دانش کشاورزی و تولید پایدار

Journal of Agricultural Science and Sustainable Production
Volume 36, Issue 2, 2026, Pages 275-289

Journal URL: https://sustainagriculture.tabrizu.ac.ir
Online ISSN: 2476-4329

A Comparative Study of the Ecological Sustainability of Agricultural Production in Zahak and Hirmand Counties

Sanaz Tanakian[1], Mohammad Reza Asgaripour[2]*, Seyed Ahmad Ghanbari[2], Mahmoud Ramroodi[2], Zahra Marzban[3]

Received: October 20, 2024	Accepted: January 23, 2025

1-PhD., Dept. of Agronomy, College of Agriculture, University of Zabol, Zabol, Iran.
2- Prof., Dept. of Agronomy, College of Agriculture, University of Zabol, Zabol, Iran.
3- PhD graduate, Dept of Agronomy, Faculty of Agriculture, University of Zabol, Zabol, Iran.

Corresponding Author E-mail: m_asgharipour@uoz.ac.ir

Abstract

Background & Objectives: Sistan, as one of the arid regions highly vulnerable to climate change, requires sustainable management of water and soil resources. Therefore, assessing the sustainability of agricultural systems in this region is crucial. The main objective of this research is to evaluate the efficiency and ecological sustainability of a wide range of crops in Zahak and Hirmand counties as examples of arid regions in the country.

Materials and Methods: For this research, data related to the inputs and outputs of agricultural production systems were collected through interviews with farmers and meteorological data. Subsequently, using emergy analysis, all system flows were converted to emergy units. Finally, by calculating emergy footprint indicators, the ecological sustainability of agricultural systems was evaluated.

Results: The results showed that wheat and alfalfa systems, respectively, with 7.28E+08 and 2.87E+10 global hectares per year, had the highest ecological capacity in Zahak and Hirmand counties. However, the analysis of carrying capacity and emergy footprint indicated that Zahak is in a surplus ecological state, while Hirmand is in a deficit state. These findings indicate that Zahak has a greater capacity to support its current agricultural activities, while Hirmand is under more pressure from natural resources and is at risk of environmental degradation.

Conclusion: This research demonstrated that emergy analysis is an effective tool for assessing the sustainability of agricultural systems in arid and semi-arid regions. The results of this study can serve as a baseline for future studies and monitoring changes in the sustainability of agricultural systems.

Keywords: Agricultural Systems, Agricultural Inputs, Ecological Sustainability, Ecological Capacity, Sustainability Indicators

This is an open-access article under the CC BY NC license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/)
Copyright@ 2026 Mohammad Reza Asgaripour E-mail: m_asgharipour@uoz.ac.ir

https://doi.org/10.22034/saps.2025.64039.3298

نشریه علمی پژوهشی دانش کشاورزی و تولید پایدار
جلد ۳۶، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۵، صفحات ۲۸۹-۲۷۵

دانش کشاورزی و تولید پایدار

بررسی تطبیقی پایداری اکولوژیکی تولیدات کشاورزی در شهرستان‌های زهک و هیرمند

ساناز تناکیان[۱]، محمدرضا اصغری پور*[۲]، سید احمد قنبری[۳]، محمود رمرودی[۲]، زهرا مرزبان[۳]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۲۹	تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۰۴

۱-دانشجوی دکتری گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زابل
۲-استاد گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زابل
۳- فارغ التحصیل دکتری گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زابل

چکیده

مقدمه و اهداف: سیستان به عنوان یکی از مناطق خشک و حساس به تغییرات اقلیمی، نیازمند مدیریت پایدار منابع آب و خاک است. لذا ارزیابی پایداری سیستم‌های کشاورزی در این منطقه ضروری می‌باشد. هدف این پژوهش، ارزیابی کارایی و پایداری اکولوژیکی طیف وسیعی از محصولات زراعی در زهک و هیرمند به عنوان نمونه‌ای از مناطق خشک کشور می‌باشد.

مواد و روش‌ها: برای این پژوهش داده‌های مربوط به ورودی‌ها و خروجی‌های سیستم‌های تولید کشاورزی را از طریق مصاحبه با کشاورزان و داده‌های هواشناسی گردآوری نمود. سپس، با به‌کارگیری تحلیل امرژی، کلیه جریان‌ها به واحد امرژی تبدیل شدند. در نهایت، از طریق محاسبه شاخص‌های ردپای امرژی، پایداری اکولوژیکی نظام‌های کشاورزی مورد ارزیابی قرار گرفت.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که نظام‌های گندم و یونجه به ترتیب با $۷/۲۸\times۱۰^{۸}$ و $۴/۸۷\times۱۰^{۷}$ هکتار جهانی در سال، بیشترین ظرفیت اکولوژیکی را در زهک و هیرمند دارا می‌باشند. با این حال، تحلیل ظرفیت زیستی و ردپای امرژی حاکی از آن است که زهک از نظر اکولوژیکی در وضعیت مازاد و هیرمند در وضعیت کسری قرار دارد. این یافته‌ها نشان می‌دهند که زهک توانایی بیشتری در حمایت از فعالیت‌های کشاورزی فعلی خود دارد، در حالی که هیرمند تحت فشار بیشتری از نظر منابع طبیعی بوده و در معرض خطر تخریب محیط زیست قرار دارد.

نتیجه‌گیری: این پژوهش نشان داد که تحلیل امرژی ابزاری کارآمد برای ارزیابی پایداری نظام‌های کشاورزی در مناطق خشک و نیمه خشک است. نتایج حاصل از این مطالعه می‌تواند به عنوان خط پایه برای مطالعات آتی و پایش تغییرات در پایداری نظام‌های کشاورزی مورد استفاده قرار گیرد.

واژه های کلیدی: پایداری اکولوژیکی، نظام‌های کشاورزی، ظرفیت اکولوژیکی، نهاده‌های کشاورزی، شاخص‌های پایداری

مقدمه

کشاورزی به عنوان یکی از ارکان اصلی تأمین غذا، تولید درآمد و اشتغالزایی در بسیاری از جوامع، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند سیستان، نقشی استراتژیک ایفا می‌کند. با توجه به چالش‌هایی همچون بهره‌برداری ناپایدار از منابع طبیعی، رشد جمعیت و تغییرات اقلیمی، نیاز به مدیریت پایدار و ارزیابی دقیق پایداری نظام‌های کشاورزی، امری اجتناب‌ناپذیر است (شاه حسینی و کاظمی ۲۰۲۲، عنایت و اصغری پور ۲۰۲۴). پایداری کشاورزی نه تنها به معنای حفاظت از محیط‌زیست و منابع طبیعی است، بلکه تأمین معیشت پایدار و ارتقاء کیفیت زندگی کشاورزان و جوامع روستایی را نیز شامل می‌شود (امیری و همکاران ۲۰۲۲). بنابراین، ارزیابی پایداری اکولوژیکی نظام‌های کشاورزی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و در این مطالعه به‌عنوان محور تحقیقاتی در نظر گرفته شده است. در عصر معاصر، جستجوی یک نظام کشاورزی پایدار به عنوان یک هدف مهم سیاستی در بخش کشاورزی کشورهای مختلف مطرح شده است (گفسی و همکاران ۲۰۰۶). پایداری به طور گسترده به عنوان یک عامل حیاتی در حفظ جنبه‌های اجتماعی، فرهنگی و اقتصادی نظام‌های تولید کشاورزی شناخته می‌شود. ارزیابی پایداری، هم از نظر ایجاد و هم از نظر حفظ آن، نیازمند استفاده از روش‌های دقیق و جامع است (انجل و آسودو ۲۰۱۸). طبق گفته پرز (۲۰۰۷)، استفاده از روش‌های جامع برای ارزیابی پایداری که جنبه‌های اکولوژیکی، اقتصادی و اجتماعی را در نظر می‌گیرند، می‌تواند بینش‌های ارزشمندی در مورد وضعیت فعلی مداخلات بوم‌نظام ارائه دهد.

روش‌های مختلف کمی و کیفی برای ارزیابی پایداری و ظرفیت تحمل محیط زیست وجود دارد. این روش‌ها شامل تحلیل امرژی (اصغری پور و همکاران ۲۰۲۰)، تحلیل ردپای اکولوژیکی (وکرناگل و همکاران ۲۰۰۲) و تحلیل ردپای اِمرژی (عنایت و اصغری پور ۲۰۲۳، شیردلی و همکاران ۲۰۲۵) هستند. تکنیک ارزیابی ردپای اکولوژیکی یک ابزار محاسباتی است که برای درک ارتباط بین فعالیت‌های انسانی و فشار وارد شده بر زمین و منابع آن استفاده می‌شود. ردپای اکولوژیکی یک معیاری است که میزان فضایی مورد نیاز برای حفظ یک فعالیت خاص را با در نظر گرفتن مساحت متوسط مورد نیاز برای تأمین منابع مصرف شده و جذب زباله‌های حاصل، اندازه‌گیری می‌کند (فنگ و همکاران ۲۰۱۴).

ردپای اکولوژیکی توانایی متمایز خود را در بهبود ارتباطات و تسهیل مقایسه‌های مستقیم بین مصرف انسانی و ظرفیت تولید طبیعی از طریق ارائه و تحلیل نتایج در واحدهای فضایی نشان داده است (گیلجم و همکاران ۲۰۰۷). اگرچه ردپای اکولوژیکی به عنوان یک وسیله ارتباطی، آموزشی و برنامه‌ریزی پایداری منابع محبوبیت یافته است، اما توانایی ارزیابی و مقایسه انواع مختلف جریان‌ها و فرایندها بر اساس سلسله مراتب کیفیت آن‌ها را ندارد. برای رفع این محدودیت و سایر کمبودهای مشابه، ژائو و همکاران (۲۰۰۵) روشی جدید به نام ردپای اِمرژی معرفی کردند که ردپای اکولوژیکی و تکنیک اِمرژی را ادغام می‌کند. روش ردپای اِمرژی جریان‌های کل مؤثر درگیر در تولید یک محصول را در نظر می‌گیرد. این روش در تلاش‌های تحقیقاتی متنوعی، از جمله بررسی نظام‌های تولید انگور یاقوتی در سیستان (عنایت و همکاران ۲۰۲۳)، پرورش ماهی در چین (ژائو و همکاران ۲۰۱۳)، مزارع بادی در چین (ژانگ و همکاران ۲۰۲۰)، امنیت اکولوژیکی در آسیای مرکزی (لی و همکاران ۲۰۱۹) و کلان‌شهر شانگهای در چین (پنگ و همکاران ۲۰۱۸) استفاده شده است.

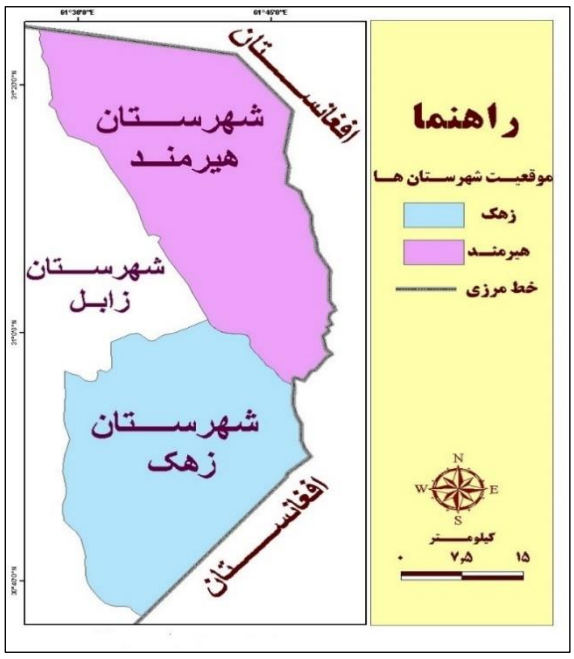
شهرستان‌های زهک و هیرمند به عنوان دو قطب اصلی تولید محصولات کشاورزی در منطقه سیستان، دارای شرایط اکولوژیکی و کشاورزی متفاوتی هستند. با توجه به اهمیت موضوع و کمبود مطالعات جامع در زمینه مقایسه پایداری اکولوژیکی نظام‌های کشاورزی در شهرستان‌های زهک و هیرمند، هدف از این پژوهش، ارزیابی و مقایسه ردپای انرژی نظام‌های کشاورزی این دو شهرستان می‌باشد. با انجام این پژوهش، می‌توان به درک بهتری از وضعیت پایداری اکولوژیکی نظام‌های کشاورزی در دو شهرستان دست یافت و راهکارهای مناسب برای بهبود پایداری ارائه داد.

مواد و روش‌ها

توصیف منطقه و نظام‌های هدف مطالعه

شهرستان‌های هیرمند و زهک از شهرستان‌های واقع در شمال استان سیستان و بلوچستان می‌باشند که به ترتیب با وسعت ۱۱۰۰ و ۹۴۵ کیلومتر مربع در محدوده منطقه سیستان واقع شده‌اند. این شهرستان‌ها، در ′۳۶ °۳۰ الی ′۲۳ °۳۱ عرض شمالی و ′۲۸ °۶۱ الی ′۵۰ °۶۱ طول شرقی واقع گردیده‌اند. محدوده مورد مطالعه، از شرق، شمال و جنوب با کشور افغانستان و از غرب با شهرستان زابل در ارتباط می‌باشد (شکل ۱). این دو شهرستان دارای پنج بخش، ۹ دهستان و ۴۷۷ آبادی می‌باشند که بر طبق آماربرداری عمومی نفوس و مسکن سال ۱۳۹۵، حدود ۲۵۷۰۰ خانوار و ۱۲۶۰۰۰ نفر جمعیّت دارند (مرکزآمار ایران ۲۰۰۶).

فعالیت‌های کشاورزی مطرح در شهرستان‌های هیرمند و زهک شامل زراعت، پرورش دام و طیور، تولیدات باغی، گلخانه‌ای و پرورش ماهی است که در این راستا، زراعت و دامداری و پرورش طیور به صورت تلفیقی، اقتصاد عمده خانوارهای روستایی را تشکیل می دهد و فعالیت‌های دیگر به دلیل فراهم نبودن بستر مناسب در بسیاری از روستاهای منطقه گسترش نیافته است. بنابراین کشاورزان برای ادامه فعالیت خود به زیرسطحی یا چاهک روی آورده‌اند که به واسطه این آب اقدام به کشت انواع غلات، گیاهان علوفه‌ای، گیاهان دارویی، دانه‌های روغنی، محصولات جالیزی، گیاهان غده‌ای و بقولات می‌کنند. گندم، جو، ذرت دانه‌ای و علوفه ای، یونجه، کلزا، هندوانه، خربزه، ماش، عدس، پیاز، سیر، رازیانه، زیره سبز و سیاهدانه مهم‌ترین محصولات این گروه‌ها هستند که در منطقه کشت می‌شوند. از مجموع ۳۲۶۸۳ نفر کشاورز ساکن در منطقه سیستان، ۳۰/۴۷ درصد در شهرستان هیرمند و ۲۰/۲۸ درصد در شهرستان زهک زندگی می‌کنند.



شکل ۱- موقعیت شهرستان‌های مورد مطالعه

جامعه آماری و جمع‌آوری داده‌ها

این مطالعه با استفاده از اطلاعات جمع آوری شده در سال زراعی ۱۴۰۰در منطقه سیستان انجام شد. پژوهش حاضر از لحاظ میزان و درجه کنترل غیر آزمایشی و توصیفی، از نظر نحوه گردآوری داده‌ها، میدانی و در نهایت به لحاظ قابلیت تعمیم یافته‌ها، از نوع پیمایشی محسوب می‌شود. جامعه آماری مجموعه‌ای از افراد یا واحدهایی است که حداقل دارای یک صفت

مشـــترک باشـــند (حجازی و همکاران ۱۹۹۹). جامعه آماری این مطالعه شامل تمام کشاورزان شهرستان‌های زهک و هیرمند بود که ویژگی مشـــترک آنها کشـــت محصـولات اصـلی کشـاورزی منطقه سیستان می‌باشد. در تحقیق حاضـــر، نمونه‌گیری از نوع نظام‌مند طبقه‌ای انجام شـــده و تعداد نمونه مورد نیاز بر اســـاس رابطه کوکران تعیین گردید. بر این اســـاس، ۹۷ مزرعـه در شهرستان زهک و ۱۱۹ مزرعه در شـهرستان هیرمند به عنوان نمونه آماری انتخاب و مورد بررسی قرار گرفتند. این تعداد نمونه به نحوی انتخاب شـــده اســـت که بتواند نماینده‌ای مناسـب از وضـعیت کلی نظام‌های کشـاورزی این مناطق باشد و تحلیل‌های دقیق‌تری ارائه نماید.

برای دسـتیابی به نمونه‌ها و تکمیل پرسـشـنامه‌ها، از روش نمونه‌گیری طبقه‌ای با اختصـاص متناسـب (مناطق مورد مطالعه به عنوان طبقات) بهره گرفته شـد. در وهله بعد، با مراجعه به چارچوب نمونه، تعداد کشـاورز مورد نظر در هر یک از طبقات به صـورت تصـادفی انتخاب و ســـپس به گردآوری داده‌های مورد نیاز از طریق تکمیل پرسشنامه‌ها مبادرت به عمل آمد. رابطه کوکران عبارت است از (اشنایدر و کوکران ۱۹۸۰):

$$n = \frac{N(t.s)^2}{nd^2 + (t.s)^2}$$

N نشان‌دهنده کل جامعه آماری، n حجم نمونه‌ای است که از آن جامعه انتخاب می‌شود، t مقدار آماره t استیودنت، s انحراف معیار جامعه یا نمونه (بسته به نوع محاسبه) و d دقت احتمالی مطلوب در برآورد پارامتر مورد نظر است.

ردپای امرژی

برای محاسبه ردپای امرژی ابتدا نیاز است تا نظام‌های تولید از طریق تکنیک تحلیل امرژی مورد ارزیابی قرار گیرند.

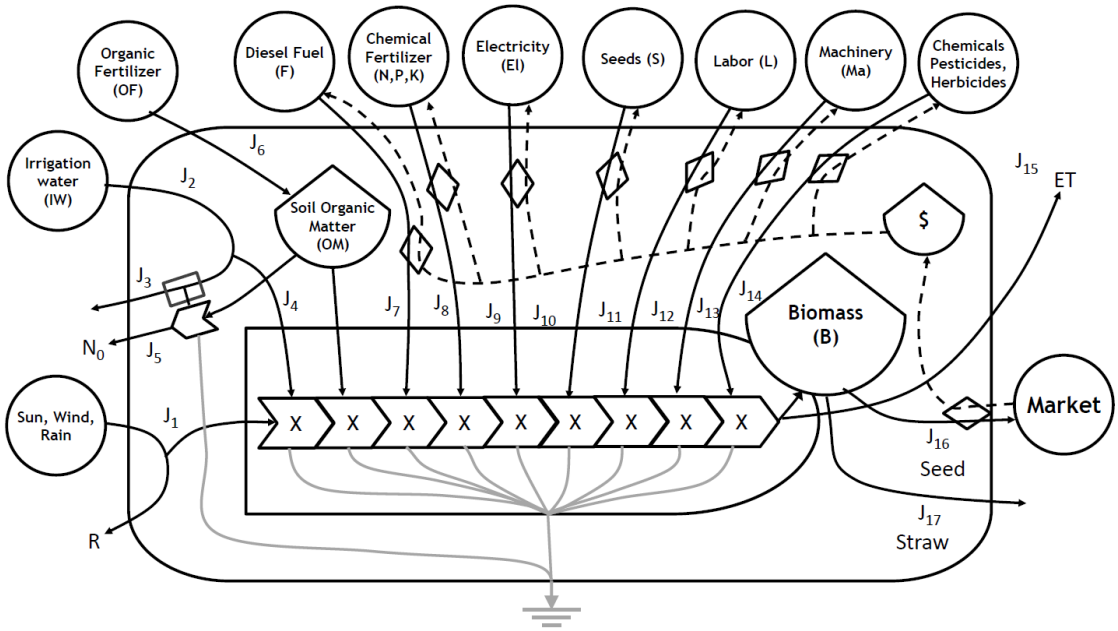
تحلیل امرژی

اولین قدم در تحلیل امرژی تشـخیص مرزهای مکانی و زمـانی و بعد ترســـیم نمودار زبان نظام‌هـای انرژی (ESL[1]) اســـت (ادوم و پترســـون ۱۹۹۶). این نمودارها مرزهـای مکانی و زمـانی نظام، اجزای اصـــلی و روابط متقابل درون نظام و همچنین جریان منابع تجدیدپذیر و غیرقابل تجدید و منشـــا مواد یا انرژی محلی یا وارداتی را نشـــان می‌دهد (امیری و همکاران ۲۰۲۱، فلاح نژاد و آرمین ۲۰۲۲). این نمودار برای نظام‌های مورد مطالعه در شـکل ۲ نشـان داده شـده اسـت. دومین مرحله برای تحلیل امرژی، رسم جداول ارزیابی امرژی است. در این جداول ورودی‌های نظام‌های مورد مطالعه به سـه گروه محیطی تجدیدپذیر و غیرقابل تجدید و خریداری شـــده تقسیم می‌شوند.

اطلاعات مربوط به نهاده‌های ورودی خریداری شده و همچنین خروجی نظـام از طریق مصـــاحبـه بـا مزرعـه‌داران جمع‌آوری شـــد. داده‌هـای ورودی‌هـای تجدیدپذیر طبیعی مانند تابش خورشـــید، بارش باران و سرعت باد از طریق آمار ایستگاه‌های هواشناسی منطقه بدست آمد.

در تحقیق حـاضـــر، داده‌هـای مربوط بـه نهـاده‌هـای ورودی خریداری شـــده از جمله کودها و ســـموم، به عنوان یکی از مهم‌ترین پـارامترهـای تحلیـل پـایـداری اکولوژیکی سـیسـتم‌های کشـاورزی مورد اسـتفاده قرار گرفتند. این داده‌ها، کمک می‌کنند تا ناپایداری بالقوه در مصـــرف منابع شـــیمیایی و تأثیر آن بر محیط زیســـت دقیق‌تر بررســـی شـــود. به علاوه، جمع‌آوری داده‌های خروجی نظام، مانند میزان تولید محصـــول و کربن آزاد شـــده، امکان تحلیل کارایی اکولوژیکی و بهینه‌ســـازی فرآیندهای کشاورزی را فراهم می‌سازد.

[1] Energy System Language



شکل ۲- مدل مفهومی جریان ورودی‌ها و خروجی‌ها در نظام‌های زراعی شهرستان‌های زهک و هیرمند

همچنین، داده‌های مربوط به ورودی‌های تجدیدپذیر طبیعی مانند تابش خورشید، بارش باران و سرعت باد که از طریق آمار ایستگاه‌های هواشناسی منطقه بدست آمد، در ارزیابی پتانسیل انرژی طبیعی و تدوین استراتژی‌های مناسب برای مدیریت منابع طبیعی مؤثر بوده‌اند. این داده‌ها، امکان تحلیل دقیق‌تری از تعاملات محیطی و تأثیرگذاری اقلیمی بر فرآیندهای کشاورزی را فراهم نموده و در ارائه راهکارهای پایدار برای بهره‌وری بهتر از منابع کمک می‌کنند.

منابع تجدیدناپذیر طبیعی مانند فرسایش آبی بر اساس مدل (USLE) بدست آمد. میزان ورودی انرژی سالانه مانند ماشین‌آلات بر اساس طول عمر پیش بینی شده آن‌ها بیان شد. مقدار انرژی خروجی به عنوان کالری قابل سوختن با استفاده از روش ارائه شده در ISO1928 تعریف شد (دورادو و همکاران ۲۰۰۶). پس از محاسبه همه جریان‌های ورودی و خروجی، با ضرب انواع جریان انرژی و مواد در ضرایب تبدیل مناسب می‌توان آنها را به واحد امرژی (sej) تبدیل کرد (جداول ۲ و ۳) (براون و اولجیاتی ۲۰۰۴).

پس از آنکه امرژی هر یک از نظام‌های تولیدی محاسبه شد، با استفاده از نتایج این روش می‌توان به بررسی ردپای امرژی پرداخت. ردپای امرژی از دو بخش اصلی ظرفیت زیستی امرژی و ردپای امرژی تشکیل شده است که در ادامه روش محاسبه آن‌ها ارائه شده است.

ظرفیت زیستی امرژی (EBC)

برای محاسبه ظرفیت قابل تحمل امرژی نیاز به امرژی ورودی‌های محیطی تجدیدپذیر است و رابطه ۲ برای محاسبه این شاخص مورد استفاده قرار می‌گیرد.

$$EBC = (1\text{-}12\%) \times R/P1 \qquad \text{(رابطه ۲)}$$

در این رابطه EBC ظرفیت زیستی امرژی را نشان می‌دهد، ۱۲ درصد برای حفاظت از تنوع زیستی به پیشنهاد کمیسیون جهانی محیط زیست و توسعه در رابطه قرار گرفته است، R نشان دهنده ورودی‌های تجدیدپذیر محیطی (امژول خورشیدی) است که برای جلوگیری از ارزیابی مضاعف بزرگ‌ترین ورودی امرژی تجدیدپذیر در نظر گرفته می‌شود و P1 چگالی امرژی جهانی سالانه (امژول خورشیدی در متر مربع در سال) را نشان می‌دهد که از طریق رابطه زیر محاسبه می شود (یانگ و همکاران ۲۰۱۸، ژانگ و همکاران ۲۰۲۰).

$$P1=\frac{Total\ emergy\ of\ the\ earth}{Area\ of\ the\ earth}=\frac{1.20E+25\ sej}{5.1E+14m^2}=2.35E+10sej\ m^{-2}$$ (رابطه ۳)

امرژی دریافتی سرتاسر زمین در طول سال شامل مقدار انرژی تابش خورشیدی، انرژی زمین گرمایی و امواج است (براون و اولجیاتی ۲۰۱۶).

ردپای امرژی (EFP)

برای محاسبه ردپای امرژی به امرژی ورودی‌های اقتصادی نیاز است

$$EFP = E_w/P_2$$ (رابطه ۴)

برای محاسبه ردپای امرژی مطابق با رابطه شماره ۴، دو آیتم امرژی منابع اقتصادی (E_W) و چگالی امرژی منطقه ای (P_2) مورد استفاده قرار می‌گیرد که چگالی امرژی منطقه‌ای از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$P2=\frac{Total\ emergy\ in\ Sistan}{Areas\ of\ the\ Sistan}=\frac{1.585E+21\ sej}{5.213E+09\ m^2}=3.04E+11sej\ m^{-2}$$ (رابطه ۵)

شاخص‌های ردپای امرژی

برای درک بهتر از پایداری نظام‌های تولید نیاز است تا شاخص‌های وابسته به ردپای امرژی بررسی شود (تناکیان و همکاران ۲۰۲۶). شاخص‌هایی که در این مطالعه به آن‌ها پرداخته می‌شود شامل کسری/مازاد اکولوژیک امرژی (EED/EES)، شاخص فشار اکولوژیکی (EPI)، شدت ردپای اکولوژیک (EFI) و شاخص هماهنگی اکولوژیکی و اقتصادی (EECI) است که روش محاسبه آن‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- روابط محاسباتی شاخص‌های ردپای امرژی

شاخص	فرمول
شاخص کسری/مازاد اکولوژیک امرژی	EED/EES= ECC-EEF
شاخص فشار اکولوژیک	EPI = EEF / ECC+EEF
شدت ردپای اکولوژیک	EFI = EEF / ECC
شاخص هماهنگی اکولوژیکی و اقتصادی	$EECI=\frac{EFI+1}{\sqrt{EFI^2+1}}$

نتایج و بحث

ظرفیت زیستی امرژی (EBC)

ظرفیت زیستی امرژی به میانگین ظرفیت زیستی جهت عرضه منابع اکولوژیک جهانی اشاره دارد (ژائو و همکاران ۲۰۱۳). انرژی خورشید بدیهی‌ترین منبع زیستی ورودی به نظام‌های کشاورزی در همه نقاط جهان است. بسته به شرایط اقلیمی باد و باران نیز نهاده‌هایی هستند که طی فرایند تولید در روند رشد محصولات موثر هستند. با توجه به بادخیز بودن مناطق هدف، باد نقش قابل توجهی نسبت به باران طی فرایند تولید ایفا می‌کند.

نتایج بررسی این شاخص نشان داد که تولید گندم در شهرستان زهک دارای بیشترین ظرفیت زیستی امرژی بود. پس از گندم، تولید جو و یونجه در این شهرستان نسبت به سایر محصولات مورد نظر در این مطالعه ظرفیت زیستی بیشتری داشتند. همانطور در جدول ۲ مشاهده می‌شود فرایند تولید سیاهدانه و رازیانه با کمترین ظرفیت زیستی در شهرستان زهک تکمیل می‌شود. در شهرستان هیرمند یونجه، ذرت

دانه‌ای و ذرت علوفه‌ای با بیشترین و سیاه دانه و زیره سبز به صورت مشترک با کمترین ظرفیت زیستی تولید شدند. سطح زیر کشت محصولات مختلف مهم‌ترین نقش را در نتایج حاصل ایفا کرد. در شهرستان زهک بیشترین سطح زیرکشت مربوط به گندم و در شهرستان هیرمند مربوط به یونجه بود. شاید دلیل توجه زیاد کشاورزان هیرمندی به تولید محصولات علوفه‌ای پرورش دام در کنار محصولات زراعی باشد و خرید و قیمت تضمینی گندم توسط دولت نیز می‌تواند مهم‌ترین انگیزه کشاورزان در زهک جهت تولید این محصول باشد.

نتایج نشان می‌دهد که محصولات مختلف از ظرفیت زیستی امرژی متفاوتی برخوردارند. این تفاوت‌ها را می‌توان به عوامل مختلفی از جمله شرایط اقلیمی، نوع محصول، سطح زیر کشت و همچنین عوامل اقتصادی و اجتماعی مرتبط با تولید هر محصول نسبت داد (انتوی آگی و همکاران ۲۰۱۲). به عنوان مهم‌ترین منابع انرژی طبیعی در مناطق خشک و نیمه خشک، باد و باران نقش بسیار مهمی در تعیین ظرفیت زیستی امرژی محصولات دارند. در این مطالعه، با توجه به بادخیز بودن مناطق هدف، باد به عنوان یک نهاده مهم در فرایند تولید محصولات، به ویژه در شهرستان زهک، نقش قابل توجهی ایفا کرده است. تابش خورشیدی به عنوان منبع اصلی انرژی برای فتوسنتز، تابش خورشیدی نیز بر ظرفیت زیستی محصولات تأثیرگذار است (کامپیلو و همکاران ۲۰۱۲). هرچند در این مطالعه به طور مستقیم به این عامل پرداخته نشده است، اما به طور غیرمستقیم در شاخص ظرفیت زیستی امرژی لحاظ شده است. سطح زیر کشت هر محصول، به طور مستقیم بر ظرفیت زیستی امرژی آن تأثیر می‌گذارد. محصولاتی که سطح زیر کشت بیشتری دارند، به طور کلی ظرفیت زیستی امرژی بالاتری دارند. در این مطالعه، گندم در شهرستان زهک و یونجه در شهرستان هیرمند به دلیل سطح زیر کشت بالاتر، بیشترین ظرفیت زیستی امرژی را دارا بوده‌اند.

با توجه به نتایج، تولید گندم در شهرستان زهک بیشترین ظرفیت زیستی امرژی را دارا است. این امر می‌تواند به دلیل سطح زیر کشت بالای گندم و همچنین سیاست‌های حمایتی دولت در زمینه خرید تضمینی گندم باشد. در شهرستان هیرمند، یونجه بیشترین ظرفیت زیستی امرژی را دارد. این امر می‌تواند به دلیل اهمیت پرورش دام در این منطقه و نیاز به تولید علوفه باشد. عوامل اقتصادی و اجتماعی مانند سیاست‌های حمایتی دولت در زمینه تولید محصولات کشاورزی، مثلاً خرید تضمینی گندم، و عادات کشت کشاورزان و ترجیحات آن‌ها در انتخاب محصولات، می‌تواند بر سطح زیر کشت و در نتیجه ظرفیت زیستی امرژی محصولات تأثیرگذار باشد (نیکویی و همکاران ۲۰۲۲).

ردپای امرژی (EFP)

ردپای امرژی به محاسبه تاثیر فعالیت‌های انسان بر محیط می‌پردازد (ژائو و همکاران ۲۰۰۵). در بخش کشاورزی این تاثیر ناشی از مصرف فشرده نهاده‌های ورودی تجدیدناپذیر اقتصادی است که موجب افزایش ردپای انسان بر نظام تولیدی می‌شود. نیتروژن، فسفر و نیروی انسانی پرمصرف‌ترین نهاده‌های ورودی به نظام‌های تولید گندم در هر دو شهرستان هستند که باعث تحمیل بیشترین ردپای به این نظام‌ها در میان سایر نظام‌های هدف مطالعه در شهرستان‌های زهک و هیرمند شده‌اند. البته باید به این نکته توجه شود که علاوه بر مقدار بیشتر نهاده‌های اقتصادی ورودی به مزارع گندم در زهک و هیرمند، سطح زیرکشت این محصول نیز در نتیجه حاصل برای این شاخص موثر بود. کمترین میزان ردپای به مزارع تولید سیاهدانه در هر دو شهرستان زهک و هیرمند وارد شد که علت آن تاکید بر سلامت فرایند تولید گیاهان دارویی با حداقل استفاده از نهاده‌های شیمیایی است. پس از سیاهدانه، رازیانه در زهک و ذرت دانه‌ای در هیرمند نیز حداقل ردپای را ناشی از فعالیت‌های انسانی دریافت کردند.

ردپای امرژی به عنوان یک شاخص کلیدی برای سنجش فشار فعالیت‌های انسانی بر محیط زیست، نشان می‌دهد که چه میزان از ظرفیت اکولوژیکی سیاره برای تولید محصولات و خدمات مورد نیاز انسان مصرف می‌شود (یانگ و فن ۲۰۱۹). در مطالعه حاضر، نتایج

نشـــان داد که تولید گندم در شـــهرســـتان‌های زهک و هیرمند به دلیل مصـــرف بالای نهاده‌های غیر تجدیدپذیر مانند نیتروژن، فسفر و نیروی انسانی، بیشترین ردپای امرژی را به خود اختصاص داده است. این نشان‌دهنده فشار قابل توجه این محصول بر محیط زیست و منابع طبیعی است. علل بالا بودن ردپای امرژی در تولید گندم، مصـــرف بالای نهاده‌های غیر تجدیدپذیر و ســـطح زیر کشت بالای آن است. در مقابل، تولید سیاهدانه در هر دو شهرستان کمترین ردپای امرژی را داشته است. این امر را می‌توان به روش‌های تولید ســـنتی و ارگانیک ســـیاهدانه نســـبت داد. همچنین، رازیانه در زهک و ذرت دانه‌ای در هیرمند نیز ردپای امرژی نسبتا کمی داشته‌اند.

هر دو شهرستان زهک و هیرمند الگوی مشابهی در مورد محصـــولات با بیشـــترین و کمترین ردپای امرژی نشـــان می‌دهند. با این حال، تفاوت‌هایی نیز در میزان ردپای امرژی محصولات مختلف در این دو شهرستان وجود دارد که می‌تواند به تفاوت در شرایط اقلیمی، نوع خاک، دســـترســـی به آب و ســـایر عوامل محلی مرتبط باشـــد. نتایج این مطالعه نشـــان می‌دهد که برای کاهش فشار بر محیط زیست و دستیابی به کشاورزی پایدار، باید به دنبال راهکارهایی برای کاهش ردپای امرژی محصـــولات پر مصـــرف مانند گندم بود. حمایت از روش‌های کشـــاورزی پایدار مانند کشـــاورزی ارگانیک، کاهش مصرف نهاده‌های شیمیایی و افزایش بهره‌وری آب می‌تواند به کاهش ردپای امرژی محصـــولات کمک کند. همچنین، تنوع‌بخشـــی به کشت و ســـیاســـت‌گذاری مناسب در این زمینه ضروری است.

شاخص‌های ردپای امرژی

شاخص کسری/مازاد اکولوژیک امرژی (EED/EES)

این شـــاخص به بررســـی وضـــعیت تعادل اکولوژیک نظام‌های تولیدی می‌پردازد (یائو و همکاران ۲۰۲۲). عدد حاصل از این شاخص به این صورت توصیف می‌شود: در صـــورتیکه عدد حاصـــل بزرگتر، کوچک تر و یا برابر با صـــفر باشـــد نظام تولیدی دارای مازاد، کســـری و در تعادل اکولوژیک اســـت (یانگ و همکاران ۲۰۱۸). عدد حاصل در صورتی بزرگ‌تر از صفر می‌شود که ظرفیت زیستی بیشتر از ردپای امرژی باشد. همانطور که در دو شـــاخص قبل (EBC و EFP) ارائه شـــد نظام‌های تولید گندم، جو و یونجه در شـــهرســـتان زهک ظرفیت زیســـتی بیشـــتری نســـبت به ردپای امرژی داشـــتند که این مورد موجب شـد که این نظام‌ها دارای مازاد اکولوژیک امرژی باشـــند. این اتفاق برای نظام‌هـای تولید یونجه، ذرت دانه‌ای و علوفه‌ای هیرمند نیز افتاد و کوچک بودن ردپای نسبت به ظرفیت زیستی موجب شد تا این نظام‌ها دارای مازاد اکولوژیک امرژی باشند. سیر و گندم تنها نظام‌های تولیدی به ترتیب در شهرستان زهک و هیرمند بودند که فشـــار ناشـــی از فرایند تولید موجب شـــد تا با کســـری اکولوژیک مواجه شوند (جدول ۲).

شاخص کسری/مازاد اکولوژیک امرژی به عنوان یک ابزار قدرتمند برای ارزیابی وضعیت تعادل اکولوژیکی سیستم‌های تولیدی مورد استفاده قرار می‌گیرد (یانگ و فن ۲۰۱۹). این شاخص با مقایسه ظرفیت زیستی یک سیستم با ردپای امرژی آن، به ما نشان می‌دهد که آیا یک سیستم از منابع طبیعی خود به صورت پایدار استفاده می‌کند یا خیر. نتایج نشان می‌دهد که اکثر سیستم‌های تولیدی در شهرستان‌های زهک و هیرمند، به ویژه سیستم‌های تولید گندم، جو، یونجه، ذرت دانه‌ای و علوفه‌ای، دارای مازاد اکولوژیک امرژی هستند. این بدان معنی است که ظرفیت زیستی این سیستم‌ها بیشتر از ردپای امرژی آن‌ها است و به عبارت دیگر، این سیستم‌ها از منابع طبیعی خود به صورت پایدارتری استفاده می‌کنند. در مقابل، سیستم‌های تولید سیر در زهک و گندم در هیرمند با کسری اکولوژیک مواجه هستند. این نشان می‌دهد که فشار ناشی از فرایند تولید این محصولات بر منابع طبیعی بیشتر از ظرفیت بازسازی این منابع است. علت تفاوت در وضعیت اکولوژیک سیستم‌های تولیدی، نوع محصول، سطح زیر کشت و روش‌های مدیریت تولید است. محصولات مختلف نیازهای متفاوتی به منابع طبیعی دارند و محصولاتی که سطح زیر کشت بیشتری دارند، معمولاً ردپای امرژی بالاتری نیز دارند. روش‌های مدیریت تولید نیز در تعیین وضعیت اکولوژیک سیستم‌های تولیدی نقش مهمی ایفا می‌کنند. استفاده از روش‌های کشاورزی پایدار مانند کشاورزی ارگانیک،

کاهش مصرف نهاده‌های شیمیایی و افزایش بهره‌وری آب می‌تواند به بهبود وضعیت اکولوژیکی سیستم‌های تولیدی کمک کند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که برای حفظ پایداری منابع طبیعی و محیط زیست، لازم است که مدیریت پایدار در سیستم‌های تولیدی کشاورزی اعمال شود. همچنین توجه به محصولات با ردپای امرژی کمتر و ظرفیت زیستی بیشتر و ترویج کشاورزی پایدار ضروری است.

شاخص فشار اکولوژیکی (EPI)

EPI، میزان استفاده از منابع اکولوژیک را مورد ارزیابی قرار می‌هد (یائو و همکاران ۲۰۲۲). پنگ و همکاران (۲۰۱۸) مقدار حاصل از این شاخص را که بین صفر و یک متغیر هستند اینگونه توصیف کردند که نتیجه بین صفر و ۰/۵ نشان دهنده مصرف کمتر منابع اکولوژیک نسبت به ظرفیت اکولوژیک است. این نتیجه برای همه نظام‌های تولیدی هدف مطالعه بجز سیر در زهک و گندم در هیرمند حاصل شد. به ترتیب در شهرستان زهک زیره سبز، سیاه‌دانه و عدس و در شهرستان هیرمند ذرت دانه‌ای، سیاهدانه و کلزا با کمترین فشار اکولوژیکی تولید می‌شوند این نتیجه پایداری تولید این نظام‌ها را تضمین می‌کند. مقدار شاخص فشار اکولوژیک در نظام‌های تولید سیر در شهرستان زهک ۰/۵۹۰۹۰۳ و در هیرمند ۰/۵۱۳۸۹۲ حاصل شد دلیل آن بزرگی ردپای امرژی از ظرفیت زیستی بود که این امر دوام تولید این نظام‌ها را با مخاطراتی مواجه می‌کند (پنگ و همکاران ۲۰۱۸).

شاخص فشار اکولوژیکی ابزاری قدرتمند برای سنجش میزان استفاده از منابع اکولوژیکی توسط سیستم‌های تولیدی است (چن و لین ۲۰۰۸). این شاخص به ما نشان می‌دهد که چه مقدار از ظرفیت اکولوژیکی یک منطقه برای تولید محصولات کشاورزی مصرف می‌شود و آیا این استفاده پایدار است یا خیر. نتایج نشان می‌دهد که اکثر سیستم‌های تولیدی در شهرستان‌های زهک و هیرمند، فشار اکولوژیکی کمی دارند؛ به عنوان مثال، محصولات مانند زیره سبز، سیاه‌دانه و عدس در زهک و ذرت دانه‌ای، سیاهدانه و کلزا در هیرمند کمترین فشار اکولوژیکی را دارند. در مقابل، سیستم‌های تولید سیر در زهک و گندم در هیرمند فشار اکولوژیکی بالایی دارند. علل تفاوت در فشار اکولوژیکی سیستم‌های تولیدی، نوع محصول، سطح زیر کشت و روش‌های مدیریت تولید است. محصولات مختلف نیازهای متفاوتی به منابع طبیعی دارند و محصولاتی که سطح زیر کشت بیشتری دارند، معمولاً فشار اکولوژیکی بالاتری نیز دارند. روش‌های مدیریت تولید نیز در تعیین فشار اکولوژیکی سیستم‌های تولیدی نقش مهمی ایفا می‌کنند. استفاده از روش‌های کشاورزی پایدار مانند کشاورزی ارگانیک، کاهش مصرف نهاده‌های شیمیایی و افزایش بهره‌وری آب می‌تواند به کاهش فشار اکولوژیکی کمک کند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که برای حفظ پایداری منابع طبیعی و محیط زیست، لازم است که مدیریت پایدار در سیستم‌های تولیدی کشاورزی اعمال شود. همچنین توجه به محصولات با فشار اکولوژیکی کمتر و ترویج کشاورزی پایدار ضروری است.

شدت ردپای اکولوژیک (EFI)

شاخص شدت ردپای اکولوژیک (EFI) میزان فشار نظام‌های تولیدی بر محیط اکولوژیک را مورد بررسی قرار می‌دهد (لی و همکاران ۲۰۱۹). نتایج نشان داد که از میان همه نظام‌های تولیدی هدف مطالعه در شهرستان زهک نظام‌های تولید پیاز، هندوانه و خربزه به ترتیب با ۰/۸۳۸۳۸۵، ۰/۵۳۰۰۷۸ و ۰/۴۸۶۷۵ بیشترین شدت ردپای را به محیط اکولوژیک وارد می‌کنند با این وجود براساس توصیف ژانگ و همکاران (۲۰۲۰) هر سه نظام تولیدی به دلیل اینکه شدت ردپای اکولوژیک آن‌ها بین صفر و یک قرار دارد به بوم‌نظام‌های طبیعی استرسی وارد نمی‌کنند. در صورتیکه مقدار این شاخص بزرگتر از یک باشد، یعنی ردپای امرژی بزرگتر از ظرفیت زیستی بوده و به دلیل استرس تحمیلی به بوم‌نظام‌های اطراف امنیت آن ها با خطر مواجه می‌شود (ژانگ و همکاران ۲۰۲۰) که این مورد (شدت ردپای اکولوژیک بزرگتر از یک) برای نظام تولید گندم هیرمند اتفاق افتاد. مقدار این شاخص برای گندم هیرمند ۱/۰۵۷۱۵۷

محاسبه شد که با توجه به توصیف‌های صورت گرفته این نظام‌ها به بوم‌نظام‌های اطراف خود نسبت به سایر نظام‌های هدف در هیرمند تنش بیشتری وارد می‌کنند. شدت ردپای اکولوژیک برای سایر نظام‌های تولیدی در هیرمند کمتر از یک (جدول ۳) محاسبه شد.

شاخص شدت ردپای اکولوژیکی ابزاری است که میزان فشار یک سیستم تولیدی بر محیط زیست را نشان می‌دهد. به عبارت دیگر، این شاخص به ما می‌گوید که هر واحد محصول تولیدی چه مقدار از منابع طبیعی را مصرف می‌کند و چه میزان به محیط زیست آسیب می‌رساند (استوگلنر ۲۰۲۳). نتایج نشان می‌دهد که اکثر سیستم‌های تولیدی در شهرستان‌های زهک و هیرمند، به ویژه محصولات مانند زیره سبز، سیاه‌دانه و عدس در زهک و ذرت دانه‌ای، سیاهدانه و کلزا در هیرمند، شدت ردپای اکولوژیکی کمتری دارند، یعنی فشار کمتری بر محیط زیست وارد می‌کنند. در مقابل، سیستم‌های تولید پیاز، هندوانه و خربزه در زهک و گندم در هیرمند شدت ردپای اکولوژیکی بالاتری دارند، یعنی به منابع طبیعی فشار بیشتری وارد می‌کنند. علت تفاوت در شدت ردپای اکولوژیکی، نوع محصول، سطح زیر کشت و روش‌های مدیریت تولید است. محصولات مختلف نیازهای متفاوتی به منابع طبیعی دارند و محصولاتی که سطح زیر کشت بیشتری دارند، معمولاً شدت ردپای اکولوژیکی بالاتری نیز دارند. روش‌های مدیریت تولید نیز در تعیین شدت ردپای اکولوژیکی سیستم‌های تولیدی نقش مهمی ایفا می‌کنند. استفاده از روش‌های کشاورزی پایدار مانند کشاورزی ارگانیک، کاهش مصرف نهاده‌های شیمیایی و افزایش بهره‌وری آب می‌تواند به کاهش شدت ردپای اکولوژیکی کمک کند. شاخص شدت ردپای اکولوژیکی در کنار شاخص‌های دیگری مانند شاخص کسری/مازاد اکولوژیک امرژی و شاخص فشار اکولوژیکی به ما دید کامل‌تری از وضعیت پایداری سیستم‌های تولیدی می‌دهد.

شاخص هماهنگی اکولوژیکی و اقتصادی (EECI)

شاخص هماهنگی اکولوژیکی و اقتصادی (EECI) به این موضوع می‌پردازد که توسعه اقتصادی تا چه میزان هماهنگ با ظرفیت اکولوژیک صورت می‌گیرد (یائو و همکاران ۲۰۲۲). مقدار این شاخص در بازه ۱ و ۱/۴۱۴ قرار می‌گیرد. هر چه عدد حاصل به یک نزدیک‌تر باشد هماهنگی کمتر، به ۱/۴۱۴ نزدیکتر باشد هماهنگی بیشتر و برابر با این عدد باشد (۱/۴۱۴) هماهنگی در بهترین حالت خود قرار دارد (یانگ و همکاران ۲۰۱۸). همانطور در که جداول۲ و۳ مشاهده می‌شود، مقدار شاخص هماهنگی اکولوژیکی و اقتصادی برای نظام‌های هدف در هر دو شهرستان زهک و هیرمند یک و نزدیک به یک بدست آمد. با توجه به توصیف صورت گرفته توسط یانگ و همکاران (۲۰۱۸) این نتیجه نشان دهنده عدم تعادل میان توسعه اقتصادی با ظرفیت اکولوژیک است.

شاخص هماهنگی اکولوژیکی و اقتصادی به ما نشان می‌دهد که توسعه اقتصادی در یک منطقه تا چه اندازه با ظرفیت‌های طبیعی آن همخوانی دارد (چن و لین ۲۰۰۸). در پژوهش حاضر، مقدار EECI برای همه سیستم‌های تولیدی در زهک و هیرمند به عدد ۱ نزدیک بوده است که نشان‌دهنده عدم هماهنگی بین توسعه اقتصادی و ظرفیت اکولوژیکی است. دلایل این عدم هماهنگی عبارتند از: فشار بر منابع طبیعی، عدم توجه به ظرفیت اکولوژیکی در برنامه‌ریزی‌ها و استفاده بی‌رویه از نهاده‌های شیمیایی. پیامدهای این عدم هماهنگی شامل تخریب محیط زیست، کاهش بهره‌وری و افزایش آسیب‌پذیری سیستم‌های تولیدی است. برای بهبود وضعیت موجود، باید به سمت توسعه پایدار حرکت کنیم که شامل مدیریت پایدار منابع آب و خاک، ترویج کشاورزی ارگانیک، ایجاد مشوق‌های اقتصادی و توجه به ظرفیت‌سازی کشاورزان است.

جدول ۲- نتایج ردپای امرژی نظام‌های تولید محصولات کشاورزی در زهک

نظام تولیدی	ECC ($gha.yr^{-1}$)	EEF ($gha.yr^{-1}$)	EES/EED ($gha.yr^{-1}$)	EPI	EFI	EECI
گندم	۷/۲۸×۱۰^۸	۳/۳۰×۱۰^۸	۳/۹۸×۱۰^۸	۰/۳۱۱۷۴۵	۰/۴۵۲۹۵	۱
جو	۱/۴۱×۱۰^۸	۵/۶۹×۱۰^۷	۸/۴۲×۱۰^۷	۰/۲۸۷۵۵۴	۰/۴۰۳۶۱۵	۱
یونجه	۳/۰۹×۱۰^۷	۸/۷۸×۱۰^۶	۲/۲۱×۱۰^۷	۰/۲۲۱۲۹۳	۰/۲۸۴۱۸۱	۱
خربزه	۱/۰۰۴×۱۰^۷	۴/۸۸×۱۰^۶	۵/۱۵×۱۰^۶	۰/۳۲۷۳۹۲	۰/۴۸۶۷۵	۱
هندوانه	۶/۶۹×۱۰^۶	۳/۵۴×۱۰^۶	۳/۱۴×۱۰^۶	۰/۳۴۶۴۳۹	۰/۵۳۰۰۷۸	۱
ذرت علوفه ای	۶/۳۸×۱۰^۶	۳/۰۵×۱۰^۶	۳/۳۳×۱۰^۶	۰/۳۲۳۳۲۸	۰/۴۷۷۸۲۱	۱
عدس	۵/۷۸×۱۰^۶	۱/۶۳×۱۰^۶	۴/۱۴×۱۰^۶	۰/۲۲۰۶۷۸	۰/۲۸۳۱۶۷	۱/۰۰۰۰۰۱
سیر	۴/۶۲×۱۰^۶	۶/۶۸×۱۰^۶	−۲۰۵۵۷۵۳	۰/۵۹۰۹۰۳	۰/۴۴۴۴۱	۱
کلزا	۴/۴۳×۱۰^۶	۲/۰۵×۱۰^۶	۲/۳۷×۱۰^۶	۰/۳۱۶۸۲۶	۰/۴۶۳۷۵۶	۱
پیاز	۳/۷۸×۱۰^۶	۳/۱۷×۱۰^۶	۶۱۲۱۱۶/۲	۰/۴۵۶۰۴۴	۰/۸۳۸۳۸۵	۱
ذرت دانه ای	۲/۱۴×۱۰^۶	۹۱۵۲۶۵/۶	۱/۲۲×۱۰^۶	۰/۲۹۹۰۵۶	۰/۴۲۶۶۴۸	۱/۰۰۰۰۰۱
زیره سبز	۵/۵۵×۱۰^۵	۱۴۸۳۵۴/۴	۴۰۷۱۴۵/۶	۰/۲۱۰۷۷۴	۰/۲۶۷۰۶۵	۱/۰۰۰۰۰۷
ماش	۴۹۹۶۳۶/۸	۱۸۳۶۴۱/۴	۳۱۵۹۹۵/۴	۰/۲۶۸۷۶۵	۰/۳۶۷۵۵	۱/۰۰۰۰۰۵
رازیانه	۲/۵۲×۱۰^۵	۹۱۳۰۸/۴۳	۱۶۱۱۹۱/۶	۰/۲۶۵۵۷۹	۰/۳۶۱۶۱۸	۱/۰۰۰۰۱۱
سیاه دانه	۱/۵۱×۱۰^۵	۴۲۲۸۷/۷۵	۱۰۹۲۱۲/۲	۰/۲۱۸۲۱۷	۰/۲۷۹۱۲۷	۱/۰۰۰۰۲۴

جدول ۳- نتایج ردپای امرژی نظام‌های تولید محصولات کشاورزی در هیرمند

نظام تولیدی	ECC ($gha.yr^{-1}$)	EEF ($gha.yr^{-1}$)	EES/EED ($gha.yr^{-1}$)	EPI	EFI	EECI
گندم	۱/۶۵×۱۰^۷	۱/۷۴×۱۰^۷	−۹۴۳۰۸۵	۰/۵۱۳۸۹۲	۱/۰۵۷۱۵۷	۱
جو	۱/۲۷۵×۱۰^۷	۲/۶۱×۱۰^۶	۱/۰۱×۱۰^۷	۰/۱۷۰۱۰۸	۰/۲۰۴۹۷۶	۱
یونجه	۴/۸۷×۱۰^۷	۲/۵۲×۱۰^۶	۴/۶۲×۱۰^۷	۰/۰۴۹۲۳۷	۰/۰۵۱۷۸۷	۱
خربزه	۷/۸۰×۱۰^۶	۱/۳۹×۱۰^۶	۶/۴۰×۱۰^۶	۰/۱۵۱۶۹۹	۰/۱۷۸۸۲۷	۱/۰۰۰۰۰۱
هندوانه	۷/۱۰×۱۰^۶	۶/۷۷×۱۰^۵	۶/۴۲×۱۰^۶	۰/۰۸۷۱۰۱	۰/۰۹۵۴۱۱	۱/۰۰۰۰۰۱
ذرت علوفه ای	۲/۶۰×۱۰^۷	۲/۸۵×۱۰^۵	۲/۵۷×۱۰^۷	۰/۰۱۰۸۶۵	۰/۰۱۰۹۸۵	۱/۰۰۰۰۰۴
عدس	۱/۵۱۵×۱۰^۷	۹۲۱۱۸/۵۳	۱/۵۰×۱۰^۷	۰/۰۰۶۰۴۴	۰/۰۰۶۰۸	۱/۰۰۰۰۱۱
سیر	۲/۰۲×۱۰^۷	۸/۲۲×۱۰^۶	۱/۱۹×۱۰^۷	۰/۲۸۹۳۴۶	۰/۴۰۷۱۵۴	۱
کلزا	۱/۶۵×۱۰^۷	۹۴۲۶۱/۶۱	۱/۶۴×۱۰^۷	۰/۰۰۵۶۸	۰/۰۰۵۷۱۳	۱/۰۰۰۰۱۱
پیاز	۲/۰۲×۱۰^۷	۲/۴۹×۱۰^۶	۱/۷۷×۱۰^۷	۰/۱۰۹۷۶۵	۰/۱۲۳۲۹۹	۱
ذرت دانه ای	۲/۸۰×۱۰^۷	۳۳۷۲۶/۹۲	۲/۷۹×۱۰^۷	۰/۰۰۱۲۰۳	۰/۰۰۱۲۰۵	۱/۰۰۰۰۳
زیره سبز	۵/۰۵×۱۰^۶	۵۷۱۶۳/۰۳	۴/۹۹×۱۰^۶	۰/۰۱۱۱۹۳	۰/۰۱۱۳۱۹	۱/۰۰۰۰۱۷
ماش	۱/۱۷×۱۰^۷	۹۶۷۱۰/۰۶	۱/۱۶×۱۰^۷	۰/۰۰۸۱۹۸	۰/۰۰۸۲۶۶	۱/۰۰۰۰۱
رازیانه	۱/۰۱×۱۰^۷	۵۹۳۱۰/۴۳	۱/۰۰۴×۱۰^۷	۰/۰۰۵۸۳۸	۰/۰۰۵۸۷۲	۱/۰۰۰۰۱۷
سیاه دانه	۵/۰۵×۱۰^۶	۲۲۶۶۰/۹۴	۵/۰۲×۱۰^۶	۰/۰۰۴۴۶۷	۰/۰۰۴۴۸۷	۱/۰۰۰۰۴۴

نتیجه‌گیری

این مطالعه با هدف بررسی پایداری نظام‌های تولید محصولات کشاورزی شهرستان‌های زهک و هیرمند استان سیستان و بلوچستان در سال زراعی ۱۴۰۰ انجام شد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش، می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که تحلیل ردپای امرژی به عنوان یک ابزار قدرتمند، توانایی ارزیابی دقیق پایداری اکولوژیکی سیستم‌های کشاورزی در مناطق

خشک و نیمه‌خشک مانند زهک و هیرمند را دارد. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که علی‌رغم تفاوت در ظرفیت زیستی امرژی محصولات مختلف، بسیاری از سیستم‌های تولیدی در این مناطق تحت فشار قابل توجهی از نظر منابع طبیعی قرار دارند. به‌ویژه، عدم هماهنگی بین توسعه اقتصادی و ظرفیت اکولوژیکی در این مناطق مشهود است.

یافته‌های این پژوهش حاکی از آن است که برخی از محصولات مانند گندم و یونجه ظرفیت زیستی بالاتری دارند، اما فشار ناشی از تولید برخی محصولات دیگر مانند سیر و گندم در هیرمند، موجب ایجاد کسری اکولوژیکی شده است. همچنین، شاخص فشار اکولوژیکی نشان می‌دهد که برخی از سیستم‌های تولیدی مانند سیر و گندم، منابع اکولوژیکی را بیش از حد مصرف می‌کنند و پایداری آن‌ها را به خطر می‌اندازد. نتایج این پژوهش می‌تواند به عنوان یک خط‌مبنای مهم برای مطالعات آتی و تصمیم‌گیری‌های مدیریتی در حوزه کشاورزی پایدار در مناطق خشک و نیمه‌خشک مورد استفاده قرار گیرد.

در مقایسه با دیگر مطالعات انجام‌شده در زمینه پایداری اکولوژیکی در مناطق خشک و نیمه‌خشک، یافته‌های این پژوهش همخوانی‌های قابل‌توجه و همچنین نقاط تفاوتی را نشان می‌دهد. به عنوان مثال، تحقیقی که توسط سایر محققین کشور انجام شد، نشان داد که مناطق کشاورزی مشابه در دیگر نواحی خشک کشور، با چالش‌های مشابهی در مدیریت منابع طبیعی مواجه هستند، که ظرفیت زیستی محصولات خاصی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. مطالعه‌ی ما نشان‌دهنده اهمیت بالا و مزایای به‌کارگیری تحلیل امرژی در مقایسه با روش‌های سنتی ارزیابی پایداری بوده و همزمان بر افزایش درک از تعاملات بین‌المللی اقتصادی و اکولوژیکی تأکید دارد. با این که رویکرد ما تمرکز خاصی بر پایداری در منطقه سیستان دارد، مفاهیم و نتایج به‌دست‌آمده می‌تواند به سیاست‌گذاران و کشاورزان در سایر مناطق مشابه نیز الهام بخشیده و راهبردهای مشابه برای ارتقاء پایداری و سازگاری با تغییرات اقلیمی را پیشنهاد دهد.

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که شهرستان هیرمند تحت فشار اکولوژیکی بیشتری قرار دارد و تفاوت‌هایی در ظرفیت زیستی بین محصولات مختلف مشاهده می‌شود که لازم است به‌طور دقیق‌تر توضیح داده شود. به منظور کاهش این فشارها، پیشنهاد می‌شود در هیرمند به‌جای کشت محصولاتی با نیاز بیشتر به منابع مانند سیر و گندم، از گونه‌هایی استفاده شود که سازگاری بهتری با شرایط اقلیمی و خاکی منطقه دارند و نیاز کمتری به منابع دارند. همچنین، به دلیل ناپایداری منابع آب، استفاده از روش‌های آبیاری قطره‌ای و سیستم‌های هوشمند مدیریت آب می‌تواند به کاهش مصرف آب و استفاده بهینه از این منابع کمک کند. ارتقاء کشاورزی پایدار از طریق افزایش استفاده از کودهای آلی، رعایت تناوب زراعی و کاهش مصرف سموم شیمیایی، برای حفظ کیفیت خاک و اکوسیستم‌های محلی در هیرمند ضروری است و می‌تواند به کاهش فشار اکولوژیکی در منطقه و تضمین پایداری بلندمدت کمک کند. افزون بر این، سرمایه‌گذاری در تحقیقات و فناوری‌های جدید با هدف بهبود بهره‌وری منابع و کاهش مصرف بیش‌ازحد منابع طبیعی برای مناطق خشک و نیمه‌خشک نظیر زهک و هیرمند اهمیت ویژه‌ای دارد. برگزاری کارگاه‌ها و آموزش‌های مستمر برای کشاورزان نیز می‌تواند الگوهای کشت را به سمت استفاده‌های پایدارتر هدایت کند و فشار بر منابع را کاهش دهد. این پیشنهادات نه تنها به بهبود شرایط فعلی می‌پردازند، بلکه می‌توانند در طولانی‌مدت به بهبود پایداری اکولوژیکی در مناطق مورد مطالعه کمک کنند و نقش راهبردی در مدیریت پایدار منابع در منطقه ایفا نمایند.

سپاسگزاری

این پژوهش با حمایت مالی معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه زابل در قالب طرح پژوهشی شماره IR-UOZ-GR-6673 انجام شده است. نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از همکاری صمیمانه کشاورزان شهرستان‌های زهک و هیرمند که در جمع‌آوری داده‌های میدانی ما را یاری نمودند، تشکر نمایند. همچنین از کارشناسان اداره جهاد کشاورزی شهرستان‌های زهک و هیرمند و اداره کل هواشناسی استان سیستان و بلوچستان به خاطر در اختیار قرار دادن اطلاعات و داده‌های مورد نیاز قدردانی می‌گردد.

منابع مورد استفاده

Amiri Z, Asgharipour MR, Moghadam EH, Kakolvand E and Campbell DE. 2022. Investigating the need to replace the conventional method of sugar beet production in Lorestan province, Iran based on the arguments obtained from emergy calculations. Ecological Modelling, 472: 110091. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2022.110091

Amiri Z, Asgharipour MR, Campbell DE, Azizi K, Kakolvand E and Moghadam EH. 2021. Conservation agriculture, a selective model based on emergy analysis for sustainable production of shallot as a medicinal-industrial plant. Journal of Cleaner Production, 292: 126000. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126000

Angel D and Asudo T. 2018. Sustainable agriculture: A comprehensive review. Journal of Environmental Management, 210: 1-12. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.12.038

Antwi-Agyei P, Fraser ED, Dougill AJ, Stringer LC and Simelton E. 2012. Mapping the vulnerability of crop production to drought in Ghana using rainfall, yield and socioeconomic data. Applied Geography, 32(2): 324-334. https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2011.06.010

Asgharipour MR, Amiri Z and Campbell DE. 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

Brown MT and Ulgiati S. 2004. Emergy analysis and environmental accounting. Encyclopedia of Energy, 2(1): 329-354.

Brown MT and Ulgiati S. 2016. Emergy assessment of global renewable sources. Ecological Modelling, 339: 148-156. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2016.03.010

Campillo C, Fortes R, Prieto MDH and Babatunde EB. 2012. Solar radiation effect on crop production. Solar Radiation, 1(494): 167-194.

Chen CZ and Lin ZS. 2008. Multiple timescale analysis and factor analysis of energy ecological footprint growth in China 1953–2006. Energy Policy, 36(5): 1666-1678. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2007.11.033

Dorado MP, Cruz F, Palomar JM and Lopez FJ. 2006. An approach to the economics of two vegetable oil-based biofuels in Spain. Renewable Energy, 31(8): 1231-1237.

Enayat FF and Asgharipour MR. 2023. Exploring and predicting the biocapacity of various fish farming systems based on modified emergy footprint accounting in the Sistan region of Iran. Science of the Total Environment, 904: 166195. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166195

Enayat FF and Asgharipour MR. 2024. Towards more efficient fish farming systems in the Sistan region of Iran: An emergy-based analysis. Aquaculture, 578: 740106. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2023.740106

Enayat FF, Ghanbari SA, Asgharipour MR and 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

Fallahinejad S and Armin M. 2022. Role of mechanization on the sustainability of sugar beet production using emergy approach. Journal of Emergy, Life Cycle and System Analysis in Agriculture, 2(1): 15-24. https://doi.org/10.22034/aes.2022.327793.1019

Fang K, Heijungs R and De Snoo GR. 2014. Theoretical exploration for the combination of the ecological, energy, and carbon footprints: Overview of a footprint family. Ecological Indicators, 36: 508-518. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.08.017

Gafsi M, Legagneux B, Nguyen G and Robin P. 2006. Towards sustainable farming systems: Effectiveness and deficiency of the French procedure of sustainable agriculture. Agricultural Systems, 90(1-3): 226-242. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2006.01.002

Giljum S, Hammer M, Stocker A and Eisenmenger N. 2007. The ecological footprint as a sustainability indicator: Implications for sustainable development and resource management. Ecological Economics, 61(4): 625-637. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2006.09.011

Hajazi S, Rezaei M and Hosseini S. 1999. Research methods in behavioral sciences. Tehran: University of Tehran Press. (In Persian with English Abstract).

Li JX, Chen YN, Xu CC and Li Z. 2019. Evaluation and analysis of ecological security in arid areas of Central Asia based on the emergy ecological footprint (EEF) model. Journal of Cleaner Production, 235: 664-677. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.07.005

Nikouei A, Asgharipour MR and Marzban Z. 2022. Modeling land allocation to produce crops under economic and environmental goals in Iran: a multi-objective programming approach. Ecological Modelling, 471: 110062. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2022.110062

Odum HT and Peterson N. 1996. Simulation and evaluation with energy systems blocks. Ecological Modelling, 93(1-3): 155-173.

Peng W, Wang X, Li X and He C. 2018. Sustainability evaluation based on the emergy ecological footprint method: A case study of Qingdao, China, from 2004 to 2014. Ecological Indicators, 85: 1249-1261. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.12.020

Perez J. 2007. Sustainable agriculture: Ecological, economic, and social perspectives. Springer.

Shahhoseini HR and Kazemi H. 2022. Evaluation of sustainability of rainfed rapeseed production in Gorgan County using Emergy analysis. Journal of Emergy, Life Cycle and System Analysis in Agriculture, 2(1): 61-70. https://doi.org/10.22034/aes.2022.337172.1031

Shirdeli MR, Asgharipour MR, Ramroudi M, Ghanbari SA and Sirousmehr, A. 2025. Ecological security assessment of rice production systems in arid regions: a multi-criteria assessment of Iranshahr and Saravan, Iran. Scientific Reports, 15(1): 22919. https://doi.org/10.1038/s41598-025-06858-1

Snedecor GW and Cochran WG. 1980. Statistical Methods (7th ed.). Iowa State University Press.

Statistical Center of Iran. 2016. Results of the General Population and Housing Census 2016. Retrieved from [https://amar.org.ir/english]

Stöglehner G. 2003. Ecological footprint—a tool for assessing sustainable energy supplies. Journal of Cleaner Production, 11(3): 267-277. https://doi.org/10.1016/S0959-6526(02)00046-X

Tanakian, S., Asgharipour, M.R., Ghanbari, S.A., Ramroudi, M. and Marzban, Z., 2026. Ecological sustainability assessment of agricultural production systems in the Sistan region using emergy footprint analysis. Scientific Reports. https://doi.org/10.1038/s41598-026-49480-5

Wackernagel M, Schulz NB, Deumling D, Linares AC, Jenkins M, Kapos V, Monfreda C, Loh J, Myers N, Norgaard R and Randers J. 2002. Tracking the ecological overshoot of the human economy. Proceedings of the National Academy of Sciences, 99(14): 9266-9271. https://doi.org/10.1073/pnas.142033699

Yang Q, Liu G, Hao Y, Coscieme L, Zhang J, Jiang N, Casazza M and Giannetti BF. 2018. Quantitative analysis of the dynamic changes of ecological security in the provinces of China through emergy-ecological footprint hybrid indicators. Journal of Cleaner Production, 184: 678-695. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.271

Yang Y and Fan M. 2019. Analysis of the spatial-temporal differences and fairness of the regional energy ecological footprint of the Silk Road Economic Belt (China Section). Journal of Cleaner Production, 215: 1246-1261. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.170

Yao X, Chen W, Song Ch and Gao S. 2022. Sustainability and efficiency of water-land-energy-food nexus based on emergy-ecological footprint and data envelopment analysis: Case of an important agriculture and ecological region in Northeast China. Journal of Cleaner Production, 379: 134857. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134854

Zhang X, Xu L, Chen Y and Liu T. 2020. Emergy-based ecological footprint analysis of a wind farm in China. Ecological Indicators, 111: 106018 . https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.106018

Zhao Sh, Song K, Gui F, Cai H, Jin W and Wu Ch. 2013. The emergy ecological footprint for small fish farm in China. Ecological Indicators, 29: 62-67. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.12.009

Zhao S, Li Z and Li W. 2005. A modified method of ecological footprint calculation and its application. Ecological Modelling, 185(1): 65-75. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2004.11.016