. در پژوهشی توسط (Lu & Campbell, 2009) میزان انرژی تلفات فرسایش خاک در نظام‌های تولید میوه‌های گرمسیری و نیمه‌گرمسیری گواوا، وامپی و پایپا در چین به‌ترتیب 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 به‌ترتیب سهمی $21/36$ ، 20 و $11/2$ درصد از کل ورودی انرژی در این نظام‌ها را تشکیل می‌داد. میزان انرژی ورودی‌های محیطی تجدیدناپذیر در پژوهشی در سیستان برای گیاهان روغنی کلزا، گلرنگ و کنجد (شکل ۲) برابر با $10^{16} \times 6/07$ ، $10^{16} \times 3/81$ 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 (نیترژن و فسفر)، علف‌کش و بذر مصرفی می‌باشند. مقدار امرژی کل به‌دست آمده 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 امرژی ورودی نظام کاملینا بود. سوخت دیزل و کود شیمیایی نیترژن (ورودی‌های غیر رایگان تجدیدناپذیر) بیش‌ترین اثرگذاری در معادل امرژی 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 امرژی معادل ورودی‌های غیر رایگان در سیستان 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 محاسبه شده 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). 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 $23/19$ ، $25/78$ و $82/05$ 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 $92/44$ درصد، 61 درصد، $78/77$ درصد و $97/96$ درصد گزارش شد (Edrisi *et al.*, 2022). سهم ورودی‌های غیر رایگان تجدیدپذیر این مطالعه شامل نیروی انسانی ($0/07$ درصد) و بذر ($0/88$ درصد)، نسبت به مقادیر بالاتر ورودی‌های غیر رایگان تجدیدناپذیر کم‌تر می‌باشد.

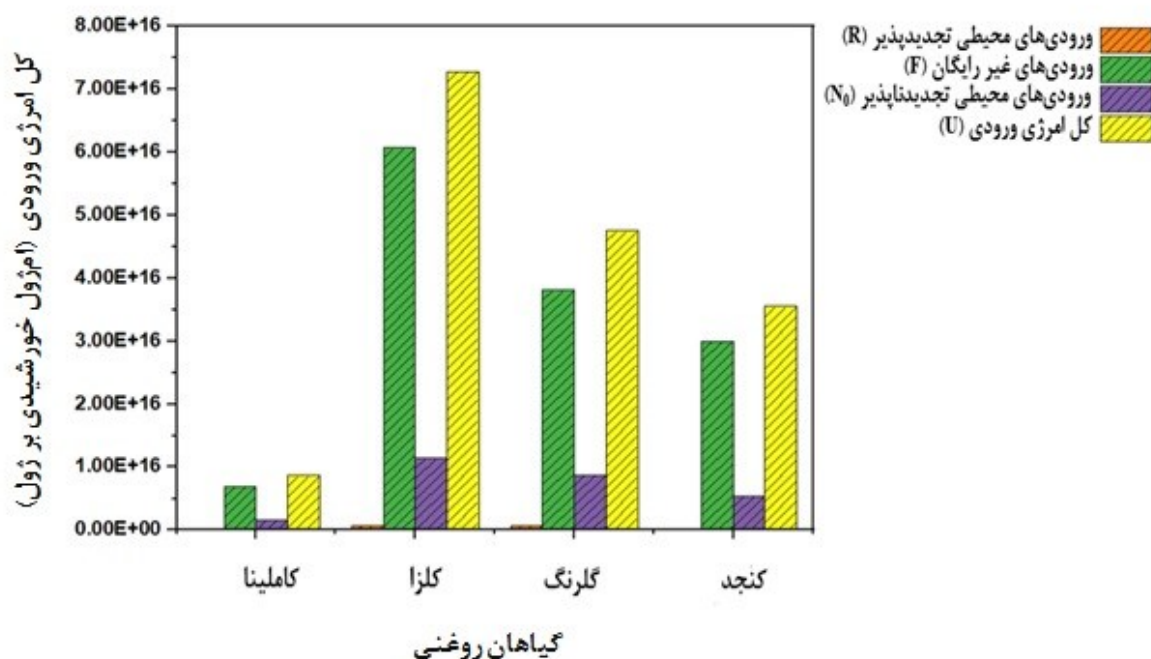
جدول ۳- نتایج تحلیل امرژی و ساختار مصرف امرژی نظام تولید کاملینا (واحد در هکتار)

منبع ضریب تبدیل خورشیدی	سهم امرژی (%)	امرژی خورشیدی (sej)	ضریب تجدید پذیری	ضریب تبدیل خورشیدی ($sej.unit^{-1}$)	جریان یک‌ساله خام	واحد	متغیر
ورودی‌های محیطی تجدیدپذیر							
(Shahhoseini <i>et al.</i> , 2023)	$0/55$	$4/80 \times 10^{13}$	1	1	$4/80 \times 10^{13}$	ژول	نور خورشید
(Shahhoseini <i>et al.</i> , 2023)	$2/15$	$1/86 \times 10^{14}$	1	$2/30 \times 10^4$	$8/09 \times 10^9$	ژول	باران
(Shahhoseini <i>et al.</i> , 2023)		$1/76 \times 10^{13}$	1	$1/86 \times 10^3$	$9/38 \times 10^9$	ژول	باد
	$2/70$	$2/34 \times 10^{14}$					جمع
ورودی‌های محیطی تجدیدناپذیر							
(Ghaley <i>et al.</i> , 2018)	$64/87$	$5/62 \times 10^{15}$	0	$9/42 \times 10^4$	$5/97 \times 10^{10}$	ژول	فرسایش خاک
(Cuadra & Rydberg, 2006)	$14/51$	$1/26 \times 10^{15}$	0	$1/92 \times 10^5$	$6/55 \times 10^9$	ژول	آب زیرزمینی
	$79/38$	$6/88 \times 10^{15}$					جمع
ورودی‌های غیر رایگان							
(Kohkan <i>et al.</i> , 2017)	$0/07$	$5/98 \times 10^{12}$	$0/1$	$4/5 \times 10^6$	$3/57 \times 10^7$	ژول	نیروی انسانی
(Shahhoseini <i>et al.</i> , 2023)	$2/62$	$2/27 \times 10^{14}$	0	$8/48 \times 10^4$	$2/68 \times 10^9$	ژول	سوخت دیزل

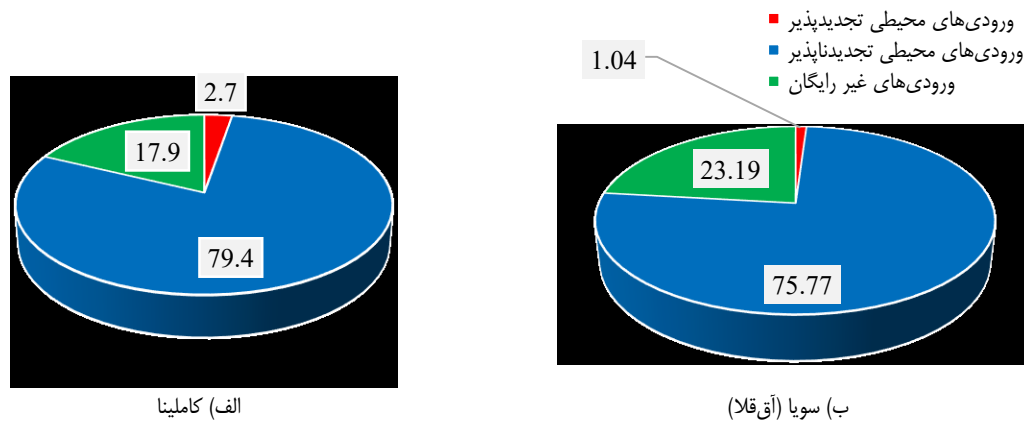
ماشین‌ها	گرم	$2/45 \times 10^2$	$1/01 \times 10^{10}$	•	$2/47 \times 10^{12}$	•/•3	(Shahhoseini <i>et al.</i> , 2023)
کود نیتروژن	گرم	$3/89 \times 10^4$	$3/09 \times 10^{10}$	•	$1/2 \times 10^{15}$	13/87	(Mirshekari <i>et al.</i> , 2021)
کود فسفات	گرم	$1/33 \times 10^2$	$2/82 \times 10^{10}$	•	$3/75 \times 10^{13}$	•/43	(Brandt-Williams, 2002)
علف‌کش	گرم	1×10^2	$1/89 \times 10^{10}$	•	$1/89 \times 10^{12}$	•/•2	(Mirshekari <i>et al.</i> , 2021)
بذر	ژول	$6/35 \times 10^6$	$1/2 \times 10^7$	•	$7/63 \times 10^{13}$	•/88	(Stolarski <i>et al.</i> , 2019)
جمع					$1/55 \times 10^{15}$	17/92	
جمع کل امرزی					$8/67 \times 10^{15}$	100	

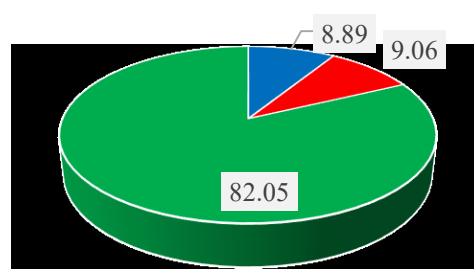
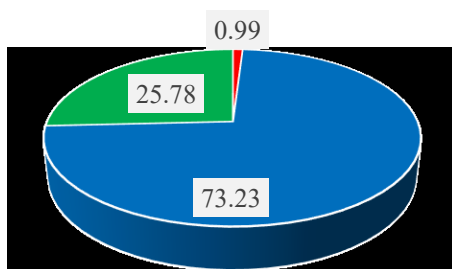
خروجی (عملکرد محصول)

کاملینا	ژول	$1/42 \times 10^{13}$	(Stolarski <i>et al.</i> , 2019)
کاه	ژول	$2/14 \times 10^{13}$	(Stolarski <i>et al.</i> , 2019)
انرژی تولید (AE)	ژول بر گرم	$2/5 \times 10^4$	(Stolarski <i>et al.</i> , 2019)



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





ج) سویا (علی آباد کتول)

د) کلزا

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

۳-۲. 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.

۳-۲-۱. 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 $10^9 \times 4/57$ 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 $10^5 \times 1/63$ ام‌ژول خورشیدی بر ژول بود (Wang et al., 2014). در استان لرستان برای تولید دو نظام تجاری و معیشتی کلزا، شاخص ضریب تبدیل برابر $10^5 \times 3/08$ و $10^5 \times 9/48$ ام‌ژول خورشیدی بر ژول گزارش شد (Amiri et al., 2019). همچنین مقدار شاخص امرژی ویژه برای نظام‌های تولید کلزا $10^{10} \times 9/71$ ، گلرنگ $10^{10} \times 5/53$ و کنجد $10^{10} \times 6/46$ 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 قابل توجهی 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 تجدیدنپذیر تأکید می‌کند.

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, 2000a).

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 گردید (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 موجب 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 جاتروفا 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 گردید.

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 و 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 جاتروفا 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). به صورت 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 ۲ بیانگر فشار محیط کم، بین ۲ تا ۱۰ بیانگر فشار محیطی متوسط و بیش از ۱۰ بیانگر فشار محیطی زیاد نظام تولیدی است (Brown & Ulgiati, 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. به‌دلیل 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 خود حمایتی امرژی (ESR)

شاخص خود حمایتی 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 ۰/۳ 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 باید 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 ۱ بیانگر عدم پایداری، بین ۱ تا ۵ نیمه پایداری و بیش‌تر از ۵ بیانگر وضعیت پایدار می‌باشد (Hu *et al.*, 2010). طبق جدول (۴) مقدار شاخص‌های ESI و ESI* در این پژوهش، بسیار کم‌تر از ۱ 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، روش‌های 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 مقادیر شاخص پایداری محیط‌زیستی (ESI) و پایداری محیط‌زیستی اصلاح‌شده (ESI*) برای نظام تولید غیرفشرده لوبیا برابر ۰/۰۸ و ۱/۴۸ محاسبه شد (Asgharipour *et al.*, 2019). مقادیر ESI و ESI* برای نظام معیشتی و تجاری کلزا ۰/۸۷، ۱/۳۸، ۰/۷۳ و ۰/۷۵ 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، در حالی که مقادیر پایین‌تر آن نمایانگر اتکای بیشتر به منابع تجدیدناپذیر و فشار بالاتر بر محیط‌زیست هستند. این شاخص در مطالعات کشاورزی و صنعتی به منظور ارزیابی کارایی و پایداری فرایندها به‌کار می‌رود (Guo *et al.*, 2023). طبق جدول (۴) شاخص امرژی ایمنی محصولات کشاورزی (EIPS)، برابر ۱ بود که به‌دلیل 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 ۰/۹۲۱ گزارش شد (Guo *et al.*, 2023). همچنین در ارزیابی شاخص EIPS در نظام‌های تلفیقی برنج-گندم و برنج-سبزیجات در شانگهای چین، مقدار EIPS به‌ترتیب ۱ و ۰/۳۴ بود (Xi & Qin, 2009).

جدول ۴- مقادیر شاخص‌های مبتنی بر امرژی نظام تولید کاملینا

شاخص	رابطه	واحد	مقدار
ورودی‌های محیطی تجدیدپذیر	R	ام‌ژول خورشیدی بر ژول	$۲/۳۴ \times ۱۰^{۱۴}$
ورودی‌های محیطی تجدیدناپذیر	N_0	ام‌ژول خورشیدی بر ژول	$۶/۸۸ \times ۱۰^{۱۵}$
ورودی‌های غیر رایگان تجدیدپذیر	F_R	ام‌ژول خورشیدی بر ژول	$۸/۲۲ \times ۱۰^{۱۳}$
ورودی‌های غیر رایگان تجدیدناپذیر	F_N	ام‌ژول خورشیدی بر ژول	$۱/۴۷ \times ۱۰^{۱۵}$
کل امرژی ورودی	$U = R + N_0 + F_R + F_N$	ام‌ژول خورشیدی بر ژول	$۸/۶۷ \times ۱۰^{۱۵}$
کل امرژی خروجی	Y	ام‌ژول خورشیدی بر ژول	$۳/۵۶ \times ۱۰^{۱۳}$
ضریب تبدیل	$T_r = U/AE$	ام‌ژول خورشیدی بر ژول	$۲/۱۱ \times ۱۰^۸$
امرژی ویژه	$SE = U/W^*$	ام‌ژول خورشیدی بر گرم	$۴/۵۷ \times ۱۰^۹$
تجدیدپذیری امرژی	$\%R = (R + F_R)/U$	درصد	۳/۶۵
نسبت عملکرد امرژی	$EYR = Y/F_R + F_N$	-	۰/۰۲
نسبت سرمایه‌گذاری امرژی	$EIR = (F_R + F_N)/(R + N_0)$	-	۰/۲۱
نسبت بار محیط‌زیستی	$ELR = (N_0 + F_R + F_N)/R$	-	۳۶
نسبت بار محیط‌زیستی اصلاح‌شده	$ELR^* = (N_0 + F_N)/(R + F_R)$	-	۲۶/۴

نسبت خود حمایتی امرژی	$ESR = (R + N_0) / Y$	-	۲۰۰
پایداری محیط‌زیستی	$ESI = (EYR/ELR)$	-	$۵/۵۵ \times ۱۰^{-۴}$
پایداری محیط‌زیستی اصلاح‌شده	$ESI^* = (EYR/ELR^*)$	-	$۷/۵۷ \times ۱۰^{-۴}$
شاخص امرژی ایمنی محصولات کشاورزی	$EIPS = 1 - [(C / F_R + F_N)]$	-	۱

*. بیانگر جرم در دسترس محصولات تولیدی (دانه و کاه کاملینا) نظام می‌باشد و مقدار مجموع آن ۱۸۹۸۶۷۰ گرم می‌باشد.

۳-۳. تحلیل اقتصادی

هزینه نهاده‌ها و سهم هر کدام از هزینه کل در تولید کاملینا در استان لرستان را جدول (۵) نشان می‌دهد. بر اساس نتایج، هزینه کل تولید ۸۵۸۳۸/۱۴ هزار ریال بر هکتار محاسبه شد. همچنین هزینه‌های اجاره زمین و داشت با ۴۱/۵۴ و ۰/۹ 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، ۱۵۱ دلار بر هکتار به‌دست آمد (Hryhoriv et al., 2022). همچنین در پژوهشی مقدار هزینه کل در نظام‌های تولید کلزا، گلرنگ و کنجد در سال زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ در منطقه سیستان، به ترتیب ۴۱۵۰۰، ۳۸۲۰۰ و ۲۶۰۰۰ هزار ریال بر هکتار گزارش شد که نتایج حاکی از کمتر بودن مقدار هزینه کل در نظام تولید کنجد نسبت به دو نظام دیگر بود (Pordel et al., 2024).

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

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 تمام شده و بهره‌وری اقتصادی محصول به ترتیب 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 به ترتیب 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 به ترتیب 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 کنجد در سال زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ در منطقه سیستان، به ترتیب ۴۱۰۰۰، ۳۴۹۰۰ و ۱۰۳۲۵۰ هزار ریال بر هکتار و ۰/۹۹، ۰/۹۱ و ۳/۹۷ برآورد شد که نشان‌دهنده اقتصادی‌تر بودن تولید کنجد نسبت به کلزا و گلرنگ در منطقه سیستان بود (Pordel et al., 2024).

جدول ۶- شاخص‌های اقتصادی در تولید کاملینا

شاخص	واحد	مقدار
------	------	-------

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

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 تجدیدناپذیر 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 تجدیدناپذیر 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 خود حمایتی امرژی (ESR) و امرژی ایمنی محصولات کشاورزی (EIPS) به ترتیب برابر $۳/۶۵$ ، $۰/۰۲$ ، ۳۶ ، ۲۰۰ و ۱ 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 Yaghuti 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). Energy 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 Energy 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 [Research]. *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.

Evaluation of emergy and economic indices in the camelina (*Camelina sativa* L.) production system in Lorestan province

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, reduce dependency on non-renewable inputs, and increase profitability while maintaining environmental balance. This study focuses on *Camelina sativa* oil production in Lorestan, using both analyses to estimate emergy indices, evaluate sustainability, and suggest strategies for sustainable resource management. The findings contribute to developing agricultural systems that are both environmentally and economically sustainable.

Material 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.yr⁻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 include 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 1 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 using 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 energy and economic analysis. Results showed significant reliance on non-renewable environmental inputs, which may affect environmental sustainability. The total energy input was 8.67×10^{15} solar emjoules 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.