



Evaluating the Sustainability of *Echium amoenum* Production System Using Emergy Analysis Approach

Mohammad Ali Ghahremani Aghbolagh Rostam Khan¹, Majid Khanali^{2*},
Rasoul Loghmanpour Zarini³, Hassan Ghasemi-Mobtaker⁴

¹PhD Student, Department of Agricultural Machinery Engineering, Faculty of Agriculture, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

^{2,4}Associate Professor, Department of Agricultural Machinery Engineering, Faculty of Agriculture, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

³Faculty Member, Department of Agriculture Engineering, National University of Skills, Tehran, Iran.

ARTICLE INFO

Article Type:

Original Research

Received: 01.02.2025

Revised: 01.21.2025

Accepted: 02.15.2025

Keyword:

Emergy Approach
Environmental Inputs
Environmental Pressure
Renewability
Solar Emergy Joule

*Corresponding Author:

Majid Khanali

Email: khanali@ut.ac.ir

ABSTRACT

Overexploitation of environmental resources and excessive use of chemical inputs have caused environmental issues and reduced the sustainability of agricultural systems. Therefore, changing energy consumption patterns and enhancing energy efficiency in agriculture, which are key principles of sustainable agriculture, are of great importance. Emergy analysis, as a useful tool, is widely employed for this purpose in various agricultural systems. Applying the emergy approach to evaluate the sustainability of agricultural production systems enables the implementation of proper management strategies to enhance production sustainability. This study aimed to assess the sustainability of *Echium amoenum* production system in Guilan Province. The required data were collected through field surveys and the distribution and completion of 95 questionnaires. After defining the temporal and spatial boundaries and categorizing resources into four groups renewable environmental, non-renewable environmental, purchased renewable, and purchased non-renewable, the key emergy indices studied were: Emergy Renewability (%R), Specific Emergy (SE), Emergy Yield Ratio (EYR), Environmental Loading Ratio (ELR), Emergy Self-Support Ratio (ESR), Environmental Sustainability Index (ESI) and Emergy index of agricultural product safety (EIPS), which were determined as 0.98, 1.13E+12 sej.g-1, 10.51, 0.14, 0.66, 75.07 and 0.95, respectively. According to the results, the total solar emergy input was estimated at 1.13E+18 sej.ha⁻¹.yr⁻¹. The system exhibited higher dependence on renewable environmental and purchased renewable flows than on other flows, primarily due to the region's high rainfall potential and the significant role of human labour. Replacing chemical fertilizers with organic fertilizers could enhance the economic and environmental sustainability of the system. Overall, the evaluated system demonstrated favorable sustainability. With proper management, education, and the promotion of recommended practices, sustainability could be further improved, and the environmental pressures associated with production could be mitigated.



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Analyzing energy consumption in agricultural production is critical, given the constraints on natural resources and the adverse effects of improper energy use on human health and the environment. Sustainable agricultural development necessitates a dual focus on energy efficiency and environmental conservation. Emergy analysis, a comprehensive and modern approach, is increasingly employed to assess sustainability through the quantitative and qualitative evaluation of energy and inputs used in agricultural production systems. Emergy represents the total solar energy (exergy) required both directly and indirectly for the production of goods or services, expressed in solar emergy (sej). This approach provides a valuable framework for guiding policymaking toward harmonious interactions between humans and the environment. This study focuses on *Echium amoenum* production, utilizing emergy analysis to estimate emergy indices, evaluate sustainability levels, and propose strategies for sustainable and optimal resource management in Guilan province's production system. The findings aim to contribute to the development of environmentally and economically sustainable agricultural systems.

Methodology

This research was conducted in Guilan province (Figure 1). According to Cochran's formula, the required data for this study were obtained from the completion of 95 questionnaires by farmers and experts of the Ministry of Agriculture Jihad. Additionally, to gather data on the processing of *Echium amoenum*, studies were conducted at Foumanat Food Industries in the city of Fouman and Naderi Food Industries in Lahijan. According to Equation (1) to calculate the emergy corresponding to each input, the raw data for each input per unit is multiplied by the Solar transformity, resulting in the emergy value for each input, according to Iran's conditions. Inputs were divided into four categories: Renewable local flows (R), Non-renewable local flows (N), Renewable market flows (F_R), and Non-renewable market flows (F_N). This study utilized indicators such as transformity (T_r), specific emergy (SE), the emergy renewability (%R), the emergy yield ratio (EYR), the emergy investment ratio (EIR), the environmental loading ratio (ELR), the modified environmental loading ratio (ELR*), the emergy self-support ratio (ESR), the environmental sustainability index (ESI), the modified environmental sustainability (ESI*) and the emergy index of agricultural product safety (EIPS).



Figure 1. The geographical location of Guilan Province

$$Emergy(sej) = Energy(J) \times Solartransformity\left(\frac{sej}{J}\right) \quad (1)$$

Results and discussion

The Subtotal energy for *Echium amoenum* production systems was calculated to be $1.13E+18$ sej.ha⁻¹.yr⁻¹. Rainfall energy was the largest source of free environmental input. The shares of Renewable local flows, Non-renewable local flows, Renewable market flows and Non-renewable market flows were 87.2%, 0.129%, 11.52%, and 1.15%, respectively for *Echium amoenum* (Figure 2). The higher amount of rainfall energy compared to other renewable environmental flows is due to the frequent rainfall and the large number of cloudy days in the mountainous regions where this plant is cultivated in Guilan province. The largest share of purchased flows was related to human labor and chemical fertilizers. The high energy associated with human labor was due to the semi-mechanized cultivation of this medicinal plant and the ineffective use of agricultural machinery in various production operations in the studied region. Reducing the consumption of these inputs to an optimal level would significantly contribute to decreasing the share of purchased inputs in the *Echium amoenum* production system. The emergy indicators for *Echium amoenum* system include transformity (T_r), 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 Index (ESI), Modified environmental sustainability (ESI*) and Emergy index of agricultural product safety (EIPS) were calculated $7.63E+07$ sej.J⁻¹, $1.13E+12$ sej.g⁻¹, 0.98, 10.51, 0.14, 0.14, 0.01, 0.66, 75.07, 1051 and 0.95 respectively. According to the Shapley Additive Explanations analysis, the most influential parameters among the purchased flows in the studied production system's total emergy were in order, human labor, nitrogen fertilizer, phosphorus fertilizer, and farmyard manure. The

parameters with the least impact on the desired output included diesel fuel and carton board boxes.

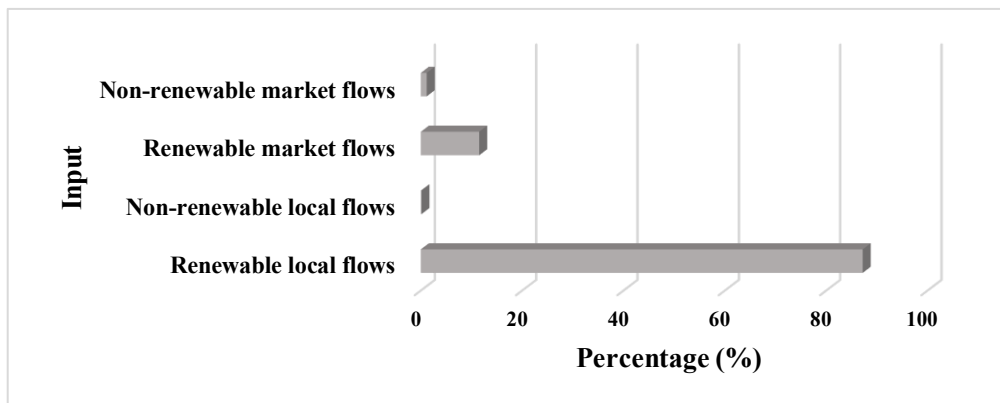


Figure 2. The contribution of environmental inputs and purchased renewable and non-renewable resources to the *Echium amoenum* production system.

Conclusion

Guilan Province is recognized as one of the leading regions in the production of medicinal plants in Iran. This study was conducted to assess the sustainability of the *Echium amoenum* production system in Guilan Province using the emergy analysis approach. Evaluating the sustainability of production systems requires a scientific and comprehensive method, for which emergy analysis is widely applied. The results of the emergy analysis indicated that the total emergy input of the studied system in Gilan Province was $1.13E+18$ $sej.ha^{-1}.yr^{-1}$. A significant portion of this amount was attributed to environmental flows involved in the study, including rainfall and purchased flows, such as human labour. This was primarily due to the region's high rainfall potential and frequent cloudy days. Given the prominent role of human labour in the production processes of this plant, it is recommended to mechanize its cultivation to reduce dependency on labor and enhance economic profitability. Another proposed option is the use of organic fertilizers instead of the chemical fertilizers applied in the region. This substitution aims to preserve the product's properties and quality while enhancing the sustainability of the system. Excessive use of chemical fertilizers has been one of the causes of severe soil erosion in this province. Proper management of inputs could help mitigate this issue. The values of various emergy-based indices assessed in this study, including Emergy Renewability (%R), Environmental Loading Ratio (ELR) and Emergy index of agricultural product safety (EIPS), were determined to be 0.98, 0.14, and 0.95, respectively.



ارزیابی پایداری نظام تولید گل گاوزبان با استفاده از رویکرد تحلیل امرژی

محمد علی قهرمانی آقبلاغ رستم خان^۱، مجید خانعلی^{۲*}، رسول لقمانپور زرینی^۳، حسن قاسمی مبتکر^۴

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

۲- دانشیار، گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

۳- عضو هیئت علمی، گروه مهندسی کشاورزی، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

بهره‌برداری بیش از حد منابع محیطی و مصرف بی‌رویه مواد شیمیایی موجب بروز مشکلات محیط‌زیستی و کاهش پایداری نظام‌های کشاورزی شده است بنابراین تغییر الگوی مصرف انرژی و استفاده کارآمد آن در کشاورزی که از اصول کشاورزی پایدار محسوب می‌شود، اهمیت ویژه‌ای دارد. تحلیل امرژی به‌عنوان ابزاری مفید برای این منظور در نظام‌های کشاورزی مختلف به کار می‌رود. مطالعه حاضر با هدف ارزیابی پایداری نظام تولیدی گل‌گاوزبان در استان گیلان انجام گرفت. پس از تعیین مرزهای زمانی و مکانی و تقسیم‌بندی منابع به چهار گروه تجدیدپذیر محیطی، تجدیدناپذیر محیطی، خریداری‌شده تجدیدپذیر و خریداری‌شده تجدیدناپذیر؛ مهم‌ترین شاخص‌های امرژی مورد مطالعه شامل تجدیدپذیری امرژی (%R)، امرژی ویژه (SE)، نسبت عملکرد امرژی (EYR)، نسبت بار محیط‌زیستی (ELR)، نسبت خودحمایتی امرژی (ESR)، پایداری محیط‌زیستی (ESI) و امرژی ایمنی محصولات کشاورزی (EIPS) به ترتیب معادل ۰/۹۸، ۱۰^{۱۲} × ۱/۱۳ ام‌ژول خورشیدی بر گرم، ۱۰/۵۱، ۰/۱۴، ۰/۱۶۶، ۰/۷۵/۰۷ و ۰/۹۵ تعیین شدند. بر اساس نتایج، انرژی خورشیدی ورودی معادل ۱۰^{۱۸} × ۱/۱۳ ام‌ژول خورشیدی در هکتار در سال برآورد شد. در نظام مورد بررسی وابستگی به جریان‌های تجدیدپذیر محیطی و خریداری‌شده، بیش از سایر جریان‌ها بود که ناشی از پتانسیل بارش زیاد و نقش پررنگ نیروی انسانی می‌باشد. استفاده از کودهای آلی به‌جای کودهای شیمیایی می‌تواند موجب پایداری اقتصادی و محیط‌زیستی نظام حاضر گردد. به‌طور کلی، نظام مورد بررسی از سطح پایداری مطلوبی برخوردار است و با مدیریت صحیح و آموزش و ترویج گزینه‌های پیشنهادی می‌توان پایداری را بهبود بخشید و فشارهای وارد بر محیط را کاهش داد.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۱۰/۱۳

بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۱۱/۰۲

پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۱۱/۲۷

کلید واژگان:

ام‌ژول خورشیدی

تجدیدپذیری

رویکرد امرژی

فشار محیط‌زیستی

ورودی‌های محیط‌زیستی

*نویسنده مسئول: مجید خانعلی

پست الکترونیکی:

khanali@ut.ac.ir



مقدمه

در سال‌های اخیر انرژی به عنوان یکی از عوامل مهم تولید در صنعت و کشاورزی، اهمیت قابل ملاحظه‌ای یافته است [۱]. رشد اقتصادی به دلیل کند شدن کشف ذخایر جدید انرژی فسیلی و رشد صعودی و فزاینده تولیدات انرژی بر، منجر به افزایش قیمت حامل‌های انرژی در بازارهای جهانی شده است [۲]. بخش کشاورزی به منظور پاسخگویی به نیاز روزافزون غذا برای جمعیت رو به رشد کره زمین و تأمین مواد غذایی کافی و مناسب، به میزان زیادی به مصرف انرژی وابسته است [۳]. با توجه به اهمیت انرژی در بخش کشاورزی و نقش آن در ارتقای بهره‌وری، مدیریت و بهینه‌سازی مصرف انرژی یکی از مسائل پراهمیت کشاورزی ایران است [۴]. بهینه‌سازی مصرف انرژی در فرایند توسعه اقتصادی، همواره به‌عنوان یکی از اهداف کلیدی در دستیابی به توسعه پایدار مورد توجه قرار گرفته است [۵].

گیاه گل‌گاوزبان ایرانی با نام علمی *Echium amoenum* گیاهی دارویی از تیره گاوزبان^۱ می‌باشد که در مناطق زیادی از ایران کشت می‌شود. گل‌گاوزبان ایرانی گیاهی چندساله، علفی و کرک‌دار می‌باشد که ارتفاع متغیری بین ۷۰ تا ۱۰۰ سانتی‌متر دارد. این گیاه در مناطق گوناگونی از ایران تا ارتفاع ۲۵۰۰ متری از سطح دریا پراکنش دارد [۶]. گل‌گاوزبان دارای تأثیرات ضدالتهاب، ضد درد، ضد اضطراب، ضد افسردگی، ضد میکروبی و سرطانی می‌باشد که از گذشته در طب سنتی ایران مورد استفاده قرار گرفته است [۷]. از دیگر کاربردهای این گیاه دارویی می‌توان به درمان ذات‌الریه، برونشیت، بیماری‌های کلیوی، مجاری ادراری، روماتیسم، بیماری‌های قلبی، سرماخوردگی، سرفه، آرام‌بخشی و نشاط‌آوری اشاره کرد [۸]. بسته‌بندی یکی از عوامل کلیدی در زنجیره تولید و بازار هدف محصولات است. انتخاب نوع بسته‌بندی می‌تواند تأثیر بسزایی بر جذابیت محصول در بازار داشته باشد و همچنین نقش مهمی در مصرف گیاهان دارویی ایفا کند. بسته‌بندی علاوه بر کاهش حجم تولیدات، ذخیره‌سازی بهینه و مدیریت مناسب انبارداری را تسهیل می‌کند و باعث افزایش پایداری گیاهان دارویی می‌شود. بسته‌بندی گیاهان دارویی به‌صورت دمنوش گیاهی (تی‌بگ) با حفظ کیفیت، کاهش حجم، افزایش جذابیت و سهولت مصرف نقش مهمی در افزایش ارزش افزوده دارد. این فرایند از طریق ماندگاری بیشتر، امکان صادرات و ارتقای قیمت محصول باعث توسعه بازار و جذب بیشتر مشتریان می‌شود [۹].

بررسی الگوهای مصرف انرژی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در بخش تولید محصولات کشاورزی با توجه به محدودیت منابع طبیعی و تأثیرات منفی ناشی از بهره‌برداری از منابع مختلف انرژی روی سلامت انسان و محیط‌زیست، حیاتی و حائز اهمیت می‌باشد [۱۰]. افزایش زیان‌های وارده به محیط‌زیست، برخی از متخصصان حوزه کشاورزی و محیط‌زیست را به بازنگری اساسی در فرایندهای تولید محصولات کشاورزی سوق داده است [۱۱]. یکی از روش‌های توسعه پایدار کشاورزی، توجه هم‌زمان به انرژی و محیط‌زیست است. از این‌رو تحلیل امرژی برای ارزیابی و بررسی پایداری بر اساس برآورد کمی و کیفی انرژی و نهاده‌های مورد استفاده در تولیدات کشاورزی به‌عنوان یکی از روش‌های جامع و نوین محسوب می‌شود [۱۲]. یکی از مهم‌ترین معضلات مدیریت سامانه‌های تولید محصولات کشاورزی در قرن بیست‌ویکم، بهره‌وری انرژی است که مشکلات بسیار زیادی را در دستیابی به پایداری در کشاورزی ایجاد کرده است [۱۳]. برخی از علل بروز مشکلات مذکور، لحاظ کردن عوامل درون سامانه‌ای و نهاده‌های هزینه‌ای و بی‌توجهی به نهاده‌های رایگان محیطی و همچنین کیفیت انرژی مصرفی در تجزیه و تحلیل‌های انرژی در سامانه‌های تولید محصولات کشاورزی می‌باشد. پژوهش‌های زیادی که در زمینه تحلیل انرژی صورت گرفته‌اند، به دلیل نادیده گرفتن سهم عوامل طبیعی در بوم‌نظام کشاورزی، از دقت کافی برخوردار نیستند. در این پژوهش‌ها فقط عوامل و متغیرهای اقتصادی محاسبه شده است و محیط به‌عنوان یک عامل مهم و کلیدی در میزان پایداری بوم‌نظام مورد توجه قرار نمی‌گیرد [۱۴]. در راستای برطرف کردن این مشکل، در تحقیق حاضر در چارچوب یک دیدگاه طبیعت محور، شاخص امرژی معرفی می‌شود که با دیدگاهی جامع در سطح یک نظام تولید محصولات کشاورزی، تمام ورودی‌ها اعم از نهاده‌های تجدیدپذیر (نور خورشید،

¹ Boraginaceae

باد و باران) و تجدیدنپذیر رایگان (خاک)، انرژی‌های خریداری شده و خدمات را ارزیابی و پایداری یک زیست‌بوم کشاورزی از لحاظ مصرف انرژی را تبیین می‌کند؛ به طوری که می‌توان با محاسبه انرژی و طبق قانون حداکثر توانمندسازی، کارایی منابع اقتصادی مصرفی در تولیدات کشاورزی را افزایش داد تا حداکثر استفاده مفید از منابع انرژی به عمل آید و به سازماندهی سامانه برای تولید و از بین بردن محدودیت‌ها اقدام کرد. به طور خلاصه، تحلیل انرژی در برگیرنده جنبه‌های اقتصادی، اکولوژی و انرژی در نظام‌های مختلف تولید یک محصول کشاورزی است [۱۵].

برخی از محققان، انرژی و تحلیل آن را یک رابط میان محیط‌زیست و اقتصاد برشمرده‌اند [۱۶-۱۸]. در واقع مقدار انرژی یا اکسرژی در دسترس خورشیدی که در تولید محصولات به طور مستقیم یا غیرمستقیم نقش دارند، انرژی گویند که با انرژی خورشیدی ارزیابی و سنجش می‌شود. استفاده از رویکرد انرژی در جهت هدایت سیاست‌گذاری‌ها می‌تواند به رابطه و تعامل سازگار بین انسان و محیط‌زیست کمک شایانی کند [۱۹]. انرژی یکی از ابزارهای مفید در نظام‌های تولید کشاورزی است که سامانه‌های مرتبط به کشاورزی را به‌عنوان شبکه‌ای از جریان انرژی فرض می‌کند و پایداری یک نظام تولید را از لحاظ مصرف انرژی محاسبه می‌کند. بنابراین، تحلیل و برآورد شاخص‌های انرژی در سنجش پایداری یک نظام کشاورزی، نگاه دقیق و مؤثری در مورد تصمیم‌گیری‌های کلان حال و آینده ارائه می‌دهد.

تحقیقات متعددی در ایران و جهان بر اساس شاخص انرژی با هدف ارزیابی پایداری سامانه‌های تولید کشاورزی صورت گرفته است. محققان برزیلی در تحقیقی با هدف ارزیابی کشت سویا با استفاده از شاخص‌های انرژی دریافتند که تولید این محصول با توجه به قیمت مرسوم فروش و قیمت خرید نهاده‌های تولید دارای توجیه اقتصادی نیست [۲۰]. در چین چهار نوع زراعت متداول بر اساس شاخص‌های انرژی بررسی شد و نتایج نشان داد که کشت ذرت با توجه به تأثیرات محیط‌زیستی و مقدار مصرف انرژی، پایدارتر است [۲۱]. نتایج تحقیقی در چین برای ارزیابی و بررسی سامانه‌های کشت سنتی خرده‌مالکی در قیاس با سامانه‌های کشت بزرگ‌مقیاس نشان داد که کارایی انرژی محصول گندم در مزارع بزرگ به میزان ۴۱ درصد بیشتر از مزارع معمولی است. همچنین کارایی انرژی تولید ذرت در مزارع بزرگ ۸۸ درصد بیشتر از مزارع خرده‌مالکی گزارش شد [۱۹]. تحقیق دیگری با تلفیق روش ارزیابی اقتصادی و تحلیل انرژی در مورد تالاب‌های احیاشده در چین نشان داد که روش تلفیقی می‌تواند درک صحیح و کاملی از شرایط و اوضاع شاخص‌های محیط‌زیستی و اقتصادی نظام‌های کشت بیان کند [۲۲].

در تحقیقی با استفاده از روش تحلیل انرژی، پایداری پنج سامانه کشت و تولید لوبیا در استان مرکزی مقایسه و ارزیابی شد. 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 [۲۳]. در مطالعه‌ای با استفاده از روش تحلیل انرژی، کارایی مصرف منابع انرژی (نهاده‌ها) و پایداری کشت سیب‌زمینی بهاره و پاییزه استان گلستان ارزیابی و مقایسه شد. بر اساس نتایج، کل انرژی ورودی برای تولید سیب‌زمینی بهاره و پاییزه به ترتیب معادل $10^{16} \times 1/76$ و $10^{16} \times 1/71$ ام‌ژول خورشیدی بر هکتار بر سال محاسبه شد. در کشت و تولید سیب‌زمینی پاییزه، وابستگی به ورودی‌های خریداری شده بیشتر از ورودی‌های محیطی بود. همچنین بیشترین سهم از کل انرژی ورودی در هر دو سامانه کشت پاییزه و بهاره مربوط به مصرف آب زیرزمینی بود. پایداری اقتصادی کشت سیب‌زمینی پاییزه، کم‌تر از سامانه کشت بهاره بود که عمدتاً به دلیل مصرف نامناسب و غیرعلمی ورودی‌ها و نهاده‌های بازاری از قبیل بذر و سوخت‌های فسیلی شناخته شد [۲۴]. مطالعه‌ای دیگر، پایداری تولید چهار محصول گندم، چغندرقد، زعفران و جو در استان خراسان رضوی را با استفاده از روش تحلیل انرژی ارزیابی کرد. طبق نتایج، بیشترین سهم از منابع خریداری شده تجدیدنپذیر مربوط به کشت زعفران بود. همچنین بالاترین شاخص پایداری محیط‌زیستی مربوط به انرژی تولید زعفران و چغندرقد مشخص شد. در این تحقیق، کشت زعفران به عنوان یک محصول پایدار با کم‌ترین فشار وارده بر محیط‌زیست، پیشنهاد شد. با توجه به نتایج تحلیل انرژی و شاخص‌های اقتصادی، تولید زعفران در مقایسه با سه محصول مورد مطالعه دیگر، دارای بیشترین پایداری و سود اقتصادی شناخته شد [۲۵].

در یک مطالعه پایداری نظام تولید شش محصول زراعی (گندم، پیاز، سیر، رازیانه، زیره سبز و سیاه‌دانه) در شهرستان هیرمند با استفاده از تحلیل امرژی و اقتصادی ارزیابی شد. کل انرژی حمایت‌کننده نظام‌های تولید گندم، پیاز، سیر، رازیانه، زیره سبز و سیاه‌دانه شهرستان هیرمند به ترتیب برابر $۱۰^{۱۶} \times ۳/۲۵$ ، $۱۰^{۱۶} \times ۳/۳۷$ ، $۱۰^{۱۶} \times ۴/۳۶$ ، $۱۰^{۱۶} \times ۲/۲۹$ ، $۱۰^{۱۶} \times ۱/۸۴$ و $۱۰^{۱۶} \times ۱/۸۲$ ام‌ژول خورشیدی بر هکتار تعیین شد. تحلیل‌های صورت‌گرفته بر اساس ارزیابی ۱۴ شاخص امرژی و اقتصادی نشان داد که توجه به راهکارهای عملی در مدیریت جامع بوم‌نظام تولیدی مانند حفاظت از مواد آلی خاک و جلوگیری از فرسایش خاک می‌تواند در پایداری اکولوژیکی این نظام‌ها تأثیر بسزایی داشته باشد [۲۶].

نتایج تحقیقی دیگر راجع به بررسی وضعیت پایداری زیست‌بوم‌های زراعی کلزا در شهرستان کلاله، امرژی ورودی کل تولید محصول کلزا را برابر $۱۰^۹ \times ۱/۶۴$ ام‌ژول خورشیدی بر هکتار بر سال بیان کرد. طبق نتایج، فرسایش خاک با $۴۷/۳۱$ درصد، بیشترین سهم از امرژی ورودی کل در کاشت و تولید کلزا را به خود اختصاص داد [۱۴].

نتایج پژوهشی با هدف بهبود پایداری در تولید توت‌فرنگی گلخانه‌ای با استفاده از شاخص‌های محیط‌زیستی، اکسرژی و امرژی نشان داد که بیش‌ترین امرژی در تولید محصول توت‌فرنگی گلخانه‌ای مربوط به نیروی کار انسانی با مقدار $۱۰^{۱۶} \times ۱/۷۳$ ام‌ژول خورشیدی بر هکتار و پس از آن بیش‌ترین مقادیر امرژی به ترتیب مربوط به آب آبیاری و گاز شهری با $۱۰^{۱۶} \times ۱/۳۶$ و $۱۰^{۱۵} \times ۵/۳۶$ ام‌ژول خورشیدی بر هکتار می‌باشد [۲۷]. پژوهشی با هدف ارزیابی و پایش پایداری اکولوژیکی نظام‌های زراعی تولید روغن در سیستان با تحلیل امرژی صورت گرفت. مقدار امرژی کل نظام‌های تولید کلزا، گلرنگ و کنجد به ترتیب $۱۰^{۱۶} \times ۷/۲۸$ ، $۱۰^{۱۶} \times ۴/۷۵$ و $۱۰^{۱۶} \times ۳/۵۵$ ام‌ژول خورشیدی بر هکتار تعیین شد. بیش‌ترین سهم از ورودی امرژی کل در هر سه نظام بررسی‌شده مربوط به ورودی‌های تجدیدناپذیر محیطی بود که سهم آن برای نظام‌های تولید کلزا، گلرنگ و کنجد برابر $۴۲/۸۳$ درصد، $۱۱/۸۰$ درصد و $۴۱/۸۴$ درصد به‌دست آمد. مقادیر شاخص‌های امرژی و پایداری نظام تولید گلرنگ نسبت به کلزا و کنجد بیانگر پایداری بیش‌تر این نظام تولید بود. در این مطالعه بیان شد که با ایجاد آگاهی فنی بیش‌تر و مدیریت منابع شامل جلوگیری از تلفات ماده آلی و فرسایش خاک، کاهش ورودی‌های خریداری‌شده تجدیدناپذیر و افزایش اتکای نظام به منابع محیطی تجدیدپذیر و همچنین استفاده بیش‌تر از کود آلی به‌جای کودهای شیمیایی در نظام تولید کنجد می‌توان به ارتقای بهبود پایداری محیط‌زیستی این نظام کمک کرد [۲۸].

با وجود اینکه تحلیل امرژی در حوزه‌های مختلفی از تولیدات کشاورزی به‌کار گرفته شده است اما تاکنون بررسی جامعی از تحلیل امرژی برای گیاهان دارویی انجام نشده است. این پژوهش تلاش می‌کند تا ضمن جبران این خلأ، بینشی کاربردی برای مدیریت پایدار تولید گیاهان دارویی ارائه کند. از این‌رو هدف از مطالعه حاضر، بررسی تولید گل‌گاوزبان با استفاده از رویکرد تحلیل امرژی و برآورد شاخص‌های امرژی به‌منظور تعیین میزان پایداری و ارائه راهکارهایی برای مدیریت پایدار و بهینه منابع در نظام تولیدی این محصول در استان گیلان می‌باشد.

روشن‌شناسی

این پژوهش در استان گیلان انجام شد که با ۹۰ درصد تولید گل‌گاوزبان کشور، قطب تولید این گیاه دارویی محسوب می‌شود. استان گیلان بین عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۳۴ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۲۷ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۴۸ درجه و ۳۴ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۳۶ دقیقه شرقی از نصف‌النهار گرینویچ قرار دارد. گیلان از شمال به دریای خزر، از جنوب به رشته‌کوه‌های البرز، از شرق به استان مازندران و از شمال غربی به استان اردبیل محدود می‌شود. همچنین، در سمت جنوبی با عبور از رشته‌کوه‌های البرز به استان‌های زنجان و قزوین متصل است (شکل ۱). مساحت این استان ۱۴۱۰۰ کیلومتر مربع است که حدود ۰/۹ درصد از مساحت کل کشور را شامل می‌شود. استان گیلان به علت داشتن شرایط آب و هوایی خاص، یکی از استان‌های پیشرو در صنعت گیاهان دارویی می‌باشد. شرایط متنوع توپوگرافی که شامل نواحی ساحلی، دشت‌ها، جلگه‌ها و مناطق کوهستانی است، موجب پوشش گیاهی بسیار غنی استان شده است. بر

اساس منابع گیاه‌شناسی موجود در ایران، در استان گیلان حدود ۱۰۰۰ گونه گیاهی شناسایی شده است که تقریباً نیمی از این گونه‌ها دارای خواص دارویی و کاربردهای مختلف پزشکی، آرایشی و بهداشتی هستند [۲۹].



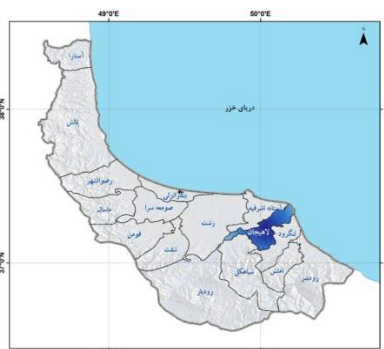
شکل ۱. موقعیت جغرافیایی استان گیلان.

جمع‌آوری داده‌ها

داده‌های موردنیاز برای جمع‌آوری اطلاعات از روش‌های مختلفی مانند تکمیل پرسش‌نامه، گفتگو و مصاحبه با کشاورزان و کارشناسان و همچنین آمار و اطلاعات موجود در سازمان جهاد کشاورزی استان گیلان و شهرستان رودسر استخراج گردید. همچنین برای جمع‌آوری داده‌های مربوط به فراوری گل‌گاوزبان، مجموعه صنایع غذایی فومن (فومنات) واقع در شهر فومن (شکل ۲) و مجموعه صنایع غذایی نادری در شهرستان لاهیجان بررسی شد (شکل ۳).



شکل ۲. موقعیت مجموعه صنایع غذایی فومن واقع در شهرستان فومن.



شکل ۳. موقعیت مجموعه صنایع غذایی نادری واقع در شهرستان لاهیجان.



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 موردنیاز برای محصول گل‌گاوزبان با استفاده از رابطه کوکران (رابطه ۱) برابر ۹۵ نمونه برآورد گردید.

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

که در آن N اندازه جامعه آماری یا تعداد کشاورزان، z ضریب اطمینان قابل قبول که با فرض نرمال بودن توزیع صفت موردنظر از جدول t -استیودنت استخراج می‌شود (برای سطح اطمینان ۹۵ درصد برابر ۱/۹۶ و برای سطح اطمینان ۹۹ درصد برابر ۲/۵۸ است)، p نشان‌دهنده نسبت تخمینی یک ویژگی در جامعه است، q برابر است با $1-p$ ، d اشتباه مجاز که برابر ۰/۰۵ در نظر گرفته شده و n حجم نمونه است [۳۰].

تحلیل امرژی

امرژی به عنوان انرژی خورشیدی موجود (اکسرژی) تعریف می‌شود که قبلاً به‌طور مستقیم و غیرمستقیم برای تولید یک خدمت یا محصول استفاده شده است. این مفهوم می‌تواند سهم سامانه‌های طبیعی را که در روش‌ها و ابزارهای

ارزیابی دیگر در نظر گرفته نمی‌شوند، منعکس کند. در عین حال امرژی می‌تواند انواع مختلفی از انرژی، مواد، کالاها و خدمات را به یک واحد مشترک (امژول خورشیدی) تبدیل کند که این امر می‌تواند یکپارچگی تحلیل عملکرد و پایداری را تضمین کند. در هنگام استفاده از تحلیل امرژی باید سه گام اساسی شامل: ۱- تعیین مرز سیستم و ترسیم نمودار جریان امرژی ۲- تکمیل جدول ارزیابی امرژی و ۳- ایجاد شاخص‌های ارزیابی مشخص شوند [۳۱].

اولین گام در تحلیل امرژی تعیین مرزهای مکانی و زمانی سامانه و ترسیم نمودار جریان امرژی برای طبقه‌بندی نهاده‌های مورد استفاده در سامانه‌های مورد بررسی به منابع تجدیدپذیر، تجدیدناپذیر، محیطی و خریداری شده است. این کار برای مدیریت روابط بین اجزای اصلی و فرایندهای سودآور سامانه الزامی است و همچنین پایه‌های محیط‌زیستی سامانه و ارتباطات آن‌ها را نمایش می‌دهد [۳۲]. نمودار امرژی نظام تولید گل‌گاوزبان در شکل ۴ نمایش داده شده است. دومین گام، ترسیم جدول ارزیابی امرژی است. برای ترسیم این جدول، اطلاعات خام هر نهاده بر حسب ژول، گرم یا دلار در ضرایب تبدیل امرژی^۱ ضرب می‌شود و مقدار امرژی متناظر برای هر نهاده به دست می‌آید [۲۷]. برای نشان دادن میزان انرژی نهاده، از ضرایب هم‌ارز انرژی استفاده شد که در جدول ۱ نمایش داده شده است. در نظام تولید گل‌گاوزبان نهاده‌های محیطی تجدیدپذیر (R) شامل نور خورشید، باد و باران؛ نهاده‌های محیطی تجدیدناپذیر (N₀) شامل فرسایش و تلفات ماده آلی خاک؛ نهاده‌های خریداری شده تجدیدپذیر (F_R) شامل نیروی انسانی، کود حیوانی (گاوی)، فیبر سلولزی، نخ و کارتن بسته‌بندی؛ نهاده‌های خریداری شده تجدیدناپذیر (F_N) شامل سوخت دیزل، ماشین‌ها، کودهای شیمیایی، نایلون و الکتروسیسته در نظر گرفته شد. داده‌های مربوط به میزان فرسایش و ماده آلی خاک و داده‌های اقلیمی، به ترتیب از اداره منابع طبیعی و آبخیزداری و اداره هواشناسی استان گیلان جمع‌آوری گردید (جدول ۲). مقدار امرژی کل از مجموع امرژی تمام نهاده‌های مستقل به دست می‌آید. برای تبدیل انرژی به امرژی از رابطه (۲) استفاده شد [۳۳].

$$Emergy(sej) = Energy(J) \times Solartransformity\left(\frac{sej}{J}\right) \quad (2)$$

محاسبه مقدار انرژی نهاده‌های محیطی تجدیدپذیر (R) و تجدیدناپذیر (N₀) با استفاده از اطلاعات جدول ۲ به صورت زیر صورت گرفت:

انرژی تابش خورشیدی منطقه مورد مطالعه طبق رابطه (۳) به صورت زیر محاسبه گردید:

$$E = A \times I \times Fab \quad (3)$$

که در آن A مساحت زمین (m²)، I متوسط تابش خورشیدی در استان گیلان در طول فصل رشد محصول (W m⁻²)، Fab درصد جذب تابش (ضریب آلبیدو ۰/۳ در نظر گرفته شد) و E انرژی تابشی خورشیدی (J) است. ضریب تبدیل خورشیدی به امرژی برابر با یک امژول خورشیدی بر ژول فرض شد [۱۲]. انرژی باد طبق رابطه (۴) محاسبه گردید:

$$WindEnergy(J) = A \times r \times c \times v^3 \times t \quad (4)$$

¹ Solar Transformity

که در آن A مساحت زمین (m^2)، r چگالی هوا ($1/3 \text{ kg m}^{-3}$)، c ثابت درگ^۱ (10^{-2} g m^{-3})، v سرعت باد ($m s^{-1}$) و t زمان (s) است [۳۴].

ضریب تبدیل خورشیدی انرژی باد به انرژی برابر ۲۴۵۰ امژول خورشیدی بر ژول لحاظ گردید [۳۴]. انرژی پتانسیل آب باران طبق رابطه (۵) محاسبه گردید:

$$RainEnergy(J) = A \times p \times d \times \Delta G \quad (5)$$

که در آن A مساحت زمین (m^2)، p مجموع مقادیر بارش سالانه و آب ورودی از طریق آبیاری ($mm \text{ yr}^{-1}$)، d جرم مخصوص آب (10^6 g m^{-3}) و ΔG انرژی آزاد گیبس ($4/94 \text{ J g}^{-1}$) است [۳۵]. ضریب تبدیل خورشیدی انرژی پتانسیل آب باران به انرژی برابر ۱۸۱۹۹ امژول خورشیدی بر ژول لحاظ گردید [۳۵]. مقدار انرژی خاک تلف شده طبق رابطه (۶) محاسبه گردید:

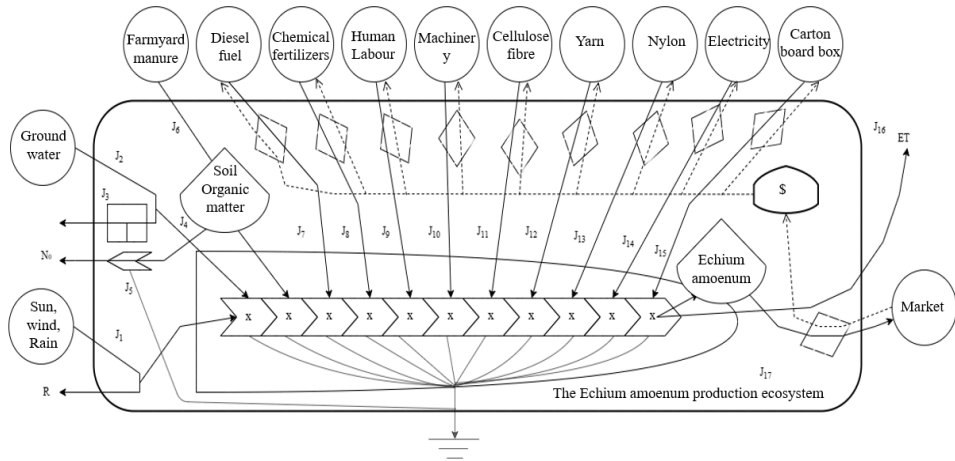
$$Energy\ of\ soil\ erosion(J) = A \times Erod_{soil} \times OM(\%) \times E_{OM} \times 4186 \text{ J kcal}^{-1} \quad (6)$$

که در آن A مساحت زمین (m^2)، $Erod_{soil}$ مقدار خاک فرسایش شده ($g \text{ m}^2 \text{ yr}^{-1}$)، OM درصد ماده آلی خاک و E_{OM} محتوای انرژی مواد آلی خاک ($5/4 \text{ kcal g}^{-1}$) است [۳۵].

ضریب تبدیل خورشیدی تلفات خالص خاک سطحی به انرژی برابر $10^5 \times 1/24$ امژول خورشیدی بر ژول لحاظ گردید [۳۵]. ضرایب تبدیل خورشیدی برای محاسبه انرژی انواع نهاده‌های خریداری شده تجدیدپذیر (F_R) و خریداری شده تجدیدناپذیر (F_N) این مطالعه در جدول ۳ نمایش داده شده است [۳۹-۳۴; ۱۲]. محتوای انرژی محصول خروجی (گل‌گاوزبان) ۱۴/۸۶ مگاژول بر کیلوگرم است [۴۰].

سومین و آخرین گام در تحلیل انرژی استفاده از شاخص‌های ارزیابی است. در تحلیل انرژی از شاخص‌های مبتنی بر ارزیابی‌های محیط‌زیستی و اقتصادی استفاده می‌شود [۲۴]. در مطالعه حاضر 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 محیط‌زیستی (ELR)، نسبت بار محیط‌زیستی اصلاح‌شده (ELR*)، نسبت خود حمایتی انرژی (ESR)، پایداری محیط‌زیستی (ESI)، پایداری محیط‌زیستی اصلاح‌شده (ESI*) و انرژی ایمنی محصولات کشاورزی (EIPS) استفاده شد. روابط و خصوصیات هر یک از شاخص‌های انرژی در جدول ۴ نمایش داده شده است.

¹ Drag coefficient



شکل ۴. نمودار جریان امرژی نظام تولید گل‌گاوزبان در استان گیلان.

جدول ۱. ضرایب هم‌ارز انرژی نهاده‌ها و ستانده در نظام تولید گل‌گاوزبان.

عنوان	واحد	هم‌ارز انرژی (مگاژول بر واحد)	منبع
الف) نهاده‌ها			
نیروی انسانی	ساعت	۱/۹۶	[۴۱]
ماشین‌ها	کیلوگرم	۶۲/۷	[۴۲]
سوخت دیزل	لیتر	۵۶/۳۱	[۴۳]
کودهای شیمیایی	کیلوگرم		
نیتروزن		۶۶/۱۴	[۴۴]
فسفر		۱۲/۴۴	[۴۵]
پتاس		۱۱/۱۵	[۴۴]
کود حیوانی (گاو)	کیلوگرم	۰/۳	[۴۶]
فیبر سلولزی	کیلوگرم	۱۷/۹۱	[۴۷]
نخ	کیلوگرم	۴۴	[۴۷]
نایلون	کیلوگرم	۷۹	[۴۸]
الکتریسته	کیلووات ساعت	۱۱/۹۳	[۴۶]
کارتن بسته‌بندی	کیلوگرم	۱۷/۲۸	[۴۷]
ب) ستانده			
گل‌گاوزبان	کیلوگرم	۱۴/۸۶	[۴۰]

جدول ۲. میانگین سالانه متغیرهای اقلیمی و خاکی در استان گیلان.

متغیر	واحد	میانگین سالانه
تابش خورشیدی	ژول در مترمربع	$5/38 \times 10^9$
بارندگی	میلی‌متر	۱۱۰۰
سرعت باد	متر در ثانیه	۲/۵
میزان فرسایش خاک	کیلوگرم در هکتار	۲۰۰۰
ماده آلی خاک	درصد	۲۵

جدول ۳. ضرایب تبدیل خورشیدی برای نهاده‌های خریداری شده تجدیدپذیر (F_R) و تجدیدناپذیر (F_N).

عنوان	واحد	ضریب تبدیل خورشیدی
نهاده‌های خریداری شده تجدیدپذیر F_R		
نیروی انسانی	ژول	$4/5 \times 10^6$
کود حیوانی	گرم	$1/62 \times 10^8$
فیبر سلولزی	گرم	$4/5 \times 10^{10}$
نخ	گرم	$5/46 \times 10^9$
کارتن بسته‌بندی	گرم	$4/5 \times 10^{12}$
نهاده‌های خریداری شده تجدیدناپذیر F_N		
سوخت دیزل	ژول	$8/48 \times 10^4$
ماشین‌ها	گرم	$1/01 \times 10^{10}$
کود نیتروژن	گرم	$3/09 \times 10^{10}$
کود فسفر	گرم	$2/82 \times 10^{10}$
کود پتاس	گرم	$2/23 \times 10^9$
نایلون	گرم	$4/19 \times 10^9$
الکتریسیته	ژول	$3/6 \times 10^6$

جدول ۴. روابط و خصوصیات شاخص‌های امرژی برای تحلیل پایداری نظام تولید گل‌گاوزبان.

منبع	خصوصیات	رابطه	شاخص
[۴۹]	جریان‌های تجدیدپذیر از منابع رایگان	R	جریان‌های محیطی تجدیدپذیر
[۴۹]	جریان‌های تجدیدناپذیر از منابع رایگان	N_0	جریان‌های محیطی تجدیدناپذیر
[۴۹]	جریان‌های تجدیدپذیر از منابع خریداری شده	F_R	جریان‌های خریداری شده تجدیدپذیر
[۴۹]	جریان‌های تجدیدناپذیر از منابع خریداری شده	F_N	جریان‌های خریداری شده تجدیدناپذیر
[۴۹]	جریان‌های امرژی مستقیم از منابع طبیعی	$NR = R + N_0$	منابع طبیعی
[۴۹]	جریان‌های امرژی مستقیم از ورودی خریداری شده	$PR = F_R + F_N$	منابع خریداری شده
[۲۳]	کل جریان امرژی مورد نیاز برای پشتیبانی از یک نظام تولیدی	$U = R + N_0 + F_R + F_N$	کل امرژی ورودی

منبع	خصوصیات	رابطه	شاخص
[۴۹]	کل امرژی محصول نظام تولیدی	Y	کل امرژی خروجی
[۳۳]	مقدار امرژی برای تولید هر واحد خروجی برحسب ژول است. AE نشان‌دهنده محتوای انرژی محصول است.	$T_r = U/AE$	ضریب تبدیل
[۳۳]	مقدار امرژی برای تولید هر واحد خروجی برحسب گرم است. W جرم محصول است.	$SE = U/W$	امرژی ویژه
[۳۱]	درصد امرژی تجدیدپذیر مورد استفاده نظام تولیدی. توانایی یک فرایند برای استفاده از منابع تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر محیطی در صورت سرمایه‌گذاری منابع اقتصادی خارج از نظام به عنوان ورودی سرمایه.	$\%R = (R + F_R)/U$	تجدیدپذیری امرژی
[۳۱]	شدت سرمایه‌گذاری اقتصادی و میزان تطابق آن با منابع تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر رایگان محیطی است.	$EYR = Y/(F_R + F_N)$	نسبت عملکرد امرژی
[۲۳]	نسبت امرژی تجدیدناپذیر به امرژی تجدیدپذیر استفاده‌شده توسط نظام است. معیار معکوسی از پایداری نظام است.	$EIR = (F_R + F_N)/(R + N_0)$	نسبت سرمایه‌گذاری امرژی
[۵۰]	نسبت امرژی تجدیدناپذیر به امرژی تجدیدپذیر استفاده‌شده توسط نظام است. معیار معکوسی از پایداری نظام است.	$ELR = (N_0 + F_R + F_N)/R$	نسبت بار محیط‌زیستی
[۲۳]	نسبت امرژی تجدیدناپذیر به امرژی تجدیدپذیر استفاده‌شده توسط نظام است. معیار معکوسی از پایداری نظام است.	$ELR^* = (N_0 + F_N)/(R + F_R)$	نسبت بار محیط‌زیستی اصلاح‌شده
[۳۱]	نسبت خود حمایتی امرژی استفاده می‌شود. هرچه مقدار این شاخص بزرگ‌تر باشد، ظرفیت پشتیبانی منابع طبیعی قوی‌تر است.	$ESR = (R + N_0)/Y$	نسبت خود حمایتی امرژی
[۳۱]	نسبت امرژی تجدیدناپذیر به امرژی تجدیدپذیر استفاده‌شده توسط نظام است. معیار معکوسی از پایداری نظام است.	$ESI = (EYR/ELR)$	پایداری محیط‌زیستی
[۲۳]	این شاخص عملکرد نظام را در مقایسه با معیار معکوس پایداری نظام نشان می‌دهد.	$ESI^* = (EYR/ELR^*)$	پایداری محیط‌زیستی اصلاح‌شده
[۴۹]	برای ارزیابی تأثیر استفاده از کود شیمیایی، آفت‌کش و علف‌کش بر ایمنی محصول. C نمایانگر مقدار مصرف مواد شیمیایی است.	$EIPS = 1 - [(C/F_R + F_N)]$	امرژی ایمنی محصولات کشاورزی

تحلیل اهمیت ویژگی

یکی از مراحل کلیدی در هر تحلیل، تفسیر و ارزیابی خروجی‌های تحلیل است [۵۱]. در این مطالعه، تأثیر ورودی‌ها بر پیش‌بینی با استفاده از کتابخانه SHAP در زبان برنامه‌نویسی پایتون بررسی شد. این تحلیل روشی برای نشان دادن اهمیت هر ورودی (مستقل) در نتایج پیش‌بینی (وابسته) است. روش توضیح‌های افزودنی شپلی^۱ مشخص می‌کند که اگر تصمیم‌گیرندگان می‌خواهند نتایج را در آینده تغییر دهند، باید چه ویژگی‌هایی را تغییر دهند. تکنیک SHAP، مبتنی بر نظریه بازی‌ها^۲ (درک ماهیت ارتباطات) میانگین سهم هر پارامتر ورودی را در خروجی نشان می‌دهد. علاوه بر اهمیت مقدار SHAP، این روش می‌تواند نشان دهد که هر پارامتر ورودی چگونه (به صورت منفی یا مثبت) بر متغیر خروجی تأثیر می‌گذارد. مقادیر شپلی اهمیت ویژگی را در میزان سهم هر ویژگی و جهت آن مشخص می‌کند. علامت

¹ Shapley Additive Explanations

² Game Theory

مثبت نشان می‌دهد که فعالیت ویژگی به پیش‌بینی کمک می‌کند. در مقابل، علامت منفی عدم فعالیت ویژگی را نشان می‌دهد [۵۲].

نتایج و بحث

ساختار استفاده از امرژی

مقادیر امرژی جریان‌های محیطی و خریداری‌شده تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر نظام تولید گل‌گاوزبان و سهم هریک از آن‌ها از امرژی کل، در جدول ۵ نشان داده شده‌اند. مقدار امرژی خورشیدی ورودی‌ها، از طریق حاصل ضرب مقدار هر ورودی در ضریب تبدیل خورشیدی متناظر با آن تبدیل شده‌اند. جریان امرژی کل به‌عنوان امرژی کل حمایت‌کننده نظام تولید گل‌گاوزبان برابر $10^{18} \times 1/13$ امژول خورشیدی در هکتار در سال تخمین زده شد.

جریان‌های محیطی تجدیدپذیر (R)

در نظام تولید گل‌گاوزبان نهاده‌های محیطی تجدیدپذیر (R) شامل انرژی خورشیدی، انرژی باران و انرژی باد در نظر گرفته شد. جریان‌های محیطی تجدیدپذیر سهمی حدود $87/2$ درصد از کل جریان امرژی ورودی نظام تولید گل‌گاوزبان را به‌خود اختصاص داده بودند که بیانگر مصرف زیاد جریان‌های محیطی تجدیدپذیر برای تولید گل‌گاوزبان بود. در این مطالعه، بیش‌ترین مقدار ورودی در جریان محیطی تجدیدپذیر، مربوط به انرژی باران بود (جدول ۵). با توجه به این‌که تمامی جریان‌های محیطی تجدیدپذیر از انرژی خورشید منشعب می‌شوند، به‌منظور اجتناب از دوباره‌کاری، مجموع انرژی خورشیدی در فتوسنتز گیاهان و بزرگ‌ترین جزء، جریان‌های محیطی تجدیدپذیر (باران) به‌عنوان معادل کل ورودی‌های محیطی تجدیدپذیر در نظر گرفته می‌شود. علت بیش‌تر بودن مقدار امرژی باران نسبت به سایر جریان‌های محیطی تجدیدپذیر، بخاطر دوچین بودن برداشت این گیاه دارویی و همچنین بارندگی و تعداد روزهای ابری زیاد مناطق کوهستانی کشت این گیاه در استان گیلان است. مقدار کل امرژی جریان‌های تجدیدپذیر در این مطالعه، $9/9 \times 10^{17}$ امژول خورشیدی در هکتار در سال به‌دست آمد. در مطالعه ارزیابی پایداری بوم‌نظام‌های زراعی پاییزه و بهاره تولید سیب‌زمینی عنوان شد که باران بیش‌ترین امرژی را در بین سایر جریان‌های تجدیدپذیر محیطی داشت [۲۴]. در مطالعه ارزیابی تولید توت‌فرنگی گلخانه‌ای مقدار کل جریان‌های محیطی تجدیدپذیر $10^{16} \times 1/6$ امژول خورشیدی در هکتار در سال بود [۲۷]. در مطالعه‌ای دیگر روی تحلیل پایداری انگور یاقوتی در منطقه سیستان، مقدار کل جریان‌های محیطی تجدیدپذیر $10^{19} \times 1/04$ امژول خورشیدی در هکتار در سال گزارش شد [۵۳].

جریان‌های محیطی تجدیدناپذیر (N0)

جریان‌های محیطی تجدیدناپذیر (N0) در این مطالعه فرسایش و تلفات ماده آلی خاک در نظر گرفته شد. سهم جریان‌های محیطی تجدیدناپذیر از کل امرژی نظام تولید گل‌گاوزبان $0/129$ درصد بود (شکل ۵). مقدار امرژی جریان‌های تجدیدناپذیر $10^{15} \times 1/4$ امژول خورشیدی در هکتار در سال برآورد گردید (جدول ۵). در مطالعه ارزیابی امرژی نظام کشت انگور در سیستان مقدار امرژی جریان‌های محیطی تجدیدپذیر $10^{15} \times 7/76$ امژول خورشیدی در هکتار در سال بود که $0/02$ درصد از امرژی کل را شامل می‌شد [۵۴]. سهم امرژی فرسایش خاک از کل امرژی ورودی در کشت ذرت علوفه‌ای در کشور دانمارک، $3/3$ درصد گزارش شد [۳۴]. در مطالعه ارزیابی پایداری بوم‌نظام‌های زراعی کلزا مقدار کل امرژی شدت فرسایش خاک برابر با $10^{15} \times 7/76$ امژول خورشیدی در هکتار در سال بود که سهم آن از کل امرژی $47/31$ درصد بود [۱۴]. بالا بودن میزان تلفات ماده آلی، فرسایش شدید و بیش از حد و آلودگی خاک استان گیلان از مهم‌ترین علت‌های این موضوع می‌باشد. این ضعف به‌دلیل نبود مدیریت و

استفاده بیش‌از حد کودهای شیمیایی است که باعث از بین رفتن مواد آلی خاک و ایجاد شرایط ناپایدار می‌باشد که باعث تشدید فرسایش خاک استان گیلان می‌شود.

جریان‌های خریداری شده (Fr و Fn)

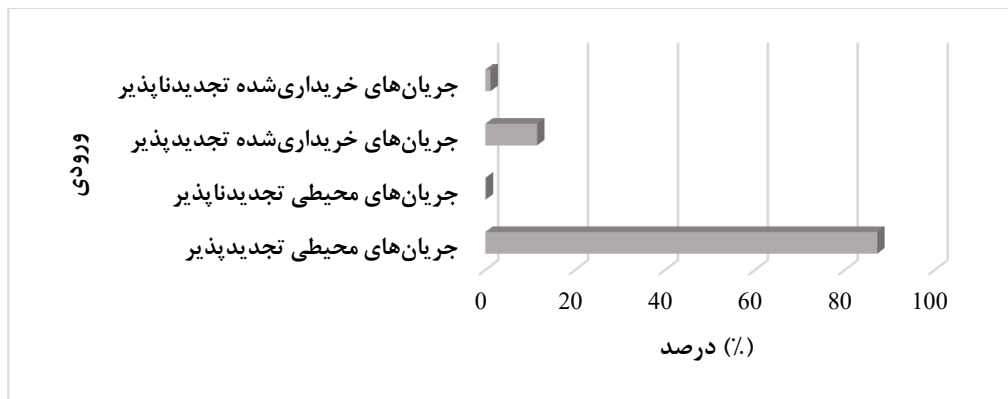
جریان‌های خریداری شده نظام مورد مطالعه شامل نیروی انسانی، کود حیوانی، فیبر سلولزی، نخ، کارتن بسته‌بندی، سوخت دیزل، ماشین‌ها، کودهای شیمیایی، نایلون و الکتروسیته هستند. طبق جدول ۵ مقدار کل ورودی‌های خریداری شده تجدیدپذیر و تجدیدنپذیر در نظام مورد مطالعه برابر به ترتیب برابر با $10^{17} \times 1/31$ و $10^{16} \times 1/3$ امژول خورشیدی در هکتار در سال برآورد شد. سهم هریک از این جریان‌ها از کل امرژی ورودی به ترتیب برابر با $11/52$ و $1/15$ درصد بود (شکل ۵). که از این مقادیر نیروی انسانی با $10/3$ درصد در ورودی‌های تجدیدپذیر و الکتروسیته با $0/515$ درصد در ورودی‌های تجدیدنپذیر، بیش‌ترین سهم را از آن خود کرده بودند. امرژی بالای نیروی انسانی به دلیل کشت نیمه‌مکانیزه این گیاه دارویی و نبود کاربرد مؤثر ماشین‌های کشاورزی در عملیات مختلف تولید این محصول در استان مورد مطالعه بود. رده دوم سهم امرژی کل در جریان‌های خریداری شده تجدیدپذیر و تجدیدنپذیر به ترتیب مربوط به فیبر سلولزی و کود نیتروژن با $10^{16} \times 1/22$ و $10^{15} \times 3/19$ امژول خورشیدی در هکتار در سال بود. کاهش مصرف ورودی‌های ذکر شده تا حد مطلوبی در کاهش سهم ورودی‌های خریداری شده در نظام تولید گل‌گاوزبان مفید واقع می‌شود.

کم‌ترین مقدار امرژی در ورودی‌های تجدیدپذیر و تجدیدنپذیر در این مطالعه به ترتیب برای کارتن بسته‌بندی و کود پتاس بود که بسیار نزدیک به صفر میل می‌کرد (جدول ۵). در مطالعه‌ای با هدف تحلیل امرژی برای یک باغ میوه کشور آمریکا ذکر شد که نیروی انسانی بیش‌ترین مقدار امرژی را شامل می‌شد [۵۵]. در کشور چین مشخص شد که نهاده‌های کود نیتروژن و نیروی انسانی، بیش‌ترین سهم را در کل امرژی تولید گندم داشتند [۲۱]. در مطالعاتی که روی ارزیابی پایداری زراعت گندم و تناوب گندم/لوبین صورت گرفت، سهم کودهای شیمیایی از مقدار کل جریان‌های خریداری شده تجدیدنپذیر حدود ۹۷ درصد به دست آمد [۵۶؛ ۵۷]. بنابراین به صورت کلی کاهش نقش نیروی انسانی و مکانیزه کردن فرایند کشت گل‌گاوزبان و جایگزینی کودهای آلی با کودهای شیمیایی می‌توانند گزینه‌هایی مناسب جهت کاهش امرژی کل نظام مورد مطالعه معرفی شوند.

جدول ۵. نتایج تحلیل امرژی و ساختار مصرف امرژی نظام تولید گل‌گاوزبان در استان گیلان.

متغیر	واحد	جریان یک‌ساله خام	ضریب تجدیدپذیری	ضریب تبدیلی خورشیدی	امرژی	سهم امرژی (%)
جریان‌های محیطی تجدیدپذیر						
نور خورشید	ژول	$3/93 \times 10^{13}$	۱	۱	$3/93 \times 10^{13}$	۰/۰۰۳
باران	ژول	$5/43 \times 10^{13}$	۱	۱۸۱۹۹	$9/89 \times 10^{17}$	۸۷/۲
باد	ژول	$1/92 \times 10^{11}$	۱	۲۴۵۰	$4/7 \times 10^{13}$	
جمع					$9/9 \times 10^{17}$	۸۷/۲
جریان‌های محیطی تجدیدنپذیر						
فرسایش خاک	ژول	$1/13 \times 10^{10}$	۰	$1/24 \times 10^5$	$1/4 \times 10^{15}$	۰/۱۲۹
جمع					$1/4 \times 10^{15}$	۰/۱۲۹
جریان‌های خریداری شده تجدیدپذیر						
نیروی انسانی	ژول	$2/6 \times 10^{10}$	۰/۱	$4/5 \times 10^6$	$1/17 \times 10^{17}$	۱۰/۳
کود حیوانی	گرم	$7/89 \times 10^6$	۰/۸	$1/62 \times 10^8$	$1/28 \times 10^{15}$	۰/۱۱۲

متغیر	واحد	جریان یک ساله خام	ضریب تجدید پذیری	ضریب تبدیل خورشیدی	امرژی	سهم امرژی (%)
فیبر سلولزی	گرم	$2/72 \times 10^5$	۰	$4/5 \times 10^{10}$	$1/22 \times 10^{16}$	۱/۰۸
نخ	گرم	$4/14 \times 10^4$	۰	$5/46 \times 10^9$	$2/27 \times 10^{14}$	۰/۰۰۲
کارتن بستهبندی	گرم	$5/78 \times 10^5$	۰	$4/5 \times 10^2$	$2/6 \times 10^8$	$2/3 \times 10^{-8}$
جمع					$1/31 \times 10^{17}$	۱۱/۵۲
جریان های خریداری شده تجدیدناپذیر						
سوخت دیزل	ژول	$2/26 \times 10^9$	۰	$8/48 \times 10^4$	$1/92 \times 10^{14}$	۰/۰۱۶
ماشین ها	گرم	10^5	۰	$1/01 \times 10^{10}$	$1/01 \times 10^{15}$	۰/۰۸۹
کود نیتروژن	گرم	$1/03 \times 10^5$	۰	$3/09 \times 10^{10}$	$3/19 \times 10^{15}$	۰/۲۸۱
کود فسفر	گرم	$7/74 \times 10^5$	۰	$2/82 \times 10^{10}$	$2/18 \times 10^{15}$	۰/۱۹۲
کود پتاس	گرم	$8/03 \times 10^5$	۰	$2/23 \times 10^9$	$1/79 \times 10^{14}$	۰/۰۱۵
نایلون	گرم	$9/7 \times 10^4$	۰	$4/19 \times 10^9$	$4/06 \times 10^{14}$	۰/۰۳۵
الکتروسیته	ژول	$1/62 \times 10^9$	۰/۰۱	$3/6 \times 10^6$	$5/84 \times 10^{15}$	۰/۵۱۵
جمع					$1/3 \times 10^{16}$	۱/۱۵
جمع کل امرژی					$1/13 \times 10^{18}$	۱۰۰
خروجی (عملکرد محصول)						
عملکرد	گرم	10^6				
انرژی تولید	ژول	$1/49 \times 10^{10}$				



شکل ۵. سهم وردی های محیطی و خریداری شده تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر در نظام تولید گل گاوزبان.

شاخص های امرژی

شاخص های امرژی برای تعیین میزان کارایی استفاده از نهاده ها، پایداری، تجدیدپذیری و فشارهای محیطی وارد به یک نظام تولیدی به کار گرفته می شود. ارزیابی این شاخص ها می تواند به شناسایی و کمی سازی تأثیرات محیطی، اقتصادی

و پایداری آن‌ها کمک کند و تجزیه و تحلیل نتایج آن‌ها، محرکی برای کشاورزان و سیاست‌گذاران به سمت کشاورزی پایدار باشد [۵۸]. مقادیر شاخص‌های مبتنی بر امرژی مطالعه حاضر در جدول ۶ نمایش داده شده است.

ضریب تبدیل (Tr) و امرژی ویژه (SE)

شاخص‌های ضریب تبدیل (Tr) و امرژی ویژه (SE) به‌عنوان مقادیر امرژی واحد نشان‌دهنده معیارهایی از سودمندی یک فرایند تولیدی هستند. هرچه مقادیر این شاخص‌ها کم‌تر باشد بیانگر عملکرد و بهره‌وری بالاتر است زیرا منابع کم‌تری برای تولید محصول مورد نیاز است [۵۹]. مقادیر شاخص‌های ضریب تبدیل و امرژی ویژه برای نظام تولید گل‌گاوزبان به ترتیب $10^7 \times 7/63$ امژول خورشیدی بر ژول $10^{12} \times 1/13$ امژول خورشیدی بر گرم محاسبه شد. در کشور آمریکا مقدار شاخص ضریب تبدیل برای نظام‌های چندکشتی و تولید مکانیزه ذرت به ترتیب $10^5 \times 2/32$ و $10^4 \times 9/3$ امژول خورشیدی بر ژول گزارش شد [۶۰]. همچنین مقدار این شاخص در شمال کشور چین برای گندم برابر $10^5 \times 1/63$ بود [۱۹]. در تولید پسته و خرما $10^9 \times 1/71$ و $10^9 \times 1/47$ [۵۸]، سیب‌زمینی پاییزه و بهاره $10^5 \times 1/5$ و $10^5 \times 2/54$ [۲۴] و در نظام‌های تولید گندم، پیاز و سیر $10^8 \times 6/73$ ، $10^6 \times 4/19$ و $10^6 \times 7/12$ امژول خورشیدی بر ژول بود [۶۱]. شاخص امرژی ویژه برای نظام‌های تولید کلزا $10^{10} \times 9/71$ ، گلرنگ $10^{10} \times 5/53$ و منجد $10^{10} \times 6/46$ امژول خورشیدی بر گرم گزارش شد [۲۸]. همچنین امرژی ویژه برای تولید معیشتی و تجاری کلزا در خرم‌آباد $10^{10} \times 2/25$ و $10^9 \times 7/24$ امژول خورشیدی بر گرم بود [۶۲]. با وجود اینکه شاخص‌های ضریب تبدیل و امرژی ویژه برای گل‌گاوزبان نسبت به برخی محصولات مانند ذرت و گندم، مقادیر بالاتری دارند و نشان‌دهنده بهره‌وری کم‌تر هستند اما با محصولاتی مانند پسته، خرما، کلزا و گلرنگ که دارای مقادیر مشابهی هستند نزدیک‌تر است. این امر نشان‌دهنده پتانسیل نسبی این محصول در نظام‌های تولیدی مشابه و اهمیت توسعه روش‌های پایدار برای بهبود بهره‌وری مانند استفاده از کود آلی برای افزایش عملکرد و کاهش مصرف ورودی‌های تجدیدناپذیر است.

تجدیدپذیری امرژی (%R)

این شاخص نمایانگر سهم منابع تجدیدپذیر در حمایت از یک نظام تولیدی می‌باشد [۳۸]. شاخص تجدیدپذیری امرژی در مطالعه حاضر $0/98$ درصد محاسبه گردید که بخش عمده آن مربوط به باران و نیروی انسانی بود (جدول ۶). با کاهش سهم این ورودی‌ها در نظام تولید گل‌گاوزبان تا حد ممکن، می‌توان تجدیدپذیری و پایداری نظام را افزایش داد. افزایش سهم منابع تجدیدپذیر و کاهش مصرف منابع تجدیدناپذیر، موفقیت نظام تولیدی در رقابت اقتصادی و در نتیجه افزایش پایداری نظام را به ارمغان می‌آورد [۶۳]. این مهم به این علت است که با گذشت زمان منابع تجدیدناپذیر رو به افول می‌روند [۳۳]. شاخص تجدیدپذیری امرژی برای سیب‌زمینی $22/85$ درصد بود [۲۴]. مقدار محاسبه‌شده این شاخص در مطالعه حاضر ($0/98$ درصد) مقدار بالاتری از ذرت با $0/17$ درصد و گندم $0/87$ درصد و مقدار کم‌تری از پسته با $35/4$ درصد و خرما با $43/2$ درصد داشت [۵۶؛ ۵۸]. به‌طور کلی می‌توان اذعان داشت که با کاهش نقش نیروی انسانی و کودهای شیمیایی می‌توان وابستگی نظام را به منابع تجدیدپذیر افزایش داد تا به‌دنبال آن نظام تولیدی بتواند پایداری قابل قبولی داشته باشد.

نسبت عملکرد امرژی (EYR) و نسبت سرمایه‌گذاری امرژی (EIR)

شاخص نسبت عملکرد امرژی (EYR) از تقسیم کل امرژی مصرفی بر ورودی‌های خریداری‌شده به‌دست می‌آید و معیاری برای مشخص کردن توانایی یک فرایند برای جذب منابع محیطی با سرمایه‌گذاری روی منابع اقتصادی می‌باشد. هرچه مقدار این شاخص بالاتر باشد بیانگر بازگشت بیش‌تر امرژی در مقابل امرژی سرمایه‌گذاری‌شده است [۶۴]. نسبت عملکرد امرژی مطالعه حاضر $10/51$ محاسبه شد (جدول ۶). دلیل بالای بودن این شاخص به استفاده کمتر از منابع

خریداری شده و تأمین بخش زیاد ورودی‌ها از منابع محیطی می‌باشد. این شاخص به دلیل اطلاعات ارزشمندی که در اختیار قرار می‌دهد، یکی از شاخص‌های اصلی تحلیل امرژی عنوان شده است. مقدار این شاخص برای نظام تولید خرما و پسته برابر ۱۴/۳۹ و ۱۶/۰۳ گزارش شد که به روشنی نمایانگر وابستگی زیاد این دو نظام به منابع محیطی می‌باشد [۵۸]. مقدار شاخص نسبت عملکرد امرژی در نظام‌های تولید زیره، گندم، سیر، رازیانه، پیاز و سیاه‌دانه شهرستان هیرمند به ترتیب ۲/۳۲، ۳/۸۸، ۲/۰۹، ۲/۲۸، ۳/۱۱ و ۲/۱ گزارش شد [۲۶].

شاخص نسبت سرمایه‌گذاری امرژی (EIR) بیانگر شدت سرمایه‌گذاری، سطح توسعه اقتصادی، میزان دسترسی به منابع محیطی و همچنین میزان وابستگی نظام به منابع طبیعی محیط می‌باشد. نسبت‌های پایین‌تر سرمایه‌گذاری امرژی نشان‌دهنده وابستگی بیشتر نظام به منابع محیطی، کاهش هزینه‌های اقتصادی و افزایش تکیه بر منابع طبیعی محیطی به عنوان خروجی نظام هستند [۳۸]. این شاخص‌ها نشان‌دهنده میزان سرمایه اقتصادی به کاررفته در نظام تولیدی است؛ بنابراین، مقادیر بالاتر این شاخص بیانگر سهم بیشتری از منابع خریداری شده در نظام تولیدی می‌باشد [۵۴]. طبق جدول ۶ مقدار این شاخص در نظام تولیدی گل‌گاوزبان ۰/۱۴ برآورد شد. در تحقیقی در کشور چین برای نظام تولید گندم، نسبت سرمایه‌گذاری امرژی ۱/۳ بود [۶۵]. به طور کلی از طریق کاهش ورودی‌های خریداری شده در نظام مورد مطالعه، مقدار این شاخص کاهش می‌یابد و بهبود کارایی تولید نظام را به ارمغان می‌آورد.

نسبت بار محیط‌زیستی (ELR) و نسبت بار محیط‌زیستی اصلاح شده (ELR*)

شاخص نسبت بار محیط‌زیستی (ELR)، نسبت ورودی‌های خریداری شده و تجدیدناپذیر محیطی بر ورودی‌های تجدیدپذیر محیطی می‌باشد [۳۸]. این شاخص به جریان‌های تجدیدپذیر وابسته است و به عنوان معیاری برای ارزیابی میزان فشار محیط‌زیستی وارده بر یک نظام تولیدی در نظر گرفته می‌شود [۶۶]. چنانچه مقدار این شاخص کوچک‌تر از ۲ باشد بیانگر فشار محیطی کم از نظام تولیدی می‌باشد [۳۳]. مقدار شاخص بار محیط‌زیستی این مطالعه، ۰/۱۴ بود (جدول ۶). مقدار این شاخص برای نظام کشت برنج در کشور چین ۰/۶۲ [۶۷] و برای جو در آمریکا ۲/۹۴ اعلام شد [۶۸].

شاخص نسبت بار محیط‌زیستی اصلاح شده (ELR*)، نسبت امرژی تجدیدناپذیر به تجدیدپذیر مورد استفاده توسط نظام است. در واقع این شاخص معیاری معکوسی از پایداری نظام است و به معنی خدمات محیط‌زیستی مورد استفاده توسط نظام است [۶۹]. مقدار این شاخص ۰/۰۱ بود. در مطالعه ارزیابی پایداری نظام تولیدی برنج در استان مازندران این شاخص مقداری ۱۱/۱۱ داشت که بسیار بیش‌تر از مطالعه حاضر بود [۷۰]. یکی از عوامل مهم در تأثیر محیط‌زیستی بالاتر این محصول در استان مازندران، مصرف کم‌تر از ورودی‌های محیطی تجدیدپذیر و وابستگی زیاد به ورودی‌های محیطی تجدیدناپذیر بود.

نسبت خودحمایتی امرژی (ESR)

شاخص نسبت خودحمایتی امرژی (ESR)، نمایانگر توانایی یک نظام در حفظ پایداری و میزان وابستگی آن به منابع محیطی است. بنابراین، مقادیر بالاتر این شاخص نشان‌دهنده شرایط مطلوب‌تر و پایداری بیشتر نظام است [۷۱]. مقدار این شاخص در این مطالعه، ۰/۶۶ محاسبه شد (جدول ۶) که نشان می‌دهد نظام تولیدی به محیط‌زیست وابستگی زیادی داشته و دارای پتانسیل زیادی برای افزایش سرمایه‌گذاری اقتصادی و بهره‌وری می‌باشد. برای مثال، تجهیز کارخانجات فراوری گل‌گاوزبان استان گیلان با پل‌های خورشیدی برای تولید الکتریسیته مورد نیاز این کارخانجات، می‌تواند سهم منابع محیطی مانند خورشید را افزایش دهد و باعث افزایش شاخص خودحمایتی امرژی و پایداری بیشتر این نظام تولیدی شود. مقدار محاسبه شده این شاخص در مطالعه حاضر از مقدار گزارش شده برای سبزمینی در کشور چین (۰/۰۳) بسیار بالاتر بود [۶۵].

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 فرایندهایی به‌کار می‌روند که هدف آن‌ها بهره‌برداری حداکثری از ورودی‌های محیطی، همراه با کمترین تأثیرات و تنش‌های محیطی است. این شاخص‌ها معیارهایی برای ارزیابی تعادل بین بهره‌وری اقتصادی و حفظ منابع طبیعی به‌شمار می‌آیند [۳۲]. 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. چنان‌چه مقدار این شاخص بزرگ‌تر از ۵ باشد بیان می‌شود که نظام از منظر اقتصادی و محیط‌زیستی پایدار است. طبق جدول ۶ مقدار شاخص‌های ESI و ESI* در این مطالعه، برابر ۷۵/۰۷ و ۱۰۵۱ بود. مقادیر شاخص ESI در نظام‌های مکانیزه، سنتی، حفاظتی و طبیعی موسیر به‌ترتیب برابر ۰/۰۴۸، ۰/۰۴۱، ۰/۰۲۵ و ۰/۳۰۶ بود که بیانگر وضعیت ناپایدار نظام‌های تولیدی گیاه دارویی موسیر می‌باشد [۷۲]. در پژوهش لازار و چیترا^۱ [۷۳] اذعان شده است که آموزش کشاورزان تأثیر بسزایی در پذیرش روش‌های کاهش بارگذاری محیطی و افزایش پایداری و دستیابی به توسعه پایدار دارد.

امرژی ایمنی محصولات کشاورزی (EIPS)

شاخص امرژی ایمنی محصولات کشاورزی (EIPS)، معیاری برای سنجش پایداری نظام‌های تولیدی است که به نسبت استفاده از منابع تجدیدپذیر و تجدیدنپذیر محیطی توجه می‌کند. مقدار بالای EIPS نشان‌دهنده تکیه بیشتر بر منابع تجدیدپذیر و پایداری بالاتر نظام است، در حالی که مقادیر پایین‌تر بیانگر وابستگی به منابع غیرتجدیدپذیر و فشار محیط‌زیستی بیشتر هستند. این شاخص در تحقیقات کشاورزی و صنعتی برای بررسی میزان کارایی و پایداری فرایندها مورد استفاده قرار می‌گیرد [۴۹]. در این مطالعه شاخص امرژی ایمنی محصولات کشاورزی برابر با ۰/۹۵ بود (جدول ۶) که به‌علت استفاده زیاد نظام تولیدی حاضر از منابع تجدیدپذیر محیطی مانند باران، می‌توان ادعا کرد نظام تولیدی گل‌گاوزبان پایداری مطلوبی را از این منظر دارا می‌باشد. در مطالعه‌ای در چین، مقدار میانگین کلی شاخص EIPS برای تولید سبزیجات در استان‌های مختلف چین برابر با ۰/۹۲۱ گزارش شد [۴۹].

جدول ۶. مقادیر شاخص‌های امرژی نظام تولید گل‌گاوزبان در استان گیلان.

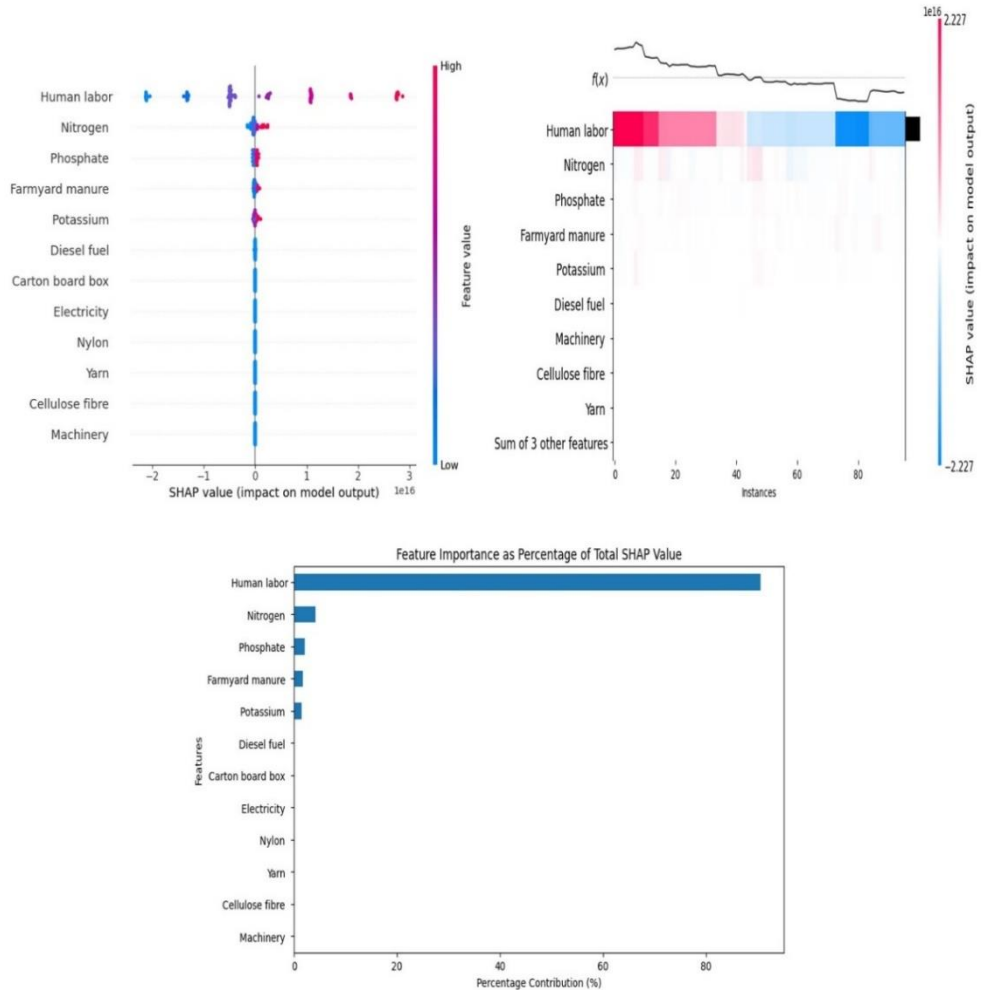
مقدار	واحد	رابطه	شاخص
$9/9 \times 10^{17}$	امژول خورشیدی بر ژول	R	جریان‌های محیطی تجدیدپذیر
$1/4 \times 10^{15}$	امژول خورشیدی بر ژول	N_0	جریان‌های محیطی تجدیدنپذیر
$1/31 \times 10^{17}$	امژول خورشیدی بر ژول	F_R	جریان‌های خریداری‌شده تجدیدپذیر
$1/3 \times 10^{16}$	امژول خورشیدی بر ژول	F_N	جریان‌های خریداری‌شده تجدیدنپذیر
$9/9 \times 10^{17}$	امژول خورشیدی بر ژول	$NR = R + N_0$	منابع طبیعی
$1/44 \times 10^{17}$	امژول خورشیدی بر ژول	$PR = F_R + F_N$	منابع خریداری‌شده
$1/13 \times 10^{18}$	امژول خورشیدی بر ژول	$U = R + N_0 + F_R + F_N$	کل امرژی ورودی
$1/49 \times 10^{18}$	امژول خورشیدی بر ژول	Y	کل امرژی خروجی
$7/63 \times 10^7$	امژول خورشیدی بر ژول	$T_r = U/AE$	ضریب تبدیل
$1/13 \times 10^{12}$	امژول خورشیدی بر گرم	$SE = U/W$	امرژی ویژه

¹ Lazar & Chithra

مقدار	واحد	رابطه	شاخص
۰/۹۸	درصد	$\%R = (R + F_R)/U$	تجدیدپذیری امرژی
۱۰/۵۱	-	$EYR = Y/(F_R + F_N)$	نسبت عملکرد امرژی
۰/۱۴	-	$EIR = (F_R + F_N)/(R + N_0)$	نسبت سرمایه‌گذاری امرژی
۰/۱۴	-	$ELR = (N_0 + F_R + F_N)/R$	نسبت بار محیط‌زیستی
۰/۰۱	-	$ELR^* = (N_0 + F_N)/(R + F_R)$	نسبت بار محیط‌زیستی اصلاح‌شده
۰/۶۶	-	$ESR = (R + N_0)/Y$	نسبت خود حمایتی امرژی
۷۵/۰۷	-	$ESI = (EYR/ELR)$	پایداری محیط‌زیستی
۱۰۵۱	-	$ESI^* = (EYR/ELR^*)$	پایداری محیط‌زیستی اصلاح‌شده
۰/۹۵	-	$EIPS = 1 - [(C/F_R + F_N)]$	امرژی ایمنی محصولات کشاورزی

تحلیل اهمیت ویژگی

همان‌طور که در شکل ۶ نمایش داده شده است تأثیرگذارترین پارامترها در امرژی کل نظام مورد مطالعه، به ترتیب نیروی انسانی، کود نیتروژن، کود فسفر و کود حیوانی می‌باشد. پارامترهایی که کمترین تأثیرگذاری را در خروجی مورد نظر داشتند شامل سوخت دیزل، کارتن بسته‌بندی، الکتروسیته، نایلون، نخ، فیبر سلولزی و ماشین‌ها بودند. در نمودار حرارتی تحلیل حساسیت با استفاده از روش SHAP، رنگ‌ها نشان‌دهنده مقادیر SHAP هستند. در این نمودار، از رنگ آبی برای نهاده‌های تأثیرگذارتر و رنگ قرمز برای نهاده‌هایی با تأثیر کم‌تر بر خروجی امرژی کل استفاده شده است. شدت رنگ بیانگر میزان تأثیر ویژگی‌ها است؛ به طوری که رنگ‌های پررنگ‌تر اهمیت بیشتری را نشان می‌دهند. نمودارهای میله‌ای پایین شکل نیز نشان‌دهنده میانگین نهاده‌های مورد استفاده می‌باشد. با تحلیل این نمودار می‌توان میزان اهمیت و تأثیر هر ویژگی را بر پیش‌بینی مدل ارزیابی کرد و در صورت لزوم، ویژگی‌های کم‌اهمیت را حذف یا ویژگی‌های مهم را شناسایی و بهبود بخشید. در تحقیقی که از روش تحلیل SHAP در پیش‌بینی انرژی هلو صورت گرفت ذکر شد که کود شیمیایی اوره، ویژگی مهم‌تری از پارامترهای ورودی را نسبت به سایر نهاده‌ها در پیش‌بینی انرژی تولید هلو به خود اختصاص داده بود [۷۴].



شکل ۶. مقدار SHAP نشان‌دهنده تأثیرات ویژگی‌های ورودی در هر خروجی امرژی کل نظام تولید گل‌گاوزبان، نمودار حرارتی (راست)، اثر مقدار SHAP بر خروجی (چپ)، مقدار SHAP برای هر نهاده (پایین).

نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر به‌منظور ارزیابی پایداری نظام تولیدی گل‌گاوزبان با رویکرد امرژی در استان گیلان صورت گرفت. تحلیل پایداری نظام تولیدی نیازمند روشی علمی و جامع است که تحلیل امرژی برای این منظور کاربرد دارد. نتایج تحلیل امرژی نشان داد که کل امرژی ورودی نظام موردبررسی در استان گیلان برابر $10^{18} \times 1/13$ ام‌ژول خورشیدی در هکتار در سال بود. بخش زیادی از این مقدار، مربوط به جریان‌های محیطی دخیل در این مطالعه شامل باران و جریان‌های خریداری‌شده شامل نیروی انسانی بود که ناشی از پتانسیل بارش زیاد و روزهای ابری زیاد منطقه مورد مطالعه می‌باشد. باتوجه به نقش پررنگ نیروی انسانی در فرایندهای دخیل در تولید این محصول پیشنهاد شد که کشت این محصول مکانیزه شود تا نقش نیروی انسانی کاسته شود و سودآوری اقتصادی را به دنبال داشته باشد. گزینه پیشنهادی بعدی،

استفاده از کودهای آلی به جای کودهای شیمیایی مورد استفاده در مطالعه می‌باشد تا ضمن حفظ خواص و کیفیت محصول، پایداری نظام ارتقا یابد. استفاده بی‌رویه از کودهای شیمیایی یکی از علت‌های فرسایش زیاد خاک این استان شده است که با مدیریت صحیح نهاده‌ها می‌تواند از این مشکل جلوگیری به عمل آورد. مقدار شاخص‌های مختلف مبتنی بر امرژی در این مطالعه شامل تجدیدپذیری امرژی (R%)، نسبت بار محیط‌زیستی (ELR) و امرژی ایمنی محصولات کشاورزی (EIPS) به ترتیب برابر ۰/۹۸، ۰/۱۴ و ۰/۹۵ برآورد شد.

References

- [1] Taki, M., Ajabshirchi, Y., & Mahmoudi, A. (2012). Prediction of output energy for wheat production using artificial neural networks in Esfahan province of Iran. *Journal of Agricultural Technology*, 8(4), 1229-1242. <https://www.researchgate.net/publication/268202630>
- [2] Amadeh, H. (2013). Analysis of Energy Demand in Agricultural Sector. *Iranian Energy Economics*, 2(8), 21-43. https://jiece.atu.ac.ir/article_697.html?lang=en
- [3] Loghmanpourzarini, R., & Nabipour Afrouzi, H. (2020). Estimation of Energy Balance and Greenhouse Gas Emissions in Dairy Farms (Case study: Qazvin Province). *Quarterly Scientific Journal of National University of Skills*, 17(2), 13-21. <https://doi.org/10.48301/kssa.2020.119204>
- [4] Mohseni, P., Borghae, A. M., & Khanali, M. (2019). Energy Consumption Analysis and Environmental Impact Assessment of Grape Production in Hazavah Region of Arak City. *Journal of Agricultural Machinery*, 9(1), 177-193. <https://doi.org/10.22067/jam.v9i1.67645>
- [5] Iarjani, M., & Razi Kordmahaleh, L. (2017). Explaining the green job identification and prioritization of renewable energy domain: wind energy. *Quarterly Scientific Journal of National University of Skills*, 14(2), 15-32. https://karafan.nus.ac.ir/article_100503.html
- [6] Asadi-Samani, M., Bahmani, M., & Rafieian-Kopaei, M. (2014). The chemical composition, botanical characteristic and biological activities of *Borago officinalis*: a review. *Asian Pacific Journal of Tropical Medicine*, 7(Suppl 1), S22-S28. [https://doi.org/10.1016/S1995-7645\(14\)60199-1](https://doi.org/10.1016/S1995-7645(14)60199-1)
- [7] Heidari, M. R., Azad, E. M., & Mehrabani, M. (2006). Evaluation of the analgesic effect of *Echium amoenum* Fisch & C.A. Mey. extract in mice: Possible mechanism involved. *Journal of Ethnopharmacology*, 103(3), 345-349. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2005.08.027>
- [8] Daneshfar, A. (2009). Investigation of genetic diversity and Reproductive changes (growth, flowering and yield of active ingredients) in various populations Iranian *Amoenum Echium Fisch & May*. *Tarbiat Modares University: Tehran, Iran*. (In Persian)
- [9] Hajar, H., & Nazarian, H. (2015). *Entrepreneurship Package for Herbal Tea Bag Production*. *Asrare Elm Publications, Tehran*. (In Persian)
- [10] Soleymani, G., Abdi, R., Ghanbari, M., & Loghmanpourzarini, R. (2023). Evaluation and Optimization of Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions of Sugar Beet Production with the Method of Data Envelopment Analysis. *Quarterly Scientific Journal of National University of Skills*, 20(1), 131-150. <https://doi.org/10.48301/kssa.2023.388258.2471>
- [11] Fatemi, M., Monfared, N., Rezaei-Moghaddam, K., & Badzaban, F. (2022). Factors Affecting the Extension and Development of Organic Farming Activities. *Quarterly Scientific Journal of National University of Skills*, 18(4), 13-32. <https://doi.org/10.48301/kssa.2021.129161>

- [12] Odum, H. T. (2007). *Environment, Power, and Society for the Twenty-First Century: The Hierarchy of Energy*. Columbia University Press. https://books.google.com/books?id=I_E_wCY6RoxoC
- [13] Jamali, M., Soufizadeh, S., Yeganeh, B., & Emam, Y. (2021). A comparative study of irrigation techniques for energy flow and greenhouse gas (GHG) emissions in wheat agroecosystems under contrasting environments in south of Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 139, 110704. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110704>
- [14] 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. <https://doi.org/10.22067/agry.2022.72035.1063>
- [15] Campbell, D. E., & Ohrt, A. (2009). *Environmental accounting using emergy: evaluation of Minnesota*. US Environmental Protection Agency. https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?dirEntryId=202683&Lab=NHEERL
- [16] Copeland, J. P., McKelvey, K. S., Aubry, K. B., Landa, A., Persson, J., Inman, R. M., Krebs, J., Lofroth, E., Golden, H., Squires, J. R., Magoun, A., Schwartz, M. K., Wilmot, J., Copeland, C. L., Yates, R. E., Kojola, I., & May, R. (2010). The bioclimatic envelope of the wolverine (*Gulo gulo*): do climatic constraints limit its geographic distribution? *Canadian Journal of Zoology*, 88(3), 233-246. <https://doi.org/10.1139/z09-136>
- [17] Lan, S., Qin, P., & Lu, H. (2002). Emergy assessment of eco-ecological systems. *Chemical Industry Press, Beijing*.
- [18] Ulgiati, S., Odum, H. T., & Bastianoni, S. (1994). Emergy use, environmental loading and sustainability an emergy analysis of Italy. *Ecological Modelling*, 73(3-4), 215-268. [https://doi.org/10.1016/0304-3800\(94\)90064-7](https://doi.org/10.1016/0304-3800(94)90064-7)
- [19] 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. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2014.03.005>
- [20] 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. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2008.11.022>
- [21] 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>
- [22] Lu, H-F., Tan, Y-W., Zhang, W-S., Qiao, Y-C., Campbell, D. E., Zhou, L., & Ren, H. (2017). Integrated emergy and economic evaluation of lotus-root production systems on reclaimed wetlands surrounding the Pearl River Estuary, China. *Journal of Cleaner Production*, 158, 367-379. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.016>
- [23] Asgharipour, M. R., Shahgholi, H., Campbell, D. E., Khamari, I., & Ghadiri, A. (2018). Comparison of the sustainability of bean production systems based on emergy and economic analyses. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191(1), 2. <https://doi.org/10.1007/s10661-018-7123-3>
- [24] Shahhoseini, H., 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. <https://doi.org/10.22067/jag.v12i1.81189>
- [25] Fallahinejad, S., Armin, M., & Asgharipour, M. R. (2021). A survey on the ecological sustainability of introducing new crops in the cropping pattern using emergy approach.

- Current Research in Environmental Sustainability*, 3, 100083. <https://doi.org/10.1016/j.crsust.2021.100083>
- [26] Mirshekari, S., Dahmradeh, M., Asgharipour, M. R., Ghanbari, A., & Seyedabadi, E. (2021). Sustainability assessment of six crop production systems based on energy and economic analysis in Hirmand city. *Agroecology*, 13(3), 539–561. <https://doi.org/10.22067/agry.2021.69477.1032>
- [27] Hardani, S., Khanali, M., Akram, A., & Mobli, H. (2023). Evaluation of environmental pollutants in greenhouse strawberry production by hydroponic method using damage, exergy and energy indicators in order to achieve production sustainability. *Journal of Agricultural Mechanization*, 8(3), 27-43. <https://doi.org/10.22034/jam.2023.57201.1241>
- [28] Pordel, N., Asgharipour, M. R., & Seyedabadi, E. (2025). Monitoring and Accounting of Ecological Sustainability of Sistan's Oil Crop using Energy and Economic Indicators. *Journal of Agroecology*, 16(1), 159-179. <https://doi.org/10.22067/agry.2022.79219.1126>
- [29] Shahinroksar, P., Amamnzadeh, B., Mostafavy, M., & Abbasi, N. (2018). Supplementary Irrigation Management of Echium Amoenum Fisch in Low Land of Gilan Plain. *Water Management in Agriculture*, 4(2), 63-70. https://wmaj.iaid.ir/article_87624.html?lang=en
- [30] Cochran, J. (2003). *Patterns of sustainable agriculture adoption-non-adoption in Panamá* [Master, McGill University]. Montreal, Canada. <https://scispace.com/pdf/patterns-of-sustainable-agriculture-adoption-non-adoption-in-pml7qvp122.pdf>
- [31] Wang, J., Hou, D., Liu, Z., Tao, J., Yan, B., Liu, Z., Yang, T., Su, H., Tahir, M. H., & Chen, G. (2022). Energy analysis of agricultural waste biomass for energy-oriented utilization in China: Current situation and perspectives. *Science of The Total Environment*, 849(3), 157798. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157798>
- [32] Odum, H. T. (1996). *Environmental Accounting: Energy and Environmental Decision Making*. Wiley. <https://books.google.com/books?id=j1PHFoVb7rYC>
- [33] Brown, M. T., & Ulgiati, S. (2004). Energy quality, energy, and transformity: H.T. Odum's contributions to quantifying and understanding systems. *Ecological Modelling*, 178(1-2), 201-213. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2004.03.002>
- [34] Ghaley, B. B., Kehli, N., & Mentler, A. (2018). Energy 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>
- [35] Odum, H. T., & Odum, E. C. (1983). *Energy analysis overview of nations*. Internations Institute for Applied Systems Analysis. <https://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/2230/1/WP-83-082.pdf>
- [36] Brandt-Williams, S. L. (2002). *Handbook of energy evaluation: a compendium of data for energy computation issued in a series of Folios*. Center for Environmental Policy Environmental Engineering Science. <https://www.researchgate.net/profile/Sherry-Brandt-Williams/publication/237476657>
- [37] Campbell, D. E., Brandt-Williams, S. L., & Meisch, M. E. (2005). *Environmental accounting using energy: Evaluation of the state of West Virginia*. US Environmental Protection Agency. https://www.researchgate.net/publication/237034118_Environmental_Accounting_Using_Energy_Evaluation_of_the_State_of_West_Virginia
- [38] Odum, H. T. (2000). *Handbook of energy evaluation: A Compendium of Data for Energy Computation Issued in a Series of Folios*. US Environmental Protection Agency. <https://archive.epa.gov/emap/aed/html/collaboration/web/pdf/folio2.pdf>

- [39] La Rosa, A. D., Siracusa, G., & Cavallaro, R. (2008). Emery evaluation of Sicilian red orange production. A comparison between organic and conventional farming. *Journal of Cleaner Production*, 16(17), 1907-1914. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2008.01.003>
- [40] Adel Pilerood, S., & Prakash, J. (2014). Evaluation of nutritional composition and antioxidant activity of Borage (*Echium amoenum*) and Valerian (*Valerian officinalis*). *Journal of Food Science and Technology*, 51(5), 845-854. <https://doi.org/10.1007/s13197-011-0573-z>
- [41] Nabavi-Pelesaraei, A., Rafiee, S., Mohtasebi, S. S., Hosseinzadeh-Bandbafha, H., & Chau, K.-w. (2017). Energy consumption enhancement and environmental life cycle assessment in paddy production using optimization techniques. *Journal of Cleaner Production*, 162, 571-586. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.071>
- [42] Khanali, M., Kokei, D., Aghbashlo, M., Nasab, F. K., Hosseinzadeh-Bandbafha, H., & Tabatabaei, M. (2020). Energy flow modeling and life cycle assessment of apple juice production: Recommendations for renewable energies implementation and climate change mitigation. *Journal of Cleaner Production*, 246, 118997. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118997>
- [43] Bakhtiari, A. A., Hematian, A., & Sharifi, A. (2015). Energy analyses and greenhouse gas emissions assessment for saffron production cycle. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(20), 16184-16201. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4843-6>
- [44] Khanali, M., Akram, A., Behzadi, J., Mostashari-Rad, F., Saber, Z., Chau, K.-W., & Nabavi-Pelesaraei, A. (2021). Multi-objective optimization of energy use and environmental emissions for walnut production using imperialist competitive algorithm. *Applied Energy*, 284, 116342. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116342>
- [45] Mostashari-Rad, F., Nabavi-Pelesaraei, A., Soheilifard, F., Hosseini-Fashami, F., & Chau, K.-w. (2019). Energy optimization and greenhouse gas emissions mitigation for agricultural and horticultural systems in Northern Iran. *Energy*, 186, 115845. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.07.175>
- [46] Ozkan, B., Akcaoz, H., & Fert, C. (2004). Energy input-output analysis in Turkish agriculture. *Renewable Energy*, 29(1), 39-51. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(03\)0135-6](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(03)0135-6)
- [47] Kitani, O., Jungbluth, T., Peart, R. M., & Ramdani, A. (1999). CIGR handbook of agricultural engineering. In O. Kitani (Ed.), *Energy and biomass engineering* (pp. 139-164). American Society of Agricultural Engineers.
- [48] Martin-Gorrioz, B., Soto-García, M., & Martínez-Alvarez, V. (2014). Energy and greenhouse-gas emissions in irrigated agriculture of SE (southeast) Spain. Effects of alternative water supply scenarios. *Energy*, 77, 478-488. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.09.031>
- [49] Guo, Y., Wang, H., Zhang, W., Chen, B., & Song, D. (2023). Sustainability evaluation of protected vegetables production in China based on emery analysis. *Journal of Cleaner Production*, 388, 135928. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.135928>
- [50] Lu, H., Yuan, Y., Campbell, D. E., Qin, P., & Cui, L. (2014). Integrated water quality, emery and economic evaluation of three bioremediation treatment systems for eutrophic water. *Ecological Engineering*, 69, 244-254. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.04.024>
- [51] Wang, Y., Shahbeik, H., Moradi, A., Rafiee, S., Shafizadeh, A., Khoshnevisan, B., Ghafarian Nia, S. A., Nadian, M. H., Li, M., Pan, J., Tabatabaei, M., & Aghbashlo, M. (2024). Predictive modeling for hydrogen storage in functionalized carbonaceous nanomaterials

- using machine learning. *Journal of Energy Storage*, 97, 112914. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.112914>
- [52] Ghafarian Nia, S. A., Shahbeik, H., Shafizadeh, A., Rafiee, S., Hosseinzadeh-Bandbafha, H., Kiehbaddroudinezhad, M., Sheikh Ahmad Tajuddin, S. A. F., Tabatabaei, M., & Aghbashlo, M. (2025). Machine learning-driven optimization for sustainable CO₂-to-methanol conversion through catalytic hydrogenation. *Energy Conversion and Management*, 325, 119373. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.119373>
- [53] Fartout Enayat, F., Ghanbari, S. A., Asgharipour, M. R., & Seyedabadi, E. (2023). Emergy ecological footprint analysis of Yaghooti grape production in the Sistan region of Iran. *Ecological Modelling*, 481, 110332. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2023.110332>
- [54] Kohkan, S., A., Ghanbari, A., Asgharipour, M. R., & Fakheri, B. A. (2018). Emergy evaluation of Yaghtu grape of Sistan. *Journal of Arid Biome*, 7(2), 73-84. <https://www.magiran.com/paper/1843796>
- [55] 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. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.08.009>
- [56] 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>
- [57] Lefroy, E., & Rydberg, T. (2003). Emergy evaluation of three cropping systems in southwestern Australia. *Ecological Modelling*, 161(3), 195-211. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(02\)00341-1](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(02)00341-1)
- [58] 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>
- [59] Yang, Q., Chen, G. Q., Liao, S., Zhao, Y. H., Peng, H. W., & Chen, H. P. (2013). Environmental sustainability of wind power: An emergy analysis of a Chinese wind farm. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 25, 229-239. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.04.013>
- [60] 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(1-4), 128-140. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.12.016>
- [61] 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. https://sustainagriculture.tabrizu.ac.ir/article_10939.html?lang=en
- [62] 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>
- [63] 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>

- [64] Chen, G. Q., Jiang, M. M., Chen, B., Yang, Z. F., & Lin, C. (2006). Energy analysis of Chinese agriculture. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 115(1-4), 161-173. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.01.005>
- [65] Zhai, X., Huang, D., Tang, S., Li, S., Guo, J., Yang, Y., Liu, H., Li, J., & Wang, K. (2017). The energy of metabolism in different ecosystems under the same environmental conditions in the agro-pastoral ecotone of northern China. *Ecological Indicators*, 74, 198-204. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.11.028>
- [66] Ulgiati, S., & Brown, M. T. (1998). Monitoring patterns of sustainability in natural and man-made ecosystems. *Ecological Modelling*, 108(1-3), 23-36. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(98\)00016-7](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(98)00016-7)
- [67] Lu, H., Bai, Y., Ren, H., & Campbell, D. E. (2010). Integrated energy, 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. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.07.025>
- [68] Haden, A. C. (2002). Energy analysis of food production at S&S homestead farm. *S&S Center for Sustainable Agriculture*, 1-33. <https://sshomestead.org/wp-content/uploads/emergy%20analysis.pdf>
- [69] Campbell, D. E., & Garmestani, A. S. (2012). An energy systems view of sustainability: Energy evaluation of the San Luis Basin, Colorado. *Journal of Environmental Management*, 95(1), 72-97. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.07.028>
- [70] Amini, S., Rohani, A., Aghkhani, M. H., Abbaspour-Fard, M. H., & Asgharipour, M. R. (2020). Sustainability assessment of rice production systems in Mazandaran Province, Iran with emergy analysis and fuzzy logic. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 40(3), 100744. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100744>
- [71] Dangelico, R. M., Garavelli, A. C., & Petruzzelli, A. M. (2010). A system dynamics model to analyze technology districts' evolution in a knowledge-based perspective. *Technovation*, 30(2), 142-153. <https://doi.org/10.1016/j.technovation.2009.09.006>
- [72] Keshavarz-Ghorabae, M., Amiri, M., Zavadskas, E. K., Turskis, Z., & Antucheviciene, J. (2021). Determination of objective weights using a new method based on the removal effects of criteria (MERECE). *Symmetry*, 13(4), 525. <https://doi.org/10.3390/sym13040525>
- [73] 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. <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01691-8>
- [74] Davodalmosavi, S. O., Rafiee, S., & Jafari, A. (2023). Modeling of peach production energy using machine learning in Nazarabad township, Alborz province. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, 54(1), 53-71. <https://doi.org/10.22059/ijbse.2023.360300.665512>