Journal of Agroecology
Homepage: https://agry.um.ac.ir/

Research Article
Vol. 15, No. 2, Summer 2023, p. 319-335

Evaluating the Sustainability Indices for Rapeseed (*Brassica napus* L.) Production Systems Using Emergy Analysis (Case Study: Kalaleh County, Golestan Province)

Samaneh Lotfi[1], Hossein Kazemi[2]*, Behnam Kamkar[3] and Hamid Reza Shahhoseini[4]

Received: 30-08-2021
Revised: 06-02-2022
Accepted: 15-05-2022
Available Online: 15-05-2022

How to cite this article:
Lotfi, S., Kazemi, H., Kamkar, B., & Shahhoseini, H.R. **(**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.
DOI: 10.22067/agry.2022.72035.1063

Introduction

Sustainability in agriculture at the regional scale is about balancing food security with maintaining environmental health. Therefore, agricultural operations are sustainable when they maintain the environment's health, the interaction between plant and animal production, social acceptance, and economic benefits (Kumaraswamy, 2012). Excessive use of environmental resources and excessive consumption of chemicals in agriculture have caused environmental problems and reduced sustainability (Quintero-Angel & Gonzales-Acevedo, 2018). Therefore, it is necessary to study the patterns of energy consumption and efficient use of energy in agriculture, which is one of the basic principles of sustainable agriculture. As a suitable tool for this purpose, Emergy analysis is used in various ecosystems (Odum, 2000; Brown & Ulgiati, 2004). Emergy analysis can determine the degree of sustainability of connected ecological and economic systems. Emergy indices are effective tools for integrating ecological-economic systems and make it possible to measure and compare all aspects of these ecosystems (Patterson et al., 2017). This study aimed to evaluate sustainability indices for rapeseed (Brassica napus L.) production systems using emergy indices and provide suggestions for sustainable crop production in Kalaleh County.

Materials and Methods

In this study, production systems of rapeseed were evaluated using emergy sustainability indices in Kalaleh County (Golestan province) between 2018 and 2019. For this purpose, 50 rapeseed fields were selected as Cochran equation. First, the spatial and temporal boundaries of the system were defined (Odum, 1996; Odum, 2000), and resources were divided into four categories: renewable environmental resources, non-renewable environmental resources, purchased renewable resources, and purchased non-renewable resources (Amiri et al., 2019). Emergy flow for each input was multiplied by their transformities in joules and grams (Odum, 2000). Finally, emergy indices such as renewability, emergy yield ratio, emergy self-support ratio, environmental loading ratio and

1-M.Sc. Graduated of Agrotechnology, Department of Agronomy, Faculty of Plant Production, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Iran
2- Associated Professor, Department of Agronomy, Faculty of Plant Production, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Iran.
3- Professor, Department of Agrotechnology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
4- Ph.D. Graduated of Agroecology, Deptment of Agronomy, Faculty of Agriculture, University of Zabol, Zabol, Iran.
(*- Corresponding author's Email: hkazemi@gau.ac.ir)

emergy sustainability index were calculated and evaluated in rapeseed production systems.

Results and Discussion

Total emergy input for the rapeseed production was estimated as 1.64E+16 sej ha^{-1} $year^{-1}$. In rapeseed production, dependence on environmental and non-renewable inputs was higher than on purchased and renewable inputs. Soil erosion emergy was the largest emergy input of the total rapeseed production system, with a share of 47.31%. Also, fossil fuel emergy was the largest emergy input of the purchase, with a share of 38.41%. In this research, we calculated the transformity equal to 2.59E+05 sej j^{-1}, specific emergy equal to 7.33E+09 sej g^{-1}, emergy renewability equal to 8.16%, emergy yield ratio equal to 2.17 and emergy investment ratio equal to 0.85. Also, emergy self-support ratio, standard environmental loading ratio, modified environmental loading ratio, standard emergy sustainability index, and modified emergy sustainability index were estimated at 0.54, 13.81, 11.27, 0.16, and 0.19, respectively. Despite the higher contribution of environmental resources in the rapeseed production system, the high share of soil erosion as a non-renewable input and the unreasonable consumption of some non-renewable purchased inputs, such as fossil fuels, led to a decrease in renewability and an increase in environmental load. Based on evaluation of emergy indices, rapeseed ecosystem had the high production efficiency and resource consumption efficiency and it had the great potential to increase economic productivity. However, rapeseed production in Kalaleh county had low environmental and economic sustainability. The implementation of conservation tillage methods and the modernization of machinery can contribute to a reduction in the consumption of non-renewable and economic inputs in rapeseed production ecosystems. This reduction in input consumption not only alleviates environmental pressure but also enhances sustainability. By prioritizing the use of renewable environmental inputs and minimizing the utilization of non-renewable and economic inputs, the emergy sustainability index can be improved.

Conclusion

The rapeseed ecosystems exhibited high production and resource consumption efficiency, along with the significant potential for increasing economic productivity. However, despite the substantial contribution of environmental resources in these systems, the prevalence of soil erosion as a significant portion of the total emergy input resulted in a decline in renewability, an escalation in environmental burden, and ultimately a decrease in sustainability. Enhancing management methods to minimize the consumption of non-renewable and economic resources would be effective in bolstering the environmental and economic sustainability of rapeseed farming ecosystems in Kalaleh County.

Keywords: Emergy indices, Environmental load, Fossil fuel, Renewability, Soil erosion

نشریه بوم شناسی کشاورزی
Homepage: https://agry.um.ac.ir/

مقاله پژوهشی

جلد ۱۵، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۲، ص ۳۳۵-۳۱۹

ارزیابی وضعیت پایداری در بوم‌نظام‌های زراعی کلزا (*Brassica napus* L.) با استفاده از تحلیل امرژی (مطالعه موردی: شهرستان کلاله، استان گلستان)

سمانه لطفی[۱]، حسین کاظمی[۲*]، بهنام کامکار[۳] و حمید رضا شاه حسینی[۴]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۰۸
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۱۱/۱۷
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۲/۲۵

چکیده

بهره‌برداری بیش از حد از منابع محیطی و مصرف بی‌رویه مواد شیمیایی سبب بروز مشکلات زیست‌محیطی و کاهش پایداری بوم‌نظام‌های کشاورزی شده است. بنابراین، بررسی الگوهای مصرف انرژی و استفاده کارآمد از انرژی در کشاورزی که از اصول اساسی در کشاورزی پایدار محسوب می شود، مفید است. تحلیل امرژی، به‌عنوان ابزار مناسبی برای این منظور، در بوم‌نظام‌های مختلف استفاده می شود. این مطالعه با هدف ارزیابی پایداری کشت‌بوم‌های کلزا (*Brassica napus* L.) با استفاده از ارزیابی امرژی در شهرستان کلاله در سال زراعی ۹۸-۱۳۹۷ انجام شد. به این منظور، تعداد ۵۰ پرسشنامه برای کلزاکاران در نظر گرفته شد. پس از تعیین مرزهای مکانی و زمانی و تقسیم‌بندی منابع به چهار گروه محیطی تجدیدپذیر، محیطی تجدیدناپذیر، خریداری شده تجدیدپذیر و خریداری شده تجدیدناپذیر، شاخص‌های امرژی در بوم‌نظام زراعی کلزا، محاسبه شد. نتایج نشان داد، ورودی امرژی کل برای بوم‌نظام زراعی کلزا $۱/۶۴\times۱۰^{۱۶}$ امژول خورشیدی در هکتار در سال بود. در بوم‌نظام زراعی کلزا وابستگی به ورودی‌های محیطی و تجدیدناپذیر، بیشتر از ورودی‌های خریداری شده و تجدیدپذیر بود. بیشترین سهم از ورودی امرژی کل در بوم‌نظام کلزا مربوط به فرسایش خاک با ۴۷/۳۱ درصد بود. همچنین در بین ورودی های خریداری شده، بیشترین سهم مربوط به سوخت فسیلی با ۳۸/۴۱ درصد بود. در بوم‌نظام کلزا به‌ترتیب، شاخص‌های ضریب تبدیل $۲/۵۹\times۱۰^{۵}$ امژول خور شیدی بر ژول، امرژی ویژه $۷/۳۳\times۱۰^{۹}$ امژول خور شیدی بر گرم، تجدیدپذیری امرژی ۸/۱۶ در صد، نسبت عملکرد امرژی ۲/۱۷، نسبت سرمایه‌گذاری امرژی ۰/۸۵، نسبت خودحمایتی امرژی ۰/۵۴، نسبت بارگذاری محیطی استاندارد ۱۳/۸۱، نسبت بارگذاری محیطی اصلاح شده ۱۱/۲۷، شاخص پایداری امرژی استاندارد ۰/۱۶ و شاخص پایداری امرژی اصلاح شده ۰/۱۹ بود. علی‌رغم سهم بالاتر ورودی‌های محیطی نسبت به خریداری شده در بوم‌نظام کلزا، فرسایش بالا، به‌عنوان یک ورودی تجدیدناپذیر، در کنار مصرف نامعقول برخی ورودی‌های اقتصادی تجدیدناپذیر، مانند سوخت‌های فسیلی، موجب تجدیدپذیری پایین و فشار محیطی زیاد در این بوم‌نظام شد. بر اساس ارزیابی شاخص‌های امرژی، بوم‌نظام زراعی کلزا از کارآیی تولید محصول و کارآیی مصرف منابع بالایی برخوردار است و پتانسیل زیادی برای افزایش بهره‌وری اقتصادی دارد. با این وجود، تولید کلزا در شهرستان کلاله پایداری محیطی و اقتصادی کمی دارد. به‌کارگیری روش‌های خاک‌ورزی حفاظتی و نو سازی ماشین‌آلات، موجب کاهش مصرف ورودی‌های تجدیدناپذیر و اقتصادی و در نتیجه، کاهش فشار محیطی و افزایش پایداری در بوم‌نظام زراعی کلزا خواهد شد.

واژه‌های کلیدی: تجدیدپذیری، سوخت فسیلی، شاخص‌های امرژی، فرسایش خاک، فشار محیطی

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد اگروتکنولوژی، گروه زراعت، دانشکده تولید گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران.
۲- دانشیار گروه زراعت، دانشکده تولید گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران
۳- استاد گروه اگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی،دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.
۴- دانش‌آموخته دکتری اگرواکولوژی، گروه زراعت، دانشکده کشاورزی،دانشگاه زابل، زابل، ایران.
(*- نویسنده مسئول: Email: hkazemi@gau.ac.ir)

DOI: 10.22067/agry.2022.72035.1063

مقدمه

نظام‌های کشاورزی به‌عنوان مصرف‌کننده هر دو منابع طبیعی و اقتصادی، از دو راه مصرف زیاد منابع طبیعی و اضافه کردن ترکیبات آلوده‌کننده به محیط، اثرات منفی از خود برجا می‌گذارند (Quintero-Angel & Gonzales-Acevedo, 2018). امنیت غذایی، وابسته به بهره‌وری در کشاورزی، کارآیی مصرف منابع و پایداری بلندمدت نظام‌های کشاورزی است. پایداری در کشاورزی، ایجاد تعادل بین امنیت غذایی و حفظ کیفیت محیط است و عملیات کشاورزی زمانی پایدار است که حافظ کیفیت محیط بوده و مقبولیت اجتماعی و مزایای اقتصادی داشته باشد (Kumaraswamy, 2012). دستیابی به این امر نیازمند روش‌های ارزیابی است که اطلاعات مفیدی در خصوص وضعیت بوم‌نظام و شدت و جهت تغییرات آن در اختیار قرار دهد. این روش‌ها باید شامل جنبه‌های محیطی، اجتماعی و اقتصادی باشد (Quintero-Angel & Gonzales-Acevedo, 2018). روش های ارزیابی محیطی، برای ارزیابی استفاده از منابع، آلودگی‌ها و پایداری در یک نظام به‌کار می‌روند و شامل ارزیابی ورودی- خروجی محیطی، تعیین ردپای بوم شناختی مانند ردپای کربن، ارزش‌گذاری بوم شناختی، ارزیابی چرخه حیات، ارزیابی انرژی و ارزیابی امرژی است (Patterson et al., 2017).

پژوهش‌های زیادی در زمینه ارزیابی انرژی صورت گرفته است، امّا به‌دلیل نادیده گرفتن سهم عوامل طبیعی در بوم‌نظام کشاورزی، محاسبات آن از دقت کافی برخوردار نیست. در این پژوهش‌ها فقط عوامل و متغیرهای اقتصادی محاسبه شده و محیط، به‌عنوان یک عامل مهم در میزان پایداری بوم‌نظام، مورد توجه قرار نمی‌گیرد. تجزیه و تحلیل امرژی نوعی از تجزیه و تحلیل انرژی است که در آن سهم محیط زیست و منابع طبیعی که عمدتاً در کشاورزی فشرده نادیده گرفته می‌شود، کمّی‌سازی شده و بر مبنای واحد مشترک ارزیابی می‌شود (Brown & Ulgiati, 2004) مزیت روش ارزیابی امرزی نسبت به سایر روش‌ها این است که جریان‌های متنوع انرژی و ماده را به شکل واحدی در نظام مورد مطالعه منعکس می‌کند که نشان‌دهنده هر دو مورد کمیت و کیفیت آن است (Brown et al., 2016). تحلیل امرژی با تبدیل تمام جریان‌ها و ذخایر طبیعی و منابع اقتصادی به واحدهای امرژی خورشیدی، پایداری یک بوم‌نظام را به‌طور کامل بررسی می‌کند (Odum, 1996). ارزیابی امرژی با تعیین میزان پایداری نظام‌های بوم‌شناختی و اقتصادی پیوسته، فهم ما از این نظام ها و چگونگی اثرات متقابل آن ها بر هم را افزایش می‌دهد. شاخص‌های امرژی، ابزار خوبی برای تلفیق نظام‌های بوم‌شناختی- اقتصادی هستند و امکان اندازه‌گیری و مقایسه جنبه‌های مختلف این بوم‌نظام ها را فراهم می‌سازند (Patterson et al., 2017). این شاخص‌ها قادر به تعیین میزان کارآیی، تجدیدپذیری، فشار محیطی و پایداری محیطی و اقتصادی یک نظام هستند (Odum, 2000; Brown & Ulgiati, 2004). امرژی، مقدار کل انرژی مصرفی در یک سامانه است و امرژی خورشیدی، مقدار انرژی در دسترس خورشیدی است که به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم مصرف شده تا به ارائه خدمت یا تولید محصول منجر شود. به امرژی، انرژی مجسم یا حافظه انرژی نیز می‌گویند که با امژول خورشیدی (sej) بیان می‌شود (Odum, 1996).

ارزیابی امرژی برای ارزیابی پایداری نظام‌های تولید در مقیاس‌های مختلف کاربرد دارد (Zhai et al., 2017). برای مثال، ارزیابی سه نظام کشاورزی در آمریکا شامل تولید ذرت (*Zea mays* L.)، توت سیاه (*Morus nigra* L.) و سامانه سنتی کشت چندگانه نشان داد، سامانه سنتی دارای کمترین بارگذاری زیست‌محیطی و بیشترین پایداری و سامانه تولید ذرت دارای بیشترین بارگذاری محیطی و کمترین پایداری بود (Martin et al., 2006). همچنین، ارزیابی پایداری نظام‌های تولید سیر (*Allium sativum* L.)، پیاز (*Allium cepa* L.) و گندم (*Triticum aestivum* L.) در منطقه سیستان با تحلیل امرژی نشان داد، تولید گندم نظام برتری برای دست‌یابی به پایداری نسبت به تولید سیر و پیاز بود (Yasini et al., 2020). با این وجود، پژوهش‌های بسیار کمی در زمینه ارزیابی امرژی گیاهان زراعی به‌صورت موردی در ایران و حتی جهان انجام شده است. هدف از این پژوهش، ارزیابی امرژی بوم‌نظام زراعی کلزا (*Brassica napus* L.) به‌منظور تعیین میزان پایداری آن و ارائه پیشنهاداتی برای مدیریت بهینه و پایدار نظام تولید این محصول مهم در منطقه مورد مطالعه، به عنوان یکی از قطب‌های تولید کلزا در ایران بود.

مواد و روش‌ها

مشخصات منطقه مورد مطالعه و جمع آوری داده‌ها: این پژوهش در سال زراعی ۹۸-۱۳۹۷ در شهرستان کلاله، در استان

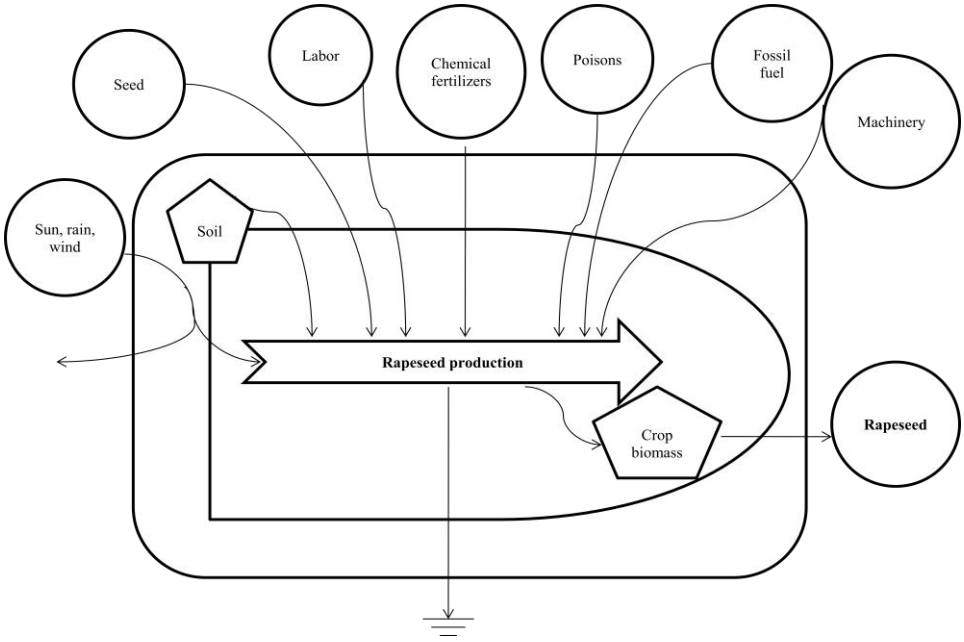
گلستان، انجام شد. جمع‌آوری داده‌ها از طریق پرسشنامه و مصاحبه چهره به چهره با کلزاکاران انجام شد. برای تعیین تعداد پرسشنامه از معادله کوکران (معادله ۱) استفاده شد (Cochran, 2003).

معادله (۱)

$$n=\frac{\frac{z^2pq}{d^2}}{1+\frac{1}{N}\left(\frac{z^2pq}{d^2}-1\right)}$$

که در آن، n: حجم نمونه، N: حجم جامعه آماری، z: خطای معیار ضریب اطمینان قابل قبول (۱/۹۶)، p: نسبتی از جمعیت دارای صفتی خاص (۰/۵)، q: نسبتی از جمعیت فاقد صفتی خاص (۰/۵) و d: دقت احتمالی قابل قبول بود. تعداد پرسشنامه برای کلزاکاران ۵۰ در نظر گرفته شد. انتخاب کشاورزان با روش نمونه‌برداری تصادفی انجام گرفت.

تحلیل امرژی: نخستین مرحله در تحلیل امرژی، تعیین مرزهای مکانی و زمانی، مهم‌ترین ورودی‌های نظام و جریان‌های ماده، انرژی و اقتصادی در آن (شکل ۱) است (Odum, 1996; Odum, 2000). این عمل، ورودی‌ها به نظام را، به محیطی یا غیرمحیطی، خریداری شده یا رایگان و تجدیدپذیر یا تجدیدناپذیر تقسیم می‌کند (Odum, 2000).



شکل ۱- دیاگرام جریان امرژی بوم‌نظام زراعی کلزا در شهرستان کلاله

Fig. 1- Emergy flow diagram of rapeseed farming ecosystem in Kalaleh county

تحلیل امرژی بر اساس تقسیم تمام ورودی‌ها به چهار گروه ورودی‌های محیطی تجدیدپذیر[1] (R) مانند نور خورشید، باران و باد، ورودی‌های محیطی که به‌طور بالقوه تجدیدپذیر هستند، امّا به‌دلیل زمان بسیار زیاد در تجدید آن‌ها به‌عنوان ورودی‌های محیطی تجدیدناپذیر در نظر گرفته می‌شوند[2] (N0) مانند فرسایش ماده آلی خاک، ورودی‌های خریداری شده تجدیدپذیر[3] (F_R) و ورودی‌های خریداری شده تجدیدناپذیر[4] (F_N) می‌باشد (Campbell & Laherrere, 1998; Asgharipour et al., 2019). تمام مزارع انتخابی از مرحله آماده‌سازی زمین تا برداشت محصول مورد پایش قرار گرفته و اطلاعاتی شامل سابقه کشاورزی مزرعه، زمان و نوع انجام عملیات آماده سازی زمین، روش کاشت، کودپاشی، سم‌پاشی و برداشت، نوع و مقدار نهاده‌های مصرفی مانند کود شیمیایی و سموم

1 -Renewable environmental inputs
2 -Non-renewable environmental inputs
3 -Renewable purchased inputs
4- Non-renewable purchased inputs

شـیمیایی، نوع ماشـین‌آلات و دفعات اسـتفاده از آن‌ها، نوع و میزان سـوخت مصـرفی در هر عملیات زراعی، نوع، تعداد و مدت زمان به‌کارگیری نیروی کارگری و عملکرد دانه ثبت شـد. داده‌های مربوط به‌میزان فرسایش و ماده آلی خاک و داده‌های اقلیمی، به‌ترتیب از اداره منابع طبیعی و آبخیزداری و اداره هواشـناسـی شـهرسـتان کلاله جمع‌آوری گردید (جدول ۱).

جدول ۱- میانگین سالانه متغیرهای اقلیمی و خاکی در شهرستان کلاله

Table 1- Average climatic and edaphic variables in Kalaleh county

متغیر Variable	واحد Unit	میانگین سالانه Annual average
تشعشع خورشیدی Solar radiation	ژول در مترمربع $j.m^{-2}$	1.73×10^{9}
بارندگی Rainfall	میلی‌متر mm	980
سرعت باد Wind speed	متر در ثانیه $m.s^{-1}$	3.06
میزان فرسایش خاک Soil erosion	کیلوگرم در هکتار $kg.ha^{-1}$	2430
ماده آلی خاک Soil organic matter	درصد %	1.5

جریان امرژی منابع تجدیدپذیر برای تمام مزارع در این پژوهش، یکسـان در نظر گرفته شـد. برای تعیین مقدار ورودی کودها و سـموم شـیمیایی، مقدار ترکیب اثرگذار آن‌ها محاسـبه شـد (Jafari et al., 2018). برای محا سبه ورودی ما شین‌آلات، مجموع وزن ما شین‌آلات مورد اسـتفاده بر مسـاحت کاربرد سـالانه آن‌ها و سـپس بر عمر مفید آن‌ها تقسیم گردید. مساحت کاربرد سالانه و عمر مفید ماشین‌آلات در ایران به‌ترتیب ۱۰۰۰ هکتار و ۱۰ سـال اسـت (Houshyar et al., 2018). ضریب تجدیدپذیری نیز برای تمام ورودی‌ها تعیین شد. این ضـریب برای نیروی کارگری و بذر کلزا به‌ترتیب ۰/۱۰ (Ulgiati & Brown, 2002) و ۰/۴۳ (Amiri et al., 2019) اسـت. تمـام محاسـبات مربوط به تحلیل امرژی، توسـط نرم‌افزار EXCEL 2019 انجام شد. برای محاسبه میزان امرژی خورشیدی ورودی‌ها و خروجی در بوم‌نظام زراعی کلزا، ابتدا مقدار مهم‌ترین ورودی‌ها و خروجی (دانه) در هر کدام از ۵۰ مزرعه بر حسـب واحد جرم (گرم) یا واحد انرژی (ژول) یا واحد پول (ریال)، در هکتار در سال تعیین شد. ضریب تبدیل برای محاسبه مقدار انرژی سوخت فسیلی ۵۶/۳۱ (Houshyar et al., 2018)، نیروی کارگری ۱/۹۶ (Rajabi Hamedani et al., 2011) و دانـه کلزا ۲۸/۳ (Kazemi et al., 2016) بود. برای محـاسـبـه ورودی‌های محیطی نور خورشید، باد، باران و فرسایش خاک بر حسب واحد ژول، به‌ترتیب از معادله‌های ۲ تا ۵ استفاده شد.

معادله (۲)

$$\text{Solar energy}= (10000\ m^2.ha^{-1})\times(\text{radiation})\times(1\text{-albedo})$$

که در آن، میزان آلبدو برای کلزا ۰/۲۳ بود (Amiri et al., 2019).

معادله (۳)

$$\text{Wind energy}= (10000\ m^2.ha^{-1})\times(\text{density of wind})\times(\text{drag coefficient})\times(\text{wind speed})^3\times(\text{time})$$

که در آن، چگالی باد ۱/۳ کیلوگرم بر متر مکعب، ثابت درگ ۰/۰۰۱ و زمان $۳/۱۵\times۱۰^{۷}$ ثانیه بود (Ghaley et al., 2018).

معادله (۴)

$$\text{Rain energy}= (10000\ m^2.ha^{-1}) \times (\text{rainfall}) \times (\text{density}) \times (\text{gibbs free energy})$$

که در آن، چگالی باران ۱۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و انرژی آزاد گیبس ۴۹۴۰ ژول بر کیلوگرم بود (Houshyar et al., 2018).

معادله (۵)

$$\text{Energy of soil erosion}= (\text{soil loss}) \times (\%\text{organic matter}) \times (\text{organic matter energy}) \times (\text{conversion})$$

که در آن، انرژی ماده آلی ۵۴۰۰ کیلوکالری بر کیلوگرم و عامل تبدیل ۴۱۸۶ ژول بر کیلوکالری بود (Houshyar et al., 2018).

جدول ۲- معادلات و خصوصیات شاخص‌های امرژی برای ارزیابی بوم‌نظام زراعی کلزا

Table 2- Specifications and formula of emergy-based indices for evaluation of rapeseed farming ecosystem

شاخص Index	فرمول Formula	خصوصیات Specifications	منبع Reference
ورودی‌های محیطی تجدیدپذیر Renewable environmental inputs	R	جریان‌های تجدیدپذیر از منابع محلی رایگان Renewable flows from free local resources	Asgharipour et al., 2019
ورودی‌های محیطی تجدیدناپذیر Non-renewable environmental inputs	N0	جریان‌های بالقوه تجدیدپذیر از منابع محلی رایگان که به‌عنوان تجدیدناپذیر در نظر گرفته می‌شوند Local potentially renewable flows from free local resources that is being used in a nonrenewable	Campbell & laherrere, 1998
ورودی‌های خریداری شده تجدیدپذیر Renewable purchased inputs	F_R	جریان‌های تجدیدپذیر از منابع خریداری شده Renewable flows from purchased resources	Asgharipour et al., 2019
ورودی‌های خریداری شده تجدیدناپذیر Non-renewable purchased inputs	F_N	جریان‌های تجدیدناپذیر از منابع خریداری شده Non-renewable flows from purchased resources	Asgharipour et al., 2019
ورودی امرژی کل Total emergy input	$U=R+N0+F_R+F_N$	کل منابع امرژی مورد نیاز برای حمایت از نظام تولید Total emergy resources required to support the production system	Asgharipour et al., 2019
خروجی امرژی کل Total emergy output	$Y= R+N0+F_R+F_N$	امرژی کل تولیدات نظام Total emergy of system products	Asgharipour et al., 2019
ضریب تبدیل Transformity	$Tr = \frac{U}{AE}$	مقدار امرژی برای تولید یک واحد خروجی بر حسب ژول است. AE انرژی قابل استفاده محصول است Amount of emergy required to produce an output unit in joules. AE is the accessible energy of the product	Brown & Ulgiati, 2004
امرژی ویژه Specific emergy	$SpE = \frac{U}{W}$	مقدار امرژی برای تولید یک واحد خروجی بر حسب گرم است. W جرم محصول است. Amount of emergy required to produce an output unit in grames. W is the mass of the product	Brown & Ulgiati, 2004
تجدیدپذیری امرژی Emergy renewability	$\%R = \frac{R + FR}{U} \times 100$	درصد امرژی تجدیدپذیر استفاده شده توسط نظام Percentage of the renewable energy used by the system	Odum, 2000
نسبت عملکرد امرژی Emergy yield ratio	$EYR = \frac{Y}{FR + FN}$	مقیاس استفاده از منابع محیطی با سرمایه‌گذاری در منابع اقتصادی Ability of a process to use renewable and nonrenewable environmental resources with economic resources as a capital	Odum, 2000
نسبت سرمایه‌گذاری امرژی Emergy investment ratio	$EIR = \frac{FR + FN}{R + N0}$	مقیاس شدت سرمایه‌گذاری اقتصادی و کاربرد منابع محیطی Indicates the intensity of economic investment and its matching to the free renewable and nonrenewable resources of the environment	Asgharipour et al., 2019
نسبت خودحمایتی امرژی Emergy self-support ratio	$ESR = \frac{R + N0}{U}$	مقیاس وابستگی نظام تولید به محیط Measure of production system dependence on the environment	Zhai et al., 2017
نسبت بارگذاری محیطی استاندارد Standard environmental loading ratio	$ELR = \frac{N0 + FR + FN}{R}$	فشار محیطی ایجاد شده توسط یک نظام Environmental pressure produced by a process	Lu et al., 2014
نسبت بارگذاری محیطی اصلاح شده Modified environmental loading ratio	$ELR^* = \frac{N0 + FN}{R + FR}$	فشار محیطی ایجاد شده توسط یک نظام Environmental pressure produced by a process	Lu et al., 2014
شاخص پایداری امرژی استاندارد Standard emergy sustainability index	$ESI = \frac{EYR}{ELR}$	مقیاسی از پایداری نظام Measure of the sustainability of the system	Lu et al., 2014
شاخص پایداری امرژی اصلاح شده Modified emergy sustainability index	$ESI^* = \frac{EYR}{ELR^*}$	مقیاسی از پایداری نظام Measure of the sustainability of the system	Lu et al., 2014

پس از تعیین مناسب‌ترین ضریب تبدیل امرژی خورشیدی برای هر ورودی، مقدار امرژی خورشیدی از طریق ضرب مقدار عددی آن ورودی در ضریب تبدیل مربوطه‌اش محاسبه گردید (Odum, 2000). ارزیابی امرژی در این پژوهش بر اساس ضریب سیاره‌ای $۱۲/۰۰\times۱۰^{۲۴}$ امژول خورشیدی در سال انجام گرفت و ضرایب تبدیل نیز بر این اساس تعیین شد (Brown et al., 2016). ورودی امرژی کل در هر مزرعه با جمع مقادیر امرژی تمام ورودی‌ها به آن مزرعه محاسبه گردید. سپس، ورودی امرژی و خروجی امرژی برای بوم‌نظام زراعی کلزا با میانگین‌گیری از تمام ۵۰ مزرعه مورد مطالعه محاسبه گردید. در نهایت، شاخص‌های ضریب تبدیل، امرژی ویژه، نسبت عملکرد امرژی و نسبت سرمایه‌گذاری امرژی برای ارزیابی کارآیی و شاخص‌های نسبت خودحمایتی امرژی، نسبت بارگذاری محیطی استاندارد، نسبت بارگذاری محیطی اصلاح شده، شاخص پایداری امرژی استاندارد و شاخص پایداری امرژی اصلاح شده برای ارزیابی پایداری در بوم‌نظام زراعی کلزا محاسبه شد.

نتایج و بحث

ساختار امرژی ورودی: مقادیر امرژی مهم‌ترین جریان‌های منابع محیطی و ورودی‌های خریداری شده و سهم هر یک از آن‌ها از ورودی امرژی کل در بوم‌نظام زراعی کلزا در جدول ۳ نشان داده شده‌اند.

امرژی خورشیدی برای هر ورودی در این جدول، با ضرب مقدار آن ورودی در ضریب تبدیل خورشیدی مربوطه‌اش به‌دست آمده است. ورودی امرژی کل، به‌عنوان امرژی کل حمایت‌کننده بوم‌نظام زراعی کلزا برابر با $۱/۶۴\times۱۰^{۱۶}$ امژول خورشیدی در هکتار در سال (جدول ۳) محاسبه شد. قبلاً این مقدار برای نظام تولید معیشتی و تجاری کلزا در شهرستان خرم‌آباد به‌ترتیب $۲/۴۷\times۱۰^{۱۶}$ و $۴/۱۳\times۱۰^{۱۶}$ امژول خورشیدی در هکتار در سال (Amiri et al., 2019) بود.

ورودی‌های محیطی تجدیدپذیر (R): این ورودی‌ها شامل نور خورشید، باران و باد هستند. سهم این ورودی‌ها از ورودی امرژی کل در بوم‌نظام زراعی کلزا پایین (۶/۷۶ درصد) بود (شکل ۲) که نشان‌دهنده مصرف کم منابع محیطی تجدیدپذیر برای تولید کلزا در شهرستان کلاله است.

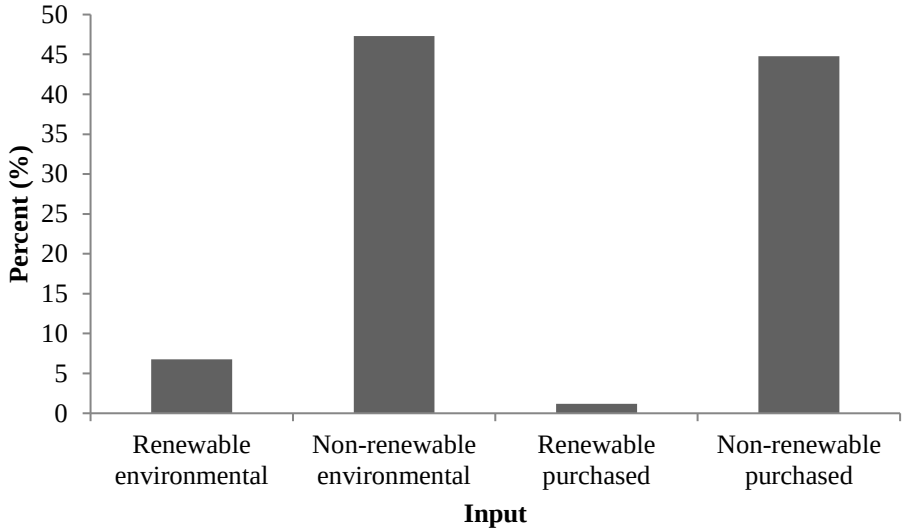
باران بیشترین مقدار امرژی بین منابع تجدیدپذیر محیطی در نظام زراعی کلزا را داشت (جدول ۳). سرچشمه تمام منابع تجدیدپذیر محیطی در ژئوبیو سفر از یک منبع یکسان است. بنابراین، براساس نظر (Odum, 2000) برای پرهیز از دوباره‌کاری، بزرگ‌ترین ورودی امرژی تجدیدپذیر محیطی، به‌عنوان ورودی محیطی تجدیدپذیر کل در نظر گرفته می‌شود که در اینجا باران می‌باشد. بیشتر بودن امرژی باران نسبت به سایر ورودی‌های محیطی تجدیدپذیر، به‌دلیل بارندگی مطلوب و روزهای ابری زیاد و همچنین سرعت پایین باد در این شهرستان است. در مطالعه ارزیابی پایداری بوم‌نظام‌های زراعی پاییزه و بهاره سیب‌زمینی در شهرستان گرگان هم مشخص شد که بیشترین میزان امرژی بین ورودی‌های محیطی تجدیدپذیر، متعلق به باران بود (Shahhoseini et al., 2020).

ورودی‌های محیطی تجدید ناپذیر (N0): بین ورودی‌های محیطی و خریداری شده تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر، بیشترین سهم از ورودی امرژی کل به ورودی¬های محیطی تجدید¬ناپذیر تعلق داشت (۴۷/۳۱ درصد) (شکل ۲). سهم بالای این ورودی در بوم‌نظام زراعی کلزا نشان‌دهنده این موضوع است که هزینه‌های محیطی تولید کلزا در شهرستان کلاله بحرانی است. ورودی محیطی تجدیدناپذیر برای این پژوهش، شامل فرسایش خاک بود. همچنین در میان تمام ۱۴ ورودی در نظر گرفته شده در این پژوهش، سهم فرسایش خاک از ورودی امرژی کل، بالاترین مقدار بود (جدول ۳). علت اصلی این امر، بارندگی سالانه زیاد در این شهرستان (۹۸۰ میلی‌متر) و عملیات خاک‌ورزی نامناسب و کاربرد زیاد ماشین‌آلات در مزارع کلزا در شهرستان کلاله می‌باشد. به نظر می‌رسد، اجرای روش‌های خاک‌ورزی حفاظتی و کاربرد ماشین‌آلات چند منظوره، با هدف کاهش دفعات ورود آن‌ها به مزرعه، در جلوگیری از افزایش فرسایش خاک و در نتیجه، کاهش ورودی امرژی به مزارع مؤثر است. سهم فرسایش خاک از ورودی امرژی کل در تحقیقی با شرایط مشابه این پژوهش، برای کشت رایج ذرت علوفه‌ای در دانمارک، ۳/۳ درصد به‌دست آمد (Ghaley et al., 2018).

جدول ۳- منابع طبیعی و اقتصادی، تجدیدپذیری، ضریب تبدیل و امرژی خورشیدی کلزا

Table 3- Natural and economic flow, renewability, transformity and solar emergy for rapeseed

متغیر Variable	واحد Unit	جریان یک‌ساله خام Raw annual flow	ضریب تجدیدپذیری Renewability factor	ضریب تبدیل خورشیدی Solar transformity ($sej.unit^{-1}$)	امرژی خورشیدی Solar emergy ($sej.ha^{-1}.yr^{-1}$)	امرژی خورشیدی Solar emergy (%)	منابع ضریب تبدیل References for transformity
ورودی‌های محیطی تجدیدپذیر Renewable environmental inputs							
نور خورشید Sunshine	ژول J	1.33E+13	1	1	1.33E+13	0	Odum (1996)
باران Rainfall	ژول J	4.84E+10	1	2.30E+04	1.11E+15	6.76	Odum (1996)
باد Wind	ژول J	1.17E+10	1	1.86E+03	2.18E+13	0	Odum (1996)
جمع Subtotal					1.11E+15	6.76	
ورودی‌های محیطی تجدیدناپذیر Non-renewable environmental inputs							
شدت فرسایش خاک Soil erosion	ژول J	8.24E+10	0	9.42E+04	7.76E+15	47.31	Ghaley et al. (2018)
جمع Subtotal					7.76E+15	47.31	
ورودی‌های بازاری Purchased inputs							
کود نیتروژن N fertilizer	گرم g	8.49E+04	0	4.84E+09	4.11E+14	2.50	Ghisellini et al. (2014)
کود فسفر P fertilizer	گرم g	4.21E+04	0	4.97E+09	2.09E+14	1.07	Ghisellini et al. (2014)
کود گوگرد S fertilizer	گرم g	2.44E+04	0	6.94E+07	1.69E+12	0.01	Martin et al. (2006)
علف‌کش Herbicide	گرم g	1.30E+03	0	1.13E+10	1.47E+13	0.08	Bastianoni et al. (2001)
حشره‌کش Insecticide	گرم g	1.20E+03	0	1.13E+10	1.36E+13	0.08	Bastianoni et al. (2001)
قارچ‌کش Fungicide	گرم g	1.25E+03	0	1.13E+10	1.41E+13	0.08	Bastianoni et al. (2001)
ماشین‌آلات Machinery	گرم g	2.92E+03	0	1.01E+10	2.95E+13	0.17	Campbell et al. (2005)
بذر Seed	ریال Rial	2.06E+06	0.43	2.50E+08	5.15E+14	3.14	Amiri et al. (2019)
سوخت فسیلی و روغن Fossil fuel and lubricant	ژول J	7.32E+10	0	8.60E+04	6.30E+15	38.41	Brandt-Wiliams (2002)
نیروی کارگری Human labor	ژول J	2.94E+07	0.10	2.22E+06	6.53E+13	0.39	Lu et al. (2009)
جمع Subtotal					7.57E+15	45.93	
جمع کل Total					1.64E+16	100.00	
عملکرد دانه Grain yield	ژول J	6.34E+10		2.59E+05	1.64E+16		محاسبه شده Calculated



شکل ۲- سهم ورودی‌های محیطی و خریداری شده تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر در بوم‌نظام زراعی کلزا

Fig. 1- Share of environmental and purchased renewable and non-renewable inputs in the rapeseed farming ecosystem

ورودی‌های خریداری شده تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر

(F_R, F_N): ورودی‌های بازاری تجدیدپذیر،کمترین سهم در میان ورودی‌های محیطی و خریداری شده تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر را داشت (۱/۱۷ درصد)؛ درحالی‌که سهم ورودی‌های بازاری تجدیدناپذیر، بسیار زیادتر از آن (۴۴/۷۶ درصد) بود (شکل ۲)، که نشان‌دهنده وابستگی زیاد ورودی‌های خریداری شده به منابع تجدیدناپذیر و در نتیجه، فشار زیاد به محیط، برای تولید کلزا در شهرستان کلاله است. همچنین، سهم زیاد ورودی‌های خریداری شده که اغلب خارجی نیز هستند، در نظام تولید کلزا نشان‌دهنده این موضوع است که این نظام زراعی، یک نظام باز است و به شدت تحت تأثیر ورودی‌های خریداری شده از بازار قرار دارد. بنابراین، مدیریت و مصرف بهینه ورودی‌های بازاری، به‌ویژه ورودی‌های تجدیدناپذیر، به‌منظور کنترل و کاهش سهم منابع تجدیدناپذیر در تولید محصول ضروری است. در مطالعه‌ای میزان ورودی امرژی خریداری شده برای بوم‌نظام سیب‌زمینی در فلوریدای آمریکا $۱/۰۳\times۱۰^{۱۶}$ امژول خورشیدی در هکتار محاسبه شد (Brandt-Wiliams, 2002).

در این مطالعه، ماشین‌آلات کمترین سهم بین تمام ورودی‌ها به بوم‌نظام زراعی کلزا را داشت (۰/۱۷ درصد) (جدول ۳)، امّا سهم سوخت فسیلی، بیشترین میزان بین تمام ورودی‌های خریداری شده در نظام زراعی کلزا بود (۳۸/۴۱ درصد). براساس مطالعه میدانی، پمپ‌های آبیاری در اغلب مزارع، گازوئیلی و فرسوده بودند. همچنین، عملیات مکرر خاک‌ورزی و کاربرد ماشین‌آلات فرسوده، به‌ویژه تراکتور، در اغلب مزارع، موجب افزایش مصرف سوخت و در نتیجه، سهم زیاد این ورودی در تولید کلزا در این شهرستان شد. آموزش و تشویق کشاورزان به کاربرد روش‌های خاک‌ورزی مناسب، نوسازی ماشین‌آلات و پمپ‌های دیزلی آبیاری یا برقی کردن آن‌ها، می‌تواند در کاهش مصرف سوخت و در نتیجه، کاهش ورودی امرژی به نظام تولید کلزا مؤثر باشد. در عین حال، میزان امرژی ورودی نیروی کارگری $۶/۵۳\times۱۰^{۱۳}$ امژول خورشیدی در هکتار در سال بود. سهم بسیار کم این ورودی در تولید محصول (۰/۳۹)، نشان می‌دهد که نظام تولید کلزا در شهرستان کلاله، تا حدود زیادی، تجاری است. میزان امرژی نیروی کارگری برای نظام‌های تولید گندم، پیاز و سیر در منطقه سیستان به‌ترتیب $۵/۲۲\times۱۰^{۱۴}$، $۲/۸۲\times۱۰^{۱۵}$ و $۵/۰۴\times۱۰^{۱۵}$ امژول خورشیدی در هکتار محاسبه شد (Yasini et al., 2020).

در این پژوهش، میزان امرژی برای ورودی بذر $۵/۱۵\times۱۰^{۱۴}$ امژول خورشیدی در هکتار در سال به‌دست آمد (جدول ۳) که بیشتر از مقدار گزارش شده برای تولید معیشتی ($۴/۴۰\times۱۰^{۱۴}$ امژول خورشیدی در هکتار در سال) و تجاری ($۳/۳۰\times۱۰^{۱۴}$ امژول خورشیدی در هکتار

در سال) کلزا در خرم‌آباد (Amiri et al., 2019) بود. بر اساس اطلاعات پرسشنامه‌ها، مصرف بذر برای کاشت در شهرستان کلاله، در هر دو شرایط دست‌پاش و ماشینی، بیشتر از مقدار توصیه شده بود. بنابراین، آموزش کشاورزان در خصوص نحوه کشت مناسب و تنظیم ماشین‌های کاشت، در کاهش مصرف این ورودی و در نتیجه، کاهش ورودی امرژی و افزایش کارآیی در نظام تولید کلزا می‌تواند مؤثر باشد. سهم ورودی آفت‌کش در نظام زراعی کلزا در شهرستان کلاله پایین (۰/۲۴ درصد) بود که نشان‌دهنده سلامت نسبی این محصول از لحاظ کاربرد سموم شیمیایی در مزارع این شهرستان است. کنترل دستی علف‌های هرز و عدم شیوع آفت و بیماری در اغلب مزارع، در کاهش قابل توجه سهم این ورودی در تولید کلزا مؤثر بود. همچنین کود نیتروژن، بیشترین سهم از ورودی امرژی کل بین کودهای شیمیایی را داشت (۲/۵۰ درصد) (جدول ۳). مصرف کودهای آلی می‌تواند تا حد امکان، در کاهش سهم این ورودی شیمیایی و در نتیجه، افزایش سلامت محصول مؤثر باشد.

ارزیابی شاخص‌های امرژی: شاخص‌های امرژی برای تعیین کارآیی، تجدیدپذیری، فشار محیطی و پایداری نظام‌های تولید به‌کار می‌رود (Odum, 2000; Brown & Ulgiati, 2004). ارزیابی این شاخص‌ها در بوم‌نظام‌ها به شناسایی و کمّی‌سازی اثرات محیطی، اقتصادی و پایداری آن‌ها کمک کرده و نتایج آن در سطح محلی برای کشاورزان و سیاست‌گذاران برای اتخاذ بهترین تصمیم برای رسیدن به کشاورزی پایدار مؤثر است (Jafari et al., 2018).

ضریب تبدیل (Tr) و امرژی ویژه (SpE): متوسط عملکرد دانه در نظام زراعی مورد بررسی ۲۲۳۸/۶ کیلوگرم در هکتار بود که کارآیی نظام در تبدیل ورودی‌ها به خروجی اقتصادی را نشان می‌دهد. همچنین امرژی اختصاص یافته به عملکرد دانه در نظام تولید کلزا در شهرستان کلاله $۱/۶۴\times۱۰^{۱۶}$ امژول خورشیدی در هکتار در سال برآورد شد. ضریب تبدیل و امرژی ویژه، به‌عنوان مقادیر امرژی واحد، بیانگر کارآیی یک نظام تولید هستند. مقادیر کمتر این شاخص‌ها نشان‌دهنده عملکرد و کارآیی بیشتر فرآیند تولید در رقابت محیطی و اقتصادی است؛ به این معنی که به‌ازای هر واحد از محصول خروجی، ورودی امرژی کمتری اختصاص یافته است (Odum, 2000).

جدول ٤- مقادیر شاخص‌های امرژی در بوم‌نظام زراعی کلزا

Table 4- The values of emergy indices in rapeseed production system

شاخص Index	واحد Unit	بوم‌نظام کلزا Rapeseed ecosystem
ضریب تبدیل Transformity	امژول خورشیدی بر ژول $sej.j^{-1}$	2.59E+05
امرژی ویژه Specific emergy	امژول خورشیدی بر گرم $sej.g^{-1}$	7.33E+09
تجدیدپذیری امرژی Renewability	درصد %	8.16
نسبت عملکرد امرژی Emergy yield ratio	-	2.17
نسبت سرمایه‌گذاری امرژی Emergy investment ratio	-	0.85
نسبت خودحمایتی امرژی Emergy self-support ratio	-	0.54
نسبت بارگذاری محیطی استاندارد Standard environmental loading ratio	-	13.81
نسبت بارگذاری محیطی اصلاح شده Modified environmental loading ratio	-	11.27
شاخص پایداری امرژی استاندارد Standard emergy sustainability index	-	0.16
شاخص پایداری امرژی اصلاح شده Modified emergy sustainability index	-	0.19

مقدار ضریب تبدیل و امرژی ویژه نظام زراعی کلزا به‌ترتیب ۲/۵۹×۱۰^۵ امژول خورشیدی بر ژول و ۷/۳۳×۱۰^۹ امژول خورشیدی بر گرم بود (جدول ۴) که نشان می‌دهد، بوم‌نظام زراعی کلزا در شهرستان کلاله از کارآیی تولید بالایی برخوردار است. مقدار ضریب تبدیل در این تحقیق کمتر از مقادیر ۸/۰۲×۱۰^۵ و ۲/۶۰×۱۰^۵ امژول خورشیدی بر ژول به‌ترتیب برای نظام‌های معیشتی و تجاری تولید کلزا در خرم‌آباد بود. همچنین، میزان امرژی ویژه در این پژوهش کمتر از مقدار ۲/۲۵×۱۰^۱۰ و بیشتر از مقدار ۷/۲۴×۱۰^۹ امژول خورشیدی بر گرم، به‌ترتیب برای تولید معیشتی و تجاری کلزا در خرم‌آباد بود (Amiri et al., 2019).

تجدیدپذیری امرژی (%R): این شاخص نشان‌دهنده سهم منابع تجدیدپذیر در حمایت از یک نظام تولید می‌باشد (Odum, 2000). نسبت تجدیدپذیری امرژی در این پژوهش برای نظام زراعی کلزا ۸/۱۶ درصد بود (جدول ۴). به عبارت دیگر، ۹۱/۸۴ درصد از کل امرژی ورودی در این نظام تولید، وابسته به منابع تجدیدناپذیر است که بخش عمده آن مربوط به فرسایش خاک و سوخت فسیلی می‌باشد. با کاهش سهم این منابع در نظام زراعی کلزا تا حد امکان، می‌توان تجدیدپذیری و در نتیجه، پایداری نظام زراعی را افزایش داد. افزایش سهم منابع تجدیدپذیر و کاهش مصرف منابع تجدیدناپذیر در یک نظام تولید، موجب موفقیت آن نظام در رقابت اقتصادی و در نتیجه، افزایش پایداری می شود (Asgharipour et al., 2019)؛ زیرا منابع تجدیدناپذیر با گذشت زمان کمیاب‌تر می‌شوند (Brown & Ulgiati, 2004). مقدار تجدیدپذیری در این پژوهش بیشتر از مقدار ۵/۳۰ برای نظام تجاری و کمتر از مقدار ۱۹/۹۰ درصد برای نظام معیشتی تولید کلزا در خرم‌آباد (Amiri et al., 2019) بود. این شاخص برای بوم‌نظام تولید متداول ذرت علوفه‌ای در دانمارک ۱۶ درصد گزارش شده است (Ghaley et al., 2018).

نسبت عملکرد امرژی (EYR): این شاخص نشان‌دهنده کارآیی مصرف منابع و توانایی یک نظام در مصرف منابع محیطی، از طریق سرمایه‌گذاری در منابع خریداری شده می‌باشد و مقادیر بیشتر آن نشان‌دهنده جذب بیشتر امرژی محیطی در نظام است (Brown & Ulgiati, 2004). مقدار EYR در این تحقیق ۲/۱۷ بود (جدول ۴) که نشان می‌دهد، نظام زراعی کلزا در شهرستان کلاله از کارآیی مصرف منابع بالایی برخوردار است. کمترین مقدار برای EYR یک است که در این شرایط، سهم منابع محیطی در یک نظام تولید، کمترین مقدار و وابستگی به منابع اقتصادی در بالاترین سطح است؛ بنابراین، مقادیر بیشتر این شاخص، مطلوب‌تر است (Asgharipour et al., 2019). اجرای راهکارهای کاهش مصرف منابع اقتصادی، برای مثال، نوسازی ماشین‌آلات و پمپ‌های آبیاری برای افزایش راندمان و در نتیجه، کاهش مصرف سوخت و نیز استفاده از بذور با قوه نامیه و درصد جوانه‌زنی بیشتر برای کاهش مصرف بذر (به‌عنوان ورودی اقتصادی) موجب افزایش این شاخص و در نتیجه، کارآیی مصرف بیشتر خواهد شد. این شاخص، حاصل تقسیم خروجی امرژی کل (محیطی و خریداری شده) بر امرژی ورودی خریداری شده است. بنابراین، کاهش مصرف منابع اقتصادی و افزایش مصرف ورودی‌های محیطی، در افزایش این شاخص و بهبود کارآیی مؤثر است (Odum, 2000). مقدار EYR در این پژوهش کمتر از مقدار ۲/۳۱ برای نظام تولید تجاری کلزا در خرم‌آباد (Amiri et al., 2019) و بیشتر از مقادیر ۱/۵۳، ۱/۲۰، ۱/۱۵، ۱/۰۵ و ۱/۰۷ به‌ترتیب برای نظام‌های تولید معیشتی کلزا در خرم‌آباد (Amiri et al., 2019) و تولید ذرت (Zhang et al., 2012)، برنج، سبزیجات و تناوب برنج و سبزیجات در چین (Lu et al., 2010) به‌دست آمد.

نسبت سرمایه‌گذاری امرژی (EIR): این شاخص، میزان سرمایه‌گذاری یک نظام تولید در منابع اقتصادی و میزان وابستگی آن به محیط را نشان می‌دهد (Odum, 2000). مقدار EIR در این تحقیق ۰/۸۵ بود (جدول ۴) که نشان‌دهنده کارآیی اقتصادی بالای نظام زراعی کلزا می‌باشد. مقادیر کمتر برای این شاخص در یک نظام، نشان‌دهنده هزینه‌های اقتصادی کمتر و وابستگی بیشتر به محیط بوده و مطلوب‌تر است (Odum, 2000). بنابراین، افزایش سهم منابع محیطی در نظام تولید و کاهش مصرف ورودی‌های اقتصادی و جایگزین کردن این ورودی‌ها با منابع محیطی، برای مثال استفاده از منابع انرژی محیطی در تامین سوخت یا کنترل زیستی آفات، در کاهش این شاخص و افزایش کارآیی اقتصادی و پایداری مؤثر است. مقدار EIR در این تحقیق کمتر از مقادیر ۱/۸۶ برای نظام معیشتی تولید کلزا در خرم‌آباد (Amiri et al., 2019)، ۲/۷۴ و ۲/۲۹ به‌ترتیب برای تولید گندم و ذرت در جهرم (Houshyar et al., 2018) و ۲/۹۴ و ۱/۳۰ به‌ترتیب برای تولید گندم و یولاف در چین (Zhai et al., 2017) و بیشتر از مقدار ۰/۷۶ برای نظام تجاری تولید کلزا در خرم‌آباد

(Amiri et al., 2019) بود.

نسبت خودحمایتی امرژی (ESR): این شاخص، توانایی یک نظام در حمایت از خود را نشان داده و بیان‌کننده میزان وابستگی آن نظام به محیط زیست است. بنابراین، مقادیر بیشتر این شاخص مطلوب‌تر است (Xi & Qin, 2009). مقدار ESR در این تحقیق برای بوم‌نظام زراعی کلزا ۰/۵۴ بود (جدول ۴) که نشان می‌دهد، این نظام وابستگی زیادی به محیط زیست داشته و پتانسیل زیادی برای افزایش بهره‌وری و سرمایه‌گذاری اقتصادی دارد. افزایش سهم ورودی‌های محیطی در نظام زراعی کلزا، برای مثال، استفاده از نور خورشید (به‌عنوان یک منبع محیطی) برای تولید الکتریسیته مورد نیاز پمپ‌های آبیاری، موجب افزایش این شاخص و پایداری بیشتر نظام خواهد شد. مقدار ESR در این تحقیق بسیار بیشتر از مقدار ۰/۰۳ محاسبه شده برای نظام تولید سیب‌زمینی در چین (Zhai et al., 2017) بود.

نسبت بارگذاری محیطی استاندارد (ELR) و نسبت بارگذاری محیطی اصلاح شده (ELR*): ELR نشان‌دهنده فشار یک نظام تولید بر محیط است (Asgharipour et al., 2019). این شاخص برای بوم‌نظام زراعی کلزا ۱۳/۸۱ بود (جدول ۴) که نشان‌دهنده فشار زیاد این نظام تولید بر محیط زیست و پایداری محیطی کم می‌باشد. دلیل اصلی این موضوع مقدار زیاد فرسایش خاک (به‌عنوان یک ورودی محیطی تجدیدناپذیر) در نظام زراعی کلزا و مصرف نامعقول برخی ورودی‌های اقتصادی، به‌ویژه سوخت فسیلی در این نظام است که موجب تمرکز جریان وسیعی از منابع تجدیدناپذیر در یک محیط کوچک شده است. این شاخص نشان‌دهنده فشار ناشی از مصرف ورودی‌های محیطی تجدیدناپذیر و ورودی‌های اقتصادی بوده و مقادیر کمتر آن مطلوب‌تر است (Lu et al., 2014). ELR بر اساس جمع ورودی‌های محیطی تجدیدناپذیر و اقتصادی تقسیم بر ورودی‌های محیطی تجدیدپذیر می‌باشد. بنابراین، تغییر کمیت و کیفیت مصرف این ورودی‌ها در راستای کاهش سهم آن‌ها از ورودی امرژی کل درکاهش فشار محیطی مؤثر است. افزایش سطح کشت با هدف کاهش تمرکز شدت جریان ورودی تجدیدناپذیر، اجرای روش‌های خاک‌ورزی حفاظتی به‌منظور کاهش فرسایش خاک (به عنوان یک ورودی محیطی تجدیدناپذیر) در کنار کاربرد منابع تجدیدپذیر برای تامین ورودی‌های اقتصادی، مانند مصرف کودهای آلی به‌جای شیمیایی، در کاهش فشار محیطی و در نتیجه، افزایش پایداری نظام تولید کلزا مؤثر است. ارزیابی پایداری نظام‌های تولید لوبیا در خرم‌دشت نشان داد، کاربرد روش‌های خاک‌ورزی حفاظتی و جایگزینی کودهای شیمیایی تو سط کودهای آلی، در افزایش پایداری محیطی نظام تولید مؤثر است (Asgharipour et al., 2019). توجیه کشاورزان در خصوص اهمیت کاهش فشار محیطی در دستیابی به پایداری بلندمدت و حمایت مالی از آن‌ها در جهت نوسازی تجهیزات برای مصرف کمتر منابع تجدیدناپذیر، در رسیدن به این هدف مؤثر است. مقدار ELR در این پژوهش برای نظام زراعی کلزا کمتر از مقادیر ۳۱ و ۱۹/۷۵ به‌ترتیب برای تولید سیب‌زمینی در چین (Zhai et al., 2017) و تولید تجاری کلزا در خرم‌آباد (Amiri et al., 2019) و بیشتر از مقادیر ۱۲/۶۸، ۱۰/۵۹ و ۰/۴۷ به‌ترتیب برای نظام تولید معیشتی کلزا در خرم‌آباد (Amiri et al., 2019) و تولید گندم و ذرت در چین (Wang et al., 2014) بود.

ELR* نشان‌دهنده رابطه متقابل بین امژی تجدیدپذیر کل و امرژی تجدیدناپذیر کل و مقیاس معکوسی از پایداری است. بنابراین، مقادیر پایین‌تر این شاخص، مطلوب‌تر است (Asgharipour et al., 2019). مقدار ELR* برای بوم‌نظام زراعی کلزا ۱۱/۲۷ بود (جدول ۴) که نشان‌دهنده پایداری محیطی پایین در این نظام تولید است. در هر دو شاخص ELR و ELR*، مقادیر ۲>، ۱۰-۲ و ۱۰< به‌ترتیب نشان‌دهنده فشار محیطی پایین، متوسط و بالا هستند (Brown & Ulgiati, 2004). تفاوت ELR* با ELR، جابجا شدن ورودی خریداری شده تجدیدپذیر از صورت کسر در ELR به مخرج کسر در ELR* است. به‌دلیل سهم بسیار کم منابع اقتصادی تجدیدپذیر از ورودی امرژی کل در نظام زراعی کلزا، مقدار دو شاخص ELR و ELR* در این نظام تولید تفاوت کمی داشت. بنابراین، راهکارهای توصیه شده برای کاهش مقدار ELR، به‌ویژه کاهش مصرف ورودی‌های اقتصادی تجدیدناپذیر، در کاهش مقدار ELR* نیز مؤثر است. این شاخص بر عدم سنخیت بین منابع تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر تاکید داشته و به‌عنوان مکملی برای ضریب تبدیل می‌باشد (Martin et al., 2006). افزایش سهم منابع تجدیدپذیر در هر دو ورودی محیطی و خریداری شده، موجب کاهش فشار محیطی و افزایش پایداری محیطی در نظام خواهد شد. گسترش امکانات و تجهیزات مورد نیاز برای تامین انرژی‌های محیطی تجدیدپذیر مانند نور خورشید و باد، برای مصارفی مانند تامین الکتریسیته مورد نیاز برای پمپ‌های آبیاری، در کاهش سهم ورودی‌های تجدیدناپذیر و در نتیجه، افزایش

پایداری محیطی در بوم‌نظام زراعی کلزا مؤثر است. به‌دلیل اینکه ELR^*، نسبت ورودی‌های تجدیدناپذیر به ورودی‌های تجدیدپذیر است، کاهش سهم منابع تجدیدناپذیر موجب کاهش این شاخص و پایداری بیشتر بوم‌نظام در بلندمدت نیز می‌شود؛ زیرا منابع تجدیدناپذیر با گذشت زمان کمیاب‌تر می شوند. مقدار ELR^* در این پژوهش کمتر از مقدار ۱۷/۸۵ برای نظام تولید تجاری کلزا در خرم‌آباد (Amiri et al., 2019) و بیشتر از مقادیر ۴/۰۰، ۴/۱۸، ۴/۳۵، ۴/۴۶ و ۴/۶۲ به ترتیب برای تولید معیشتی کلزا در خرم‌آباد (Amiri et al., 2019) و تولید گلخانه‌ای خیار، گوجه‌فرنگی، فلفل دلمه‌ای و بادمجان در جیرفت (Asgharipour et al., 2020) بود.

شاخص پایداری امرژی استاندارد (ESI) و شاخص پایداری امرژی اصلاح شده (ESI^*): ESI، شاخصی مرکب است و میزان سود به‌دست آمده در واحد سطح را نسبت به هزینه‌های آن در یک نظام تعیین می‌کند. بنابراین، بیشتر به بررسی جنبه اقتصادی پایداری می‌پردازد (Asgharipour et al., 2019). مقدار این شاخص برای نظام زراعی کلزا ۰/۱۶ بود (جدول ۴) که نشان‌دهنده پایداری اقتصادی کم این نظام زراعی در شهرستان کلاله است. پایین‌ترین و بالاترین مقدار برای این شاخص، به‌ترتیب صفر و بی‌نهایت می‌باشد. نظام‌هایی که مقدار این شاخص در آن‌ها کمتر از یک است، بسیار پرمصرف بوده، اثرات محیطی را تشدید کرده و به انرژی زیادی برای بقا نیاز دارند (Ulgiati & Brown, 1998). با وجود اهمیت مصرف کارآمد انرژی در کشاورزی پایدار، بر اساس اطلاعات پرسشنامه، مهم‌ترین دلیل کم بودن ESI در نظام زراعی کلزا، سهم زیاد ورودی محیطی تجدیدناپذیر (فرسایش خاک) و مصرف غیر معقول برخی ورودی‌های اقتصادی از جمله سوخت فسیلی، بذر و کود نیتروژن در این نظام تولید بود که موجب کاهش پایداری شد. آگاهی دادن، تشویق و آموزش کشاورزان در خصوص مزیت اجرای روش‌های خاک‌ورزی حفاظتی، نوسازی ماشین‌آلات، مصرف بذور با کیفیت، استفاده از کودهای دامی به‌جای شیمیایی (تا حد امکان) و به‌کارگیری انرژی‌های تجدیدپذیر محیطی، در کاهش مصرف ورودی‌های محیطی تجدیدناپذیر و اقتصادی و در نتیجه، کاهش فشار بر محیط و افزایش پایداری اقتصادی نظام تولید کلزا مؤثر است. در نظام‌های تولید، افزایش عملکرد و کاهش فشار محیطی، موجب افزایش ESI و در نتیجه، پایداری اقتصادی می‌شود (Jafari et al., 2018). مقدار ESI در این پژوهش بیشتر از مقادیر ۰/۰۳ برای نظام زراعی سیب‌زمینی در چین (Zhai et al., 2017)، ۰/۱۱۷ و ۰/۱۲۱ به‌ترتیب برای نظام‌های تولید تجاری و معیشتی کلزا در خرم‌آباد (Amiri et al., 2019) و ۰/۰۸، ۰/۰۹ و ۰/۰۵ به‌ترتیب برای نظام‌های تولید گندم، پیاز و سیر در منطقه سیستان (Yasini et al., 2020) بود.

ESI^*، مقیاس معکوسی از پایداری، در ارتباط با نسبت عملکرد یک نظام بوده و بیان‌گر مزایای نظام در رابطه با پایداری نسبی آن می‌باشد. کمترین و بیشترین مقدار برای این شاخص نیز به‌ترتیب صفر و بی‌نهایت است (Lu et al., 2014). مقدار این شاخص برای نظام زراعی کلزا ۰/۱۹ بود (جدول ۴) که نشان‌دهنده فشار محیطی زیاد طی تولید محصول و پایداری محیطی کم این نظام در شهرستان کلاله است. هر دو شاخص ESI و ESI^* به بررسی بوم شناختی یک نظام تولید، ولی از منظر متفاوت پرداخته و مقادیر بیشتر هر دو شاخص نشان‌دهنده پایداری بوم شناختی بیشتر نظام است. در هر دو شاخص ESI و ESI^* مقادیر ۱۰<، ۱۰-۱ و ۱> به‌ترتیب نشان‌دهنده نظام پایدار با فشار بسیار کم، نظام‌های زنده و خوب و نظام‌های خالی‌کننده منابع هستند (Asgharipour et al., 2019). با توجه به اهمیت پایداری محیطی برای حفظ مزیت اقتصادی یک نظام تولید، مطلوب‌ترین سیاست برای تولید کلزا در شهرستان کلاله، حفظ تعادل بین مزیت اقتصادی و پایداری محیطی در آن است. ESI^* نشان‌دهنده پایداری محیطی نظام بوده و مقادیر بالاتر آن مطلوب‌تر است (Amiri et al., 2019). افزایش سهم منابع تجدیدپذیر، از جمله کاربرد منابع تجدیدپذیر به جای منابع تجدیدناپذیر در تامین ورودی‌های اقتصادی، در کاهش فشار و افزایش پایداری محیطی و در نتیجه، افزایش ESI^* در نظام زراعی کلزا مؤثر است. مقدار ESI^* در این پژوهش بیشتر از مقدار ۰/۱۳ برای نظام تولید تجاری کلزا در خرم‌آباد (Amiri et al., 2019) و مقادیر ۰/۰۴، ۰/۰۶، ۰/۱۱ و ۰/۱۸، به‌ترتیب برای نظام با ورودی زیاد، متوسط، کم و تلفیقی تولید لوبیا در خرم‌دشت (Asgharipour et al., 2019) وکمتر از مقادیر ۰/۳۸ برای تولید معیشتی کلزا در خرم‌آباد (Amiri et al., 2019)، ۰/۴۵ برای تولید ذرت در چین (Zhang et al., 2012) و ۱/۴۸ برای نظام بوم شناختی تولید لوبیا در خرم‌دشت (Asgharipour et al., 2019) بود.

نتیجه‌گیری

بیشترین سهم از ورودی امرژی کل در بوم‌نظام زراعی کلزا مربوط به ورودی محیطی تجدیدناپذیر (فرسایش خاک) و کمترین سهم مربوط به ورودی‌های خریداری شده تجدیدپذیر بود. سوخت فسیلی بیشترین سهم، در میان تمام ورودی‌های خریداری شده، از ورودی امرژی کل را داشت. ارزیابی شاخص‌های ضریب تبدیل و امرژی ویژه نشان داد، بوم‌نظام زراعی کلزا کارآیی تولید بالایی در شهرستان کلاله دارد. امّا ارزیابی شاخص تجدیدپذیری امرژی نشان داد، تجدیدپذیری در این نظام تولید پایین بود که دلیل آن وابستگی زیاد به منابع تجدیدناپذیر بود. بر اساس نسبت عملکرد امرژی، کارآیی مصرف منابع نیز در این نظام زراعی، زیاد بود. تحلیل نسبت سرمایه‌گذاری امرژی نشان داد، هزینه‌های اقتصادی در این نظام، به نسبت کم و کارآیی اقتصادی زیاد می‌باشد. ارزیابی نسبت خودحمایتی امرژی نشان داد وابستگی این نظام به محیط زیاد بوده و پتانسیل بالایی برای افزایش سرمایه‌گذاری و بهره‌وری اقتصادی دارد. بر اساس تحلیل نسبت‌های بارگذاری محیطی، این نظام فشار زیادی به محیط زیست وارد ساخته و پایداری محیطی آن پایین می‌باشد. دلیل این امر، فرسایش بالای خاک، به‌عنوان یک ورودی محیطی تجدیدناپذیر و مصرف غیر معقول برخی ورودی‌های خریداری شده تجدیدناپذیر از جمله سوخت فسیلی بود. اجرای روش‌های خاک‌ورزی حفاظتی و استفاده از انرژی‌های محیطی تجدیدپذیر، مانند انرژی خورشیدی در تامین الکتریسیته مورد نیاز پمپ‌های آبیاری، در کاهش مصرف منابع تجدیدناپذیر و در نتیجه، کاهش فشار محیطی و افزایش پایداری محیطی در این نظام مؤثر است.

ارزیابی شاخص‌های پایداری امرژی نشان داد، پایداری اقتصادی در این نظام زراعی پایین بود که به‌دلیل وابستگی زیاد به برخی ورودی‌های اقتصادی و فشار محیطی زیاد در این نظام بود. کاهش مصرف منابع خریداری شده، به‌ویژه منابع خریداری شده تجدیدناپذیر در کنار حفظ یا بهبود عملکرد در این نظام زراعی، موجب بهبود این شاخص و افزایش پایداری اقتصادی خواهد شد. کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی از طریق نوسازی ماشین‌آلات و پمپ‌های آبیاری و مصرف کودهای آلی به‌جای شیمیایی، تا حد امکان، در این خصوص مؤثر است. به‌عنوان نتیجه نهایی، کارآیی تولید، کارآیی مصرف منابع و کارآیی اقصادی در نظام زراعی کلزا بالا بود. علی‌رغم وابستگی زیاد به محیط در این نظام، سهم زیاد فرسایش خاک به‌عنوان یک ورودی محیطی تجدیدناپذیر موجب تجدیدپذیری پایین، فشار محیطی زیاد و پایداری محیطی و اقتصادی پایین در این نظام شد. اجرای راهکارهای توصیه شده برای کاهش مصرف منابع تجدیدناپذیر و استفاده از منابع تجدیدپذیر در تامین ورودی‌های خریداری شده، در کنار آگاهی، آموزش و تشویق کشاورزان در این زمینه، در افزایش پایداری محیطی و اقتصادی بوم‌نظام زراعی کلزا مؤثر است.

سپاسگزاری

بدین وسیله از دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، کشاورزان کلزا کار و اداره جهاد کشاورزی شهرستان کلاله برای مساعدت و همکاری در این پژوهش سپاسگزاری می‌گردد.

References

1. 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. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.091
2. 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. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2020.109021
3. 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*(2), 1-21. https://doi.org/10.1007/s10661-018-7123-3
4. Bastianoni, S., Marchettini, N., Panzieri, M., & Tiezzi, E. (2001). Sustainability assessment of a farm in the Chianti area (Italy). *Journal of Cleaner Production, 9*, 365-373. doi:10.1016/j.ecolmodel.2008.09.003
5. Brandt-Williams, S.L. (2002). Handbook of Emergy Evaluation: Folio #4 Emergy of Florida Agriculture. Center for Environmental Policy, University of Florida, Gainesville, FL, USA.
6. Brown, M.T., Campbell, D.E., De Vilbiss, C., & Ulgiati, S. (2016). The geobiosphere emergy baseline: A synthesis.

Ecological Modelling, *339*, 92-95. http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2016.03.018

7. Brown, M.T., & Ulgiati, S. (2004). Energy quality, emergy, and transformity: H.T. Odum's contributions to quantifying and understanding systems. *Ecological Modelling*, *178*, 201-213. doi:10.1016/j.ecolmodel.2004.03.002
8. Campbell, D.E., Brandt-Williams, S.L., & Meisch, M.E.A. (2005). Environmental accounting using Emergy: Evaluation of the state of West Virginia. EPA/600/R-02/011. USEPA, Office of Research and Development, Washington, DC, P. 116.
9. Campbell, D.E., & Laherrere, J. (1998). The end of cheap oil. *American Journal of Science*, *278*(3), 78-83.
10. Cochran, J. (2003). Patterns of sustainable agriculture adoption/non-adoption in Panama. A thesis submitted to McGill University. McGill University, Montreal, Canad: 1-114.
11. 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. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.12.027
12. Ghisellini, P., Zucaro, A., Viglia, S., & Ulgiati, S. (2014). Monitoring and evaluating the sustainability of Italian agricultural system. An emergy decomposition analysis. *Ecological Modelling*, *271*, 132-148. http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2013.02.014
13. Houshyar, E., Wu, X.F., & Chen, G.Q. (2018). Sustainability of wheat and maize production in the warm climate of southwestern Iran: An emergy analysis. *Journal of Cleaner Production*, *172*, 2246-2255. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.187
14. 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. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.089
15. Kazemi, H., Hassanpour Bourkheili, S., Kamkar, B., Soltani, A., Gharanjic, K., & Nazari, N.M. (2016). Estimation of greenhouse gas (GHG) emission and energy use efficiency (EUE) analysis in rainfed canola production (Case study: Golestan province, Iran). *Energy*, *116*, 694-700. http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2016.10.010
16. Kumaraswamy, S. (2012). Sustainability issues in agro-ecology: Socio-ecological perspective. *Agricultural Sciences*, *3*(2), 153-169. DOI:10.4236/as.2012.32018
17. Lu, H., Yuan, Y., Campbell, D.E., Qin, P., & Cui, L. (2014). Integated water quality, emergy and economic evaluation of three bioremediation treatment systems for eutrophic water. *Ecological Engineering*, *69*, 244-254. http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.04.024
18. 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*, 2727-2735. doi:10.1016/j.jenvman.2010.07.025
19. Lu, H.F., Kang, W.L., Campbell, D.E., Ren, H., Tand, Y.W., Fengd, R.X., Luo, J.T., & Chen, F.P. (2009). Emergy and economic evaluations of four fruit production systems on reclaimed wetlands surrounding the Pearl River Estuary, China. *Ecological Engineering*, *35*, 1743-1757. doi:10.1016/j.ecoleng.2009.08.001
20. 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 and Environment*, *115*, 128-140. doi:10.1016/j.agee.2005.12.016
21. Odum, H.T. (1996). Environmental accounting: Emergy and Environmental Decision Making. John Wiley and Sons, New York. USA. 384 pp.
22. Odum, H.T. (2000). Handbook of Emergy Evaluation. A Compendium of Data for Emergy Computation Folio #2 Emergy global processes. Center of Environmental Policy, University of Florida, Gainesville. 28 pp.
23. Patterson, M., McDonald, G., & Hardy, D. (2017). Is there more in common than we think? Convergence of ecological footprinting, emergy analysis, life cycle assessment and other methods of environmental accounting. *Ecological Modelling*, *362*, 19-36. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2017.07.022
24. Quintero-Angel, M., & Gonzalez-Acevedo, A. (2018). Tendencies and challenges for the assessment of agricultural sustainability. Agriculture, *Ecosystems and Environment*, *254*, 273-281. https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.11.030
25. Rajabi Hamedani, S., Shahabi, Z., & Rafiee, S. (2011). Energy inputs and crop yield relationship in potato production in Hamadan province of Iran. *Energy*, *36*, 2367-2371. doi:10.1016/j.energy.2011.01.013
26. Shahhoseini, H.R., Ramroudi, M., & Kazemi, H. (2020). Evaluating the resources use efficiency and sustainability indices for two potato production systems using emergy analysis (Case study: Gorgan county). *Journal of Agroecology*, *12*(1), 127-142. (In Persian with English Summary) Doi:10.22067/jag.v12i1.81189

27. Ulgiati, S., & Brown, M.T. (1998). Monitoring patterns of sustainability in natural and man-made ecosystems. *Ecological Modelling, 108*, 23-36.
28. Ulgiati, S., & Brown, M.T. (2002). Quantifying the environmental support for dilution and abatement of process emissions. The case of electricity production. *Journal of Cleaner Production, 10*, 335-348.
29. Wang, X., Dadouma, A., Chen, Y., Sui, P., Gao, W., Qin, F., Zhang, J., & Xia, W. (2014). Emergy analysis of grain production systems on large-scale farms in the North China Plain based on LCA. *Agricultural Systems, 128*, 66–78. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2014.03.005
30. Xi, Y.G., & Qin, P. (2009). Emergy evaluation of organic rice-duck mutualism system. *Ecological Engineering, 35*, 1677-1683. doi:10.1016/j.ecoleng.2007.11.006
31. 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 with English Summary)
32. 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. http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.11.028
33. Zhang, L.X., Song, B., & Chen, B. (2012). Emergy-based analysis of four farming systems: insight into agricultural diversification in rural China. *Journal of Cleaner Production, 28*, 33–44. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.10.042