دانش کشاورزی و تولید پایدار

Journal of Agricultural Science and Sustainable Production
Volume 36, Issue 2, 2026, Pages 291-304

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

Ecological Security Assessment of Wheat Production Systems by Emergy Footprint Technique in Iranshahr

Nosrat Keshtegar[1], Esmaeel Seyedabadi[2*], Ahmad Ghanbari[3], Mohamamd Reza Asgharipour[3], Mehdi Dahmardeh[3], Tohid Bagherpour[4]

Received: July 12, 2024	Accepted: February 24, 2025

1-PhD Candidate, Dept. of Agronomy, College of Agriculture, University of Zabol, Zabol, Iran
2-Assoc. Prof., Dept. of Agronomy, College of Agriculture, University of Zabol, Zabol, Iran
3-Prof., Dept. of Agronomy, College of Agriculture, University of Zabol, Zabol, Iran
4-Assist. Prof., Dept. of Agronomy, College of Agriculture, University of Zabol, Zabol, Iran
Corresponding Author E-mail: e.seyedabadi@uoz.ac.ir

Abstract

Background and Objectives: Wheat is one of the three major cereals that provide food and livelihoods for a large portion of the world's population. This has led to the maximization of inputs consumption in the management of wheat production systems with the aim of increasing efficiency and yield. Due to the importance of the impact of production system inputs on biological capacity and its effect on production sustainability, this study attempts to evaluate the sustainability of these systems using new techniques.

Materials and Methods: In this research, the emergy footprint method and its derived indicators were used to evaluate sustainability. This method has the ability to quantify the impact of human activities on the ecological resources of the production system and surrounding ecosystems. The data needed for this study were collected in the crop year 2021-2022 from various sources such as interviews with farmers and managers of wheat production systems in Iranshahr, as well as information from the meteorological department.

Results: After collecting and analyzing the data, the results demonstrated that the current management of production systems has led to a reduction in biological capacity (3.85E+07 global hectares in one cropping year) compared to the emergy footprint (8.12E+08 local hectares in one cropping year) in the target region. This has resulted in an ecological deficit (-7.73E+08 hectares) in wheat production systems in the region, jeopardizing the ecological security of the systems and their surroundings.

Conclusion: Considering that wheat production in Iranshahr is accompanied by an increasing ecological demand, judicious use of inputs to these systems can play a significant role in conserving ecological resources.

Keywords: Emergy Indexes, Environmental Impacts, Maximum Yield, Production Systems, Inputs

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

https://doi.org/10.22034/saps.2025.62471.3249

نشریه علمی پژوهشی دانش کشاورزی و تولید پایدار
جلد ۳۶، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۵، صفحات ۳۰۴-۲۹۱

دانش کشاورزی و تولید پایدار

ارزیابی امنیت اکولوژیک نظام‌های تولید گندم با استفاده از تکنیک ردپای امرژی در منطقه ایرانشهر

نصرت کشته گر[۱]، اسماعیل سیدآبادی[۲*]، احمد قنبری[۳]، محمدرضا اصغری پور[۳]، مهدی دهمرده[۳]، توحید باقر پور[۴]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۲۲	تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۰۶

۱-دانشجوی دکتری، گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زابل، زابل، ایران
۲-دانشیار، گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زابل، زابل، ایران
۳- استاد، گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زابل، زابل، ایران
۴- استادیار، گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زابل، زابل، ایران

چکیده

مقدمه و اهداف: گندم یکی از سه غله مهم در تأمین غذا و معیشت بسیاری از ساکنان زمین است. این موضوع موجب شده تا در مدیریت نظام‌های تولید گندم با هدف افزایش بهره‌وری و عملکرد، مصرف نهاده‌ها حداکثر گردد. به دلیل اهمیت تأثیر نهاده‌های نظام‌های تولیدی بر ظرفیت زیستی و اثر آن بر پایداری تولید، در این مطالعه سعی شده است پایداری این نظام‌ها با تکنیک‌های جدید مورد ارزیابی قرار گیرد.

مواد و روش‌ها: در این تحقیق، به‌منظور ارزیابی پایداری از روش ردپای امرژی و شاخص‌های برگرفته از آن استفاده شده است. این روش توانایی کمی‌کردن تأثیر فعالیت‌های انسان بر منابع اکولوژیک نظام تولیدی و اکوسیستم‌های اطراف را دارد. داده‌های موردنیاز برای این مطالعه در سال زراعی ۱۴۰۲-۱۴۰۱ از منابع مختلف مانند مصاحبه با کشاورزان و مدیران نظام‌های تولیدی در ایرانشهر و همچنین اطلاعات اداره هواشناسی گردآوری شد.

یافته‌ها: پس از جمع‌آوری و تحلیل داده‌ها، نتایج نشان داد که مدیریت نظام‌های تولیدی در حال حاضر موجب کاهش ظرفیت زیستی ($۳/۸۵\times۱۰^{۷}$ هکتار جهانی در یک سال زراعی) نسبت به ردپای امرژی ($۸/۱۲\times۱۰^{۸}$ هکتار محلی در یک سال زراعی) در منطقه هدف شد. این امر باعث شد تا نظام‌های تولید گندم در منطقه با کسری اکولوژیک ($-۷/۷۳\times۱۰^{۸}$ هکتار) مواجه باشند و امنیت اکولوژیک نظام‌ها و محیط اطراف آن‌ها به مخاطره بیفتد.

نتیجه‌گیری: باتوجه‌به اینکه تولید گندم در ایرانشهر با افزایش تقاضای اکولوژیک همراه بود، استفاده اصولی از نهاده‌ها می‌تواند در حفظ منابع اکولوژیک مؤثر باشد.

واژه های کلیدی: اثرات زیست‌محیطی، سامانه‌های تولیدی، شاخص‌های امرژی، عملکرد حداکثری ، نهاده‌های ورودی

مقدمه

کشاورزی به‌عنوان یکی از قدیمی‌ترین فعالیت‌های اقتصادی بشر، نقش حیاتی در تأمین امنیت غذایی و توسعه پایدار ایفا کرده است. بااین‌حال، منابع و نهاده‌های کشاورزی نظیر آب، خاک، انرژی و سرمایه، به دلایل مختلفی از جمله تغییرات اقلیمی، افزایش جمعیت،

بهره‌برداری بی‌رویه و محدودیت‌های طبیعی، در حال کاهش هستند (ژانگ و همکاران ۲۰۲۱). این محدودیت‌ها ضرورت مدیریت بهینه و پایدار منابع را بیش‌ازپیش آشکار ساخته است. در این راستا، مدیریت پایدار منابع کشاورزی نه‌تنها به حفظ محیط‌زیست کمک می‌کند، بلکه می‌تواند امنیت غذایی نسل‌های آینده را نیز تضمین نماید (میرشکاری و همکاران ۲۰۲۳).

شهرستان ایرانشهر از نظر موقعیت جغرافیایی در مرکز استان سیستان و بلوچستان ایران قرار دارد و منابع آبی مناسب (چاه، قنات، رودخانه) موجب رونق کشاورزی در این منطقه شده است. وجود عنصر حیاتی آب باعث شده تا کشاورزان از نظر انتخاب محصول، به‌شرط مناسب‌بودن با شرایط اقلیمی حاکم بر منطقه محدودیتی نداشته باشند. این شهرستان همچنین یکی از مناطقی است که نیاز بازارهای کشور را از نظر تأمین محصولات خارج از فصل برآورده می‌کند؛ بنابراین رونق کشاورزی در این منطقه علاوه بر اینکه در تأمین معاش فعالان مستقیم و غیرمستقیم این حوزه مؤثر است، نیازهای تغذیه‌ای مردم را نیز تأمین می‌کند. ازاین‌رو کشاورزان تلاش می‌کنند تا حداکثر عملکرد را از نظام تولیدی تحت مدیریت خود دریافت کنند که این موضوع خود نیازمند مدیریت بهینه نهاده‌ها در این سامانه‌ها است. باتوجه‌به تأثیر منفی برخی نهاده‌ها بر محیط و پایداری تولید (برخی از عواقب دریافت نهاده‌ها فرسایش خاک، آلودگی آب، کاهش حجم منابع آب و آلودگی هوا هستند)، آیا روند مدیریت نظام‌های کشاورزی در راستای پایداری و سلامت محیط است؟ برای پاسخ به این سؤال نیاز است تا پایداری نظام‌های تولیدی باتوجه‌به ورودی و خروجی این نظام‌ها و تأثیر آن‌ها بر محیط مورد بررسی قرار گیرد.

ارزیابی پایداری نظام‌های کشاورزی به‌عنوان ابزاری کارآمد، امکان سنجش و بهبود عملکرد سیستم‌های کشاورزی را فراهم می‌آورد. روش‌های متعددی برای ارزیابی پایداری کشاورزی وجود دارد که از جمله آنها می‌توان به روش‌های مبتنی بر شاخصه‌ای اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی اشاره کرد (اسمیت و همکاران ۲۰۲۰). این شاخص‌ها شامل بهره‌وری آب، حفظ سلامت خاک، کاهش مصرف نهاده‌های شیمیایی، افزایش درآمد کشاورزان و حفظ تنوع زیستی هستند. استفاده از این روش‌ها می‌تواند به شناسایی نقاط ضعف و قوت نظام‌های کشاورزی کمک کرده و راهکارهایی برای بهبود پایداری آنها ارائه دهد (گومز و سانچز همکاران ۲۰۱۰).

امرژی یک روش حسابداری زیست‌محیطی مبتنی بر انرژی است (ادوم ۱۹۹۶). مفهوم امرژی به‌عنوان انرژی موجود یک‌شکل که به طور مستقیم و غیرمستقیم برای تولید یک محصول یا ایجاد یک خدمت در یک سیستم انسانی یا طبیعی استفاده می‌شود تعریف شده است (ادوم ۱۹۹۶). همچنین این اصطلاح برای ارزیابی هزینه‌های واقعی زیست‌محیطی و انرژی فعالیت‌های مختلف انسانی و ارزیابی پایداری و کارایی آن فعالیت‌ها توسعه یافته است (دینگ و همکاران ۲۰۲۴). تجزیه‌وتحلیل امرژی می‌تواند به سیستم‌های انرژی پیچیده کمک کند تا منابع طبیعی محیطی و ورودی‌های انسانی را که ممکن است توسط سایر روش‌های ارزیابی نادیده گرفته شوند، در نظر بگیرند و به شناسایی مناطق بالقوه تأثیرات کلیدی در سیستم برای بهبود پایداری کمک کند (لی و همکاران ۲۰۲۳). امرژی با اختصاص ارزش صحیح به محصولات و خدمات اکولوژیکی و اقتصادی با تبدیل آن‌ها به معیار انرژی مشترک به مقایسه آن‌ها می‌پردازد (سو و همکاران ۲۰۲۱). این واحد مشترک امژول خورشیدی نام دارد که در واحدهای انرژی که قبلاً برای تولید محصول استفاده شده است بیان می‌شود (بروان و اولجیاتی ۲۰۰۴). این تکنیک همه محصولات را در معادل انرژی خورشیدی بیان می‌کند که مفهوم آن به این صورت است که اگر انرژی خورشید تنها ورودی باشد برای تولید یک محصول خاص چه مقدار انرژی مورد نیاز است (هاو و باکشی ۲۰۰۴).

باتوجه‌به اینکه تجزیه‌وتحلیل امرژی ثابت کرده است که یک ابزار مفید برای مطالعه نظام‌های کشاورزی با تمرکز بر بارهای اقتصادی و زیست‌محیطی است (کاوالت و همکاران ۲۰۰۶)، مطالعات بسیاری تاکنون با استفاده از این روش در بخش کشاورزی انجام شده که از آن

جمله می‌توان به ارزیابی پایداری نظام‌های تولید گندم در مناطق مختلف آب‌وهوایی چین (ژائو و همکاران ۲۰۱۹)، پایداری تولید گندم در ایران (فلاحی‌نژاد و همکاران ۲۰۲۲)، پایداری زیست‌محیطی تولید گوجه‌فرنگی در آرژانتین (پیاستریلینی و همکاران ۲۰۲۴)، پایداری تولید گندم و ذرت در اقلیم گرم جنوب غربی ایران (هوشیار و همکاران ۲۰۱۸)، تولید ذرت با هزینه امرژی پایین برای توسعه پایدار در چین (وانگ و همکاران ۲۰۲۱)، تحلیل امرژی تولید ذرت علوفه‌ای در دانمارک (قالی و همکاران ۲۰۱۸)، تحلیل امرژی تولید ذرت و هزینه‌های زیست‌محیطی آن در شمال غنا (موامبو و همکاران ۲۰۲۰)، ارزیابی پایدار تولید سبزیجات در چین (گوو و همکاران ۲۰۲۳)، مقایسه انواع سیستم‌های تولید خیار در چین (ژائو و همکاران ۲۰۱۹)، سبزیجات ارگانیک در ایتالیا (کریستیانو و همکاران ۲۰۲۱)، ارزیابی پایداری سه بستر تولید آبزیان در سیستان (فرتوت عنایت و همکاران ۲۰۲۳)، ارزیابی پایداری تولید انگور یاقوتی در سیستان (فرتوت عنایت و همکاران، ۱۴۰۲) اشاره کرد.

باوجوداینکه تکنیک امرژی جهت تحلیل پایداری به همه دریافتی‌های نظام‌های کشاورزی اهمیت می‌دهد، اما این روش ظرفیت محیط جهت حمایت از تولید را منعکس نمی‌کند. جهت رفع این نقص برای نخستین‌بار ژائو و همکاران (۲۰۰۵) با ترکیب این روش با ردپای اکولوژیک تکنیک جدیدی به نام ردپای امرژی معرفی کردند. ردپای امرژی رابطه بین فعالیت‌های انسانی و منابع طبیعی را کمی و به طور عینی‌تری استفاده از منابع منطقه‌ای و امنیت زیست‌محیطی را منعکس می‌کند (لیو و همکاران ۲۰۲۱). در ادامه به برخی از مطالعاتی که به ارزیابی پایداری و بررسی امنیت زیست‌محیطی نظام‌های هدف با استفاده از ردپای امرژی پرداخته‌اند اشاره می‌شود.

فرتوت عنایت و همکاران (۲۰۲۳) به ارزیابی پایداری اکولوژیک نظام‌های تولید انگور یاقوتی در منطقه سیستان پرداختند که نتایج حاکی از برجسته بودن نقش حمایتی محیط بود. این پژوهشگران اعلام کردند که نظام تولیدی دارای مازاد اکولوژیک است. در منطقه سیستان مطالعه دیگری به بررسی رابطه بین جریان‌های ورودی به نظام‌های پرورش ماهی در سه نوع استخر خاکی، بتنی و گالوانیزه و تأثیر آن بر امنیت اکولوژیک پرداخت. محققان به این نتیجه رسیدند که پرورش ماهی در استخرهای خاکی دارای مازاد اکولوژیک است و پیشنهاد دادند که مصرف بهینه نهاده‌ها در استخرهای بتنی و گالوانیزه موجب امنیت اکولوژیک آن‌ها می‌شود (فرتوت عنایت و اصغری‌پور ۲۰۲۳). همچنین تفاوت ۱۴ برابری ردپای امرژی نسبت به ظرفیت تحمل امرژی، ناپایداری مزرعه ماهی در چین را نشان داد (ژائو و همکاران ۲۰۱۳).

باتوجه‌به اهمیت نظام‌های تولید گندم در شهرستان ایرانشهر و مشاهدات اولیه مبنی بر تزریق بی‌رویه نهاده‌ها به این نظام‌ها با هدف دریافت عملکرد مطلوب توسط کشاورزان که موجب فشار بر محیط‌زیست می‌شوند، ضرورت بررسی پایداری این نظام‌ها احساس شد؛ لذا جریان‌های ورودی به این نظام‌ها و تأثیر آنها بر بوم نظام‌های محیطی و کشاورزی منطقه با استفاده از روش ردپای امرژی مورد بررسی قرار گرفته و ظرفیت زیستی و به دنبال آن پایداری این نظام‌ها تحلیل گردید. نتایج این مطالعه می‌تواند مورداستفاده کشاورزان و مدیران قرار گرفته و آنها را از امنیت اکولوژیک این نظام‌ها آگاه سازد.

مواد و روش‌ها

توصیف منطقه و نظام موردمطالعه

شهرستان ایرانشهر در بخش مرکزی بلوچستان ایران در محدوده جغرافیایی ۲۷ درجه و ۱۲ دقیقه عرض شمالی و ۶۰ درجه و ۴۱ دقیقه طول شرقی قرار دارد. کشت گندم در این منطقه معمولا از اواسط پاییز شروع می گردد. عملیات خاکورزی با استفاده از گاوآهن و دیسک انجام می شود. این ماشین‌آلات خاک سطحی را نرم، علف‌های هرز را حذف و زمین را تسطیح می‌کنند. کشت بذر معمولا توسط نیروی انسانی صورت می‌گیرد. آب مورد نیاز مزارع در طول فصل زراعی از طریق آب‌های سطحی و زیرزمینی تأمین می‌شود و کشاورزان جهت تغذیه گیاهان از کود نیتروژن استفاده می‌کنند. محصول در اواسط بهار به مرحله برداشت می‌رسد و

این عملیات (برداشت) توسط ماشین‌آلات و نیروی انسانی صورت می‌گیرد.

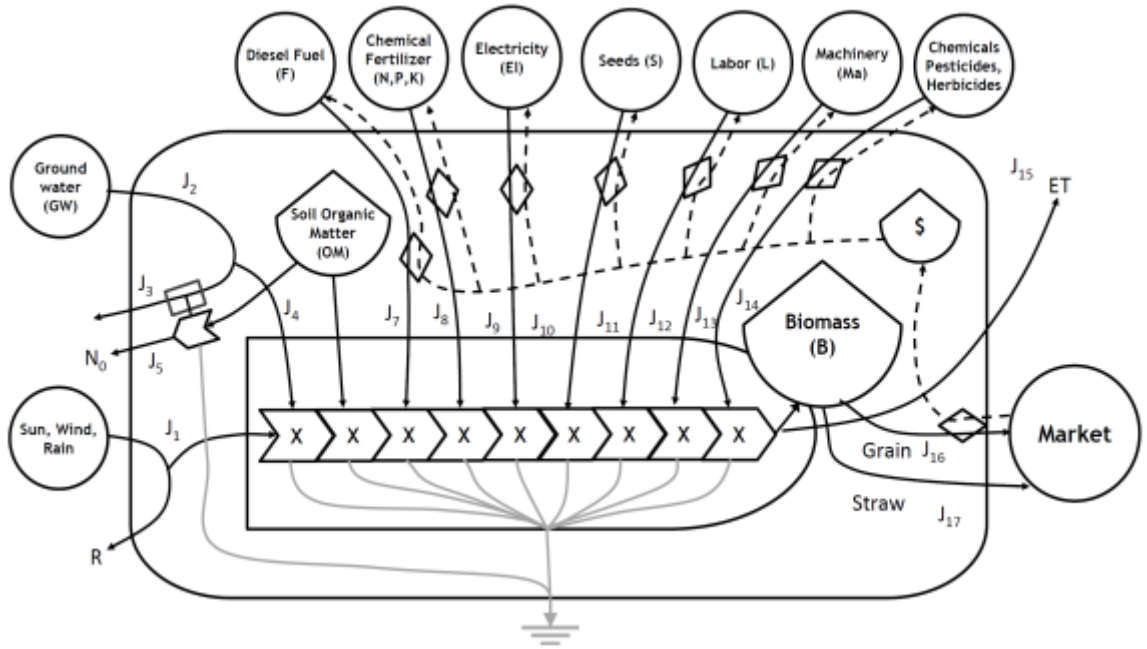
جامعه آماری و جمع‌آوری داده‌ها

جهت مطالعه حاضر داده‌های مختلفی استفاده شدند. بخشی از داده‌های موردنیاز پس از طراحی پرسش‌نامه‌ای دقیق از طریق مصاحبه حضوری با کشاورزان گندم‌کار ایرانشهری به دست آمد. بخشی دیگر از طریق اطلاعات ثبت شده در ایستگاه‌های هواشناسی به دست آمد. همچنین با مراجعه به اداره جهاد کشاورزی منطقه و مصاحبه با کارشناسان این سازمان جهت تکمیل اطلاعات مفید بود. مجموع اطلاعات گردآوری شده مربوط به سال زراعی (اواسط پاییز تا میانه بهار) ۱۴۰۲-۱۴۰۱ می‌باشد.

به‌منظور مشخص‌شدن جامعه آماری موردمطالعه، تعداد مزارع گندم موجود در منطقه به‌عنوان نمونه کل انتخاب شدند. جهت تعیین حجم نمونه از فرمول کوکران استفاده گردید که معادل ۲۳۰ بدست آمد (کوکران ۱۹۴۲).

تحلیل امرژی

تحلیل امرژی از چند مرحله تشکیل شده است، در مرحله اول مرزهای زمانی و مکانی برای نظام هدف مطالعه مشخص می‌شود. در مطالعه حاضر مرز زمانی سال زراعی ۱۴۰۲-۱۴۰۱ مشخص شد و مرز مکانی دروازه مزارع گندم شهرستان ایرانشهر بود. پس از مشخص‌شدن مرزهای زمانی و مکانی نمودار زبان سیستم‌های انرژی (ESL) که ویژگی‌های شبکه‌ای نظام هدف را نشان می‌دهد ترسیم می‌شود (شکل ۱) (کاوالت و همکاران ۲۰۰۶ و بروان و اولجیاتی ۲۰۰۴). این نمودار به سازماندهی انواع ورودی‌ها به نظام تولیدی در جدول ارزیابی امرژی (جدول ۱) کمک می‌کند (کاولت و همکاران ۲۰۰۶).



شکل ۱- دیاگرام جریان امرژی در نظام‌های تولید گندم

باتوجه‌به اینکه نظام کشاورزی علاوه بر ورودی‌هایی مانند ماشین‌آلات، کود، سموم و آب، نهاده‌هایی چون باد، باران و نیروی انسانی را نیز دریافت می‌کند و این منابع (نهاده‌های اقتصادی و محیطی) توسط واحدهای مختلفی (g، m^3، J و h) شناخته می‌شوند، بنابراین جهت بررسی پایداری آن‌ها باید همه این واحدها به یک مبنای مشترک ترجمه شوند. تحلیل امرژی روشی است که قادر به انجام این کار است.

جدول ۱- مجموع وروی‌ها به نظام‌های تولید گندم در ایرانشهر

ورودی	واحد	داده‌های خام تولید گندم در یک هکتار	ضریب تبدیل	منابع	امرژی یک هکتار تولید گندم	امرژی ورودی به مجموع سطح زیر کشت
ورودی‌های محیطی تجدیدپذیر						
انرژی خورشید	J	۱/۹۶×۱۰^{۱۳}	۱/۰۰×۱۰^{۰}	تعریف	۱/۹۶×۱۰^{۱۳}	۸/۸۲×۱۰^{۱۶}
انرژی جنبشی باد	J	۴/۵۲×۱۰^{۹}	۱/۲۵×۱۰^{۳}	(کمپل و اربان ۲۰۱۷)	۵/۶۵×۱۰^{۱۲}	۲/۵۴×۱۰^{۱۶}
انرژی شیمیایی باران	J	۱/۲۳×۱۰^{۹}	۲/۲۵×۱۰^{۴}	(کمپل و همکاران ۲۰۰۵)	۲/۷۷×۱۰^{۱۳}	۱/۲۵×۱۰^{۱۶}
انرژی ژئو پتانسیل باران	J	۲/۵۰۶×۱۰^{۶}	۱/۳۴×۱۰^{۴}	(کمپل و همکاران ۲۰۰۵)	۳/۳۶×۱۰^{۱۰}	۱/۵۱×۱۰^{۱۴}
آب رودخانه	J	۵/۷۹×۱۰^{۹}	۳/۶۱×۱۰^{۴}		۲/۰۹×۱۰^{۱۴}	۹/۴۱×۱۰^{۱۷}
کل زیرمجموعه ورودی‌های محیطی تجدیدناپذیر					۲/۰۹×۱۰^{۱۴}	۹/۴۱×۱۰^{۱۷}
آب زیرزمینی	J	۲/۲۹×۱۰^{۱۰}	۳/۶۱×۱۰^{۴}	(کوادرا و رایدبرگ ۲۰۰۶)	۸/۲۷×۱۰^{۱۴}	۳/۷۲×۱۰^{۱۸}
فرسایش خاک	g	۲/۵۰×۱۰^{۷}	۱/۲۷×۱۰^{۹}	(براون و باردی ۲۰۰۱)	۳/۱۸×۱۰^{۱۶}	۱/۴۳×۱۰^{۲۰}
کل زیرمجموعه ورودی‌های اقتصادی					۳/۲۶×۱۰^{۱۶}	۱/۴۷×۱۰^{۲۰}
نیروی انسانی	J	۱/۷۱×۱۰^{۸}	۲/۲۲×۱۰^{۶}	(لو و همکاران ۲۰۰۹)	۳/۸۰×۱۰^{۱۴}	۱/۷۱×۱۰^{۱۸}
ماشین‌آلات	g	۵/۱۷×۱۰^{۵}	۱/۰۱×۱۰^{۱۰}	(کمپل و همکاران ۲۰۰۵)	۵/۲۲×۱۰^{۱۵}	۲/۳۵×۱۰^{۱۹}
سوخت	g	۱/۸۱×۱۰^{۵}	۸/۶۰×۱۰^{۴}	(باستیانونی و همکاران ۲۰۰۹)	۱/۵۶×۱۰^{۱۰}	۷/۰۰×۱۰^{۱۳}
کود نیتروژن	g	۱/۵۰×۱۰^{۵}	۳/۰۹×۱۰^{۱۰}	(برنت-ویلیامز ۲۰۰۲)	۴/۶۴×۱۰^{۱۵}	۲/۰۹×۱۰^{۱۹}
الکتریسیته	J	۲/۲۹×۱۰^{۸}	۲/۳۱×۱۰^{۵}	(امیری و همکاران ۲۰۱۹)	۵/۹۸×۱۰^{۱۳}	۲/۶۹×۱۰^{۱۷}
بذر	sej	۹/۰۰×۱۰^{۶}	۶/۷۶×۱۰^{۷}	(اصغری‌پور و همکاران ۲۰۲۰)	۶/۰۸×۱۰^{۱۴}	۲/۷۴×۱۰^{۱۸}
کل زیرمجموعه مجموع خروجی					۱/۰۹×۱۰^{۱۶}	۴/۹۱×۱۰^{۱۹}
					۴/۳۷×۱۰^{۱۶}	۱/۹۷×۱۰^{۲۰}
عملکرد اقتصادی (دانه گندم)	g	۴/۵۰×۱۰^{۶}				
عملکرد اقتصادی (دانه گندم)	J	۶/۶۱×۱۰^{۱۰}				
عملکرد اقتصادی (دانه گندم)	kg	۴/۵۰×۱۰^{۳}				
عملکرد اقتصادی (کاه گندم)	g	۶/۰۰×۱۰^{۵}				
عملکرد اقتصادی (کاه گندم)	J	۷/۵۰×۱۰^{۹}				
عملکرد اقتصادی (کاه گندم)	kg	۶/۰۰×۱۰^{۲}				

جریان‌های ورودی به نظام‌های تولیدی به گروه‌های محیطی (تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر) و اقتصادی (تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر) تقسیم می‌شوند. نهاده‌های تجدیدپذیر محیطی که در این مطالعه مورد توجه قرار گرفته‌اند در جدول ۱ ارائه شده‌اند. منبع جمع‌آوری این نهاده‌ها به‌جز انرژی آب رودخانه داده‌های جوی ثبت شده در ایستگاه‌های هواشناسی هستند. فرسایش خاک و آب زیرزمینی دو نهاده محیطی تجدیدناپذیر هستند که در این مطالعه به بررسی میزان تأثیر آن‌ها در نظام‌های تولید گندم ایرانشهر پرداخته شد. فرسایش خاک توسط مدل جهانی فرسایش خاک (USLE[1]) اندازه‌گیری و مقدار مصرف آب زیرزمین، آب رودخانه و سایر نهاده‌های حاصل از اقتصاد انسانی از طریق مصاحبه حضوری با گندمکاران منطقه مشخص گردید. میزان ورودی ماشین‌آلات نیز بر اساس ساعت کار و طول عمر پیش‌بینی‌شده آن‌ها (۲۵ سال) استخراج شد. همچنین مقدار انرژی خروجی، به‌عنوان کالری قابل سوختن با استفاده از روش ارائه شده در ISO1928 تعریف شد (دورادو و همکاران ۲۰۰۶). پس از مشخص‌شدن مقدار مصرف هر یک از نهاده‌ها این ورودی‌ها با استفاده از ضرایب تبدیل مناسب به واحد مشترک امژول خورشیدی تبدیل می‌شوند.

پس از تحلیل امرژی هر یک از نهاده‌های ورودی به نظام‌های تولیدی، نتایج حاصل در روابط مربوط به ردپای امرژی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

ردپای امرژی

ردپای امرژی یک ابزار ارزیابی امنیت اکولوژیکی مهم برای اندازه‌گیری شدت اثرات زیست‌محیطی فعالیت‌های انسانی از نظر عرضه و تقاضا است (ژائو و همکاران ۲۰۰۵).

ظرفیت زیستی امرژی[2] (ECC)

ظرفیت زیستی امرژی به منابع تجدیدپذیر بوم نظام اشاره دارد که از بقا و توسعه همه موجودات حمایت می‌کند (ادوم ۱۹۸۶). برای محاسبه ظرفیت زیستی امرژی (ECC) نیاز است تا مجموع امرژی نهاده‌های محیطی تجدیدپذیر ورودی (R) که با واحد امژول خورشیدی در منطقه در طول سال زراعی شناخته می‌شود و چگالی امرژی جهانی سالانه (P_1) با واحد امژول خورشیدی در مترمربع در سال را در اختیار داشته باشیم.

$$ECC = (1\text{-}12\%) \times R/P_1 \qquad \text{(رابطه ۱)}$$

چگالی امرژی جهانی از تقسیم مجموع امرژی ورودی به زمین ($\sum E_e$) که شامل انرژی تابش خورشیدی، انرژی زمین گرمایی و امواج است (براون و همکاران ۲۰۱۶، براون و اولجیاتی ۲۰۱۶ و کمپل و همکاران ۲۰۱۶) بر مساحت زمین (A_e) محاسبه می‌شود. رابطه ۲ این مفهوم را نشان می دهد:

(رابطه ۲)

$$P_1 = \frac{\sum E_e}{A_e} = \frac{1.20E{+}25 \text{ sej}}{5.1E{+}14 m^2} = 2.35E + 10 sej\ m^{-2}$$

برای محاسبه این شاخص (ECC)، به پیشنهاد کمیسیون جهانی محیط‌زیست و توسعه، ۱۲ درصد با هدف حفاظت از تنوع زیستی کنار گذاشته می‌شود (یانگ و همکاران ۲۰۱۶، پن و همکاران ۲۰۱۸ و ژانگ و همکاران ۲۰۲۰).

بر اساس نظریه امرژی R شامل مجموع امرژی نور خورشید، امرژی چرخه زمین و حداکثر امرژی تجدیدپذیر محیطی می‌باشد.

بار زیست‌محیطی امرژی[3] (EEB)

مدیریت فشرده نظام‌های تولید محصولات کشاورزی موجب هدررفت شدید نهاده‌های محیطی تجدیدناپذیر می‌شود. جهت درک میزان تلفات این نهاده‌ها در طول سال زراعی از شاخص بار زیست‌محیطی امرژی استفاده

[1] Universal Soil Loss Equation
[2] Emergy Carrying Capacity
[3] Emergy Environmental Burden

می‌شود (فرتوت عنایت و همکاران ۲۰۲۳). برای محاسبه این شاخص با واحد هکتار جهانی از رابطه ۳ استفاده می‌شود.

$$EEB= N/P_1 \quad \text{(رابطه ۳)}$$

ردپای اکولوژیک امرژی[4] (EEF)

ردپای اکولوژیک امرژی حاصل تقسیم مجموع امرژی ورودی‌های اقتصادی به نظام هدف مطالعه در طول سال زراعی (E_W) بر چگالی امرژی منطقه‌ای (P_2) است.

$$EEF = E_w/P_2 \quad \text{(رابطه ۴)}$$

چگالی امرژی منطقه‌ای با واحد امژول خورشیدی در مترمربع در سال از طریق رابطه زیر محاسبه می‌شود که در آن $\sum E_i$ مجموع امرژی ورودی به منطقه مورد مطالعه (شهرستان ایرانشهر) و A_i مساحت آن منطقه می باشد.

$$P_2 = \frac{\sum E_i}{A_i} = \frac{1.82408E{+}21\ sej}{3.02E{+}10\ m^2} = 6.04E+10 sej\ m^{-2} \quad \text{(رابطه ۵)}$$

برای جلوگیری از ارزیابی مضاعف، مجموع منابع تجدیدپذیر معادل با بزرگ‌ترین ورودی امرژی از منابع تجدیدپذیر در نظر گرفته شد.

شاخص‌های مبتنی بر ردپای اکولوژیک امرژی

علاوه بر شاخص‌های اصلی که پیش‌تر به آن‌ها اشاره شد، سه شاخص دیگر نیز برای تعیین ظرفیت و فشار اکولوژیک مورد محاسبه قرار می‌گیرد. این شاخص‌ها شامل کسری/مازاد اکولوژیک امرژی[5] (EED/EES)، شاخص فشار اکولوژیکی[6] (EPI) و شدت ردپای اکولوژیک[7] (EFI) می‌باشند. روابط ریاضی جهت محاسبه این شاخص‌ها در جدول ۲ ارائه شده‌اند.

شاخص کسری/مازاد اکولوژیک، ظرفیت زیستی امرژی است که ردپای امرژی از آن کسر می‌شود. لذا نتیجه مثبت حاصل از این رابطه حاکی از مازاد اکولوژیک امرژی است و نتیجه منفی کسری اکولوژیک امرژی را نشان می‌دهد و مشخص می‌کند که تقاضای انسان در بوم نظام از ظرفیت اکولوژیک بیشتر است (لیو و همکاران ۲۰۲۲). شاخص فشار اکولوژیک نیز وضعیت مصرف منابع اکولوژیک را در یک نظام تولیدی نشان می‌دهد (یاو و همکاران ۲۰۲۳). همچنین شاخص شاخص شدت ردپای اکولوژیک برای تجزیه‌وتحلیل سود و زیان زیست‌محیطی در نظر گرفته می‌شود به‌گونه‌ای که می‌توان با کمک این شاخص وضعیت تحمل و توانایی توسعه پایدار بوم نظام تولیدی را اندازه‌گیری کرد. درصورتی‌که مقدار EFI، کمتر، برابر یا بیشتر از ۱ شود به این معنی است که نظام به ترتیب دارای مازاد، تعادل و کسری اکولوژیک است به عبارت دیگر برای اکوسیستم‌های اطراف به ترتیب بی خطر، در تعادل اکولوژیک و تنش‌زا است (زی و همکاران ۲۰۲۲).

جدول ۲- روابط ریاضی شاخص‌های وابسته به ردپای امرژی

شاخص‌ها	فرمول
کسری/مازاد اکولوژیک امرژی	EED/EES= ECC-EEF
شاخص فشار اکولوژیک	EPI = EEF / ECC+EEF
شدت ردپای اکولوژیک	EFI = EEF / ECC

نتایج و بحث

ظرفیت زیستی امرژی (ECC)

در بررسی نهاده ها مشخص شد که انرژی خورشید، انرژی جنبشی باد، انرژی شیمیایی آب باران، انرژی ژئو پتانسیل آب باران و آب رودخانه نهاده‌های محیطی تجدیدپذیر ورودی به مزارع گندم ایرانشهر هستند. به‌منظور جلوگیری از ارزیابی مضاعف، نهاده با بیشترین امرژی ورودی که در نظام‌های تولیدی هدف، آب

[4] Emergy Ecological Footprint
[5] Emergy Ecological Deficit/Surplus
[6] Ecological Pressure Index
[7] Ecological Footprint Intensity

رودخانه ($۹/۴۱\times۱۰^{۱۷}$ امژول خورشیدی در مجموع سطح زیر کشت) است، به همراه انرژی خورشید و انرژی چرخه زمین برای محاسبه ظرفیت زیستی مورد استفاده قرار گرفت. پس از محاسبات انجام شده، ظرفیت زیستی امرژی برای سامانه‌های تولید گندم ایرانشهر $۳/۸۵\times۱۰^{۷}$ هکتار جهانی در یک سال زراعی برآورد شد. پژوهشگران ECC را برای گندم در منطقه سیستان استان سیستان و بلوچستان به مقدار $۱/۸۶\times۱۰^{۱۰}$ هکتار جهانی در یک سال زراعی برآورد کردند (فرتوت عنایت و همکاران، ۱۴۰۱). با مقایسه این دو مقدار مشخص می‌شود که این شاخص در منطقه ایرانشهر به‌مراتب کمتر از منطقه سیستان است.

در تحقیقی دیگر مساحت اکولوژیکی که از تولید انگور یاقوتی در سیستان حمایت می‌کند به‌عنوان ظرفیت زیستی مورد بررسی قرار گرفت و مقدار آن $۳/۹۳\times۱۰^{۸}$ هکتار جهانی گزارش شد (فرتوت عنایت و همکاران ۲۰۲۳). همچنین عدل و همکاران (۱۴۰۲) نیز به ارزیابی پایداری نظام‌های تولید موز، انبه، پاپایا و گواوا در بلوچستان ایران پرداختند. نتایج مطالعه آنها نشان داد که بیشترین ظرفیت زیستی از میان نظام‌های تولید موز مربوط به شهرستان دشتیاری ($۷/۴۴\times۱۰^{۷}$ هکتار جهانی در سال)، تولید انبه در قصرقند ($۲/۵۴\times۱۰^{۷}$ هکتار جهانی در سال)، پاپایا در سرباز ($۱/۷۳\times۱۰^{۵}$ هکتار جهانی در سال) و گواوا در دشتیاری ($۳/۱۰\times۱۰^{۶}$ هکتار جهانی در سال) بود.

بار زیست‌محیطی امرژی (EEB)

این شاخص که با واحد هکتار جهانی بیان می‌گردد، میزان تلفات نهاده‌های محیطی تجدیدناپذیر را به‌خوبی نشان می‌دهد (فرتوت عنایت و همکاران ۲۰۲۳). مقدار بار زیست‌محیطی در مطالعه حاضر $۶/۲۵\times۱۰^{۹}$ هکتار جهانی در سال است، این عدد از تقسیم چگالی امرژی جهانی بر نهاده‌های محیطی تجدیدناپذیر مورد استفاده در طول دوره رشد محصول بدست آمد. فرسایش خاک مهم‌ترین تأثیر را در نتیجه حاصل داشت. بنابراین تغییر شیوه‌های آبیاری و خاک‌ورزی به همراه حفظ بقایا در خاک می‌تواند نقش مهمی در کاهش بار زیست‌محیطی امرژی داشته باشد.

پژوهشگران مقدار بار زیست‌محیطی امرژی برای پرورش ماهی در استخرهای خاکی، بتنی و گالوانیزه منطقه سیستان را به ترتیب $۸/۸۰\times۱۰^{۷}$، $۱/۰۲\times۱۰^{۷}$ و $۶/۶۸\times۱۰^{۵}$ هکتار جهانی در یک دوره پرورش (فرتوت عنایت و اصغری‌پور ۲۰۲۳) و مقدار این شاخص را برای تولید انگور یاقوتی $۱/۳۵\times۱۰^{۹}$ هکتار جهانی در سال (فرتوت عنایت و همکاران ۲۰۲۳) محاسبه کردند.

ردپای اکولوژیک امرژی (EEF)

ردپای امرژی منعکس‌کننده تأثیر فعالیت‌های انسانی بر محیط (محیط با قابلیت تولید) است (لیو و همکاران ۲۰۲۲). همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد برای محاسبه ردپای امرژی نیاز است تا به مجموع امرژی ورودی‌های اقتصادی به نظام تولیدی دسترسی داشته باشیم که این ورودی‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. پس از قرار دادن نتیجه حاصل در رابطه ۵، مشخص شد که مصرف این نهاده‌ها در نظام تولید گندم موجب ایجاد ردپایی برابر با $۸/۱۲\times۱۰^{۸}$ هکتار محلی در یک سال زراعی است. از میان مجموع ورودی‌ها به نظام تولیدی، ماشین‌آلات که جهت آماده‌سازی بستر (شخم) برای یک کشت مطلوب و برداشت محصول مورد استفاده قرار می‌گیرند، بیشترین نقش را در ردپای محاسبه شده داشت. عملیات شخم درصورتی‌که به‌صورت فشرده انجام شود، موجب کاهش کیفیت خاک می‌شود. چراکه به دلیل نبود پوشش گیاهی، مواد آلی خاک کاهش پیدا می‌کند و خاک در اثر تردد ماشین‌آلات فشرده می‌شود (نصیری محلاتی و همکاران، ۱۳۹۲). عدم استفاده از ماشین‌آلات فرسوده و استفاده از ماشین‌آلات جدید با وزن کم می‌تواند خسارات وارده را کاهش دهد. پس از ماشین‌آلات، ردپای ایجاد شده متأثر از کود نیتروژن و بذر مصرفی در مزارع گندم بود (جدول ۱).

این شاخص برای تولید گندم در منطقه سیستان $۷/۹۱\times۱۰^{۹}$ هکتار محلی محاسبه شد (فرتوت عنایت و همکاران، ۱۴۰۱). نظام‌های پرورش ماهی در بسترهای

خاکی، بتنی و گالوانیزه در منطقه سیستان به ترتیب ۳/۷۵×۱۰^۵، ۲/۰۴۹×۱۰^۶ و ۵/۰۳×۱۰^۴ هکتار محلی در یک دوره پرورش ردپای برجای گذاشتند (فرتوت عنایت و اصغری پور ۲۰۲۳). مقدار این شاخص برای نظام‌های تولید انگور یاقوتی در منطقه سیستان ۱/۱۲۵×۱۰^۸ هکتار محلی در یک سال محاسبه شد (فرتوت عنایت و همکاران ۲۰۲۳) همچنین ردپای امرژی طی سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۲ برای ۹ محصول مهم ایران در ۳۰ استان کشور ۱/۲۷ هکتار به ازای هر نفر گزارش شد (مختاری و همکاران ۱۳۹۵).

شاخص‌های ارزیابی امنیت اکولوژیک

در جدول ۳ سه مقادیر شاخص های کسری/مازاد اکولوژیک امرژی، فشار اکولوژیکی و شدت ردپای اکولوژیکی که امنیت اکولوژیک در منطقه هدف را ارزیابی می کنند، ارائه شده است.

جدول ۳- شاخص‌های وابسته به ردپای امرژی

شاخص‌ها	نماد	گندم
کسری/مازاد اکولوژیک امرژی	EED/EES	- ۷/۷۳×۱۰^۸
شاخص فشار اکولوژیک	EPI	/۹۲۲۲۰۳۳ ۰
شدت ردپای اکولوژیک	EFI	۲/۰۹۰۹۰۹ ۱

شاخص کسری/مازاد اکولوژیک امرژی (EED/EES)

مقدار این شاخص برای نظام‌های تولید گندم در ایرانشهر ۷/۷۳×۱۰^۸- محاسبه شد. علت منفی بودن این شاخص، بزرگ‌تر بودن ردپای اکولوژیک از ظرفیت زیستی امرژی در این نظام‌ها بود. به عبارتی وابستگی نظام‌های تولیدی به نهاده‌های خریداری شده (اقتصادی) موجب شد تا عرضه از تقاضای اکولوژیک در این سامانه‌ها بالاتر شود. نظام‌های تولید موز، انبه، پاپایا و گواوای بلوچستان (عدل و همکاران، ۱۴۰۲) و پرورش ماهی در استخرهای بتنی و گالوانیزه منطقه سیستان (فرتوت عنایت و اصغری‌پور ۲۰۲۳) نیز به همین دلایل با کسری اکولوژیک مواجه شدند. عکس این حالت برای تولید انگور یاقوتی در منطقه سیستان اتفاق افتاد و وابستگی بیشتر این نظام‌ها به نهاده‌های محیطی موجب شد تا این نظام‌ها دارای مازاد اکولوژیک باشند (فرتوت عنایت و همکاران ۲۰۲۳).

شاخص فشار اکولوژیکی (EPI)

مقدار این شاخص برای مزارع گندم در منطقه موردنظر ۰/۹۲۲۲۰۳۳ محاسبه شد؛ بنابراین باتوجه‌به توصیفی که پژوهشگران برای نتیجه حاصل از این شاخص ارائه داده‌اند (۰/۵>EPI >۰، ظرفیت محیط بالاتر از مصرف منابع است، ۱>EPI > ۰/۵، مصرف منابع بالاتر از ظرفیت محیط است و EPI = ۰/۵ مصرف منابع و ظرفیت اکولوژیک در تعادل با هم هستند (پنگ و همکاران ۲۰۱۸)، تولید گندم در ایرانشهر موجب تحمیل فشار بر منابع اکولوژیک می‌شود. این در حالی است که گندم در سیستان با حداقل (۰/۲۹۸) تأثیر بر منابع اکولوژیک تولید می‌شود (فرتوت عنایت و همکاران، ۱۴۰۲). اما پرورش ماهی در استخرهای بتنی (۰/۹۸) و گالوانیزه (۰/۷۶۹) این منطقه با تحمیل فشار بر محیط اکولوژیک صورت می‌گیرد. همچنین مقدار EPI محاسبه شده برای تولید موز، انبه، پاپایا و گواوا (برای همه نظام‌ها بین ۰/۹۸۵ تا ۱ برآورد شد) در بلوچستان ایران نیز حاکی از تنش وارده به منابع اکولوژیک در جریان تولید این محصولات دارد (عدل و همکاران، ۱۴۰۲).

شدت ردپای اکولوژیک (EFI)

مقدار EFI برای مطالعه حاضر ۲۱/۰۹۰۹۰۹ محاسبه شد. باتوجه‌به اینکه عدد برآورد شده بزرگتر از ۱ است بنابراین تولید گندم در ایرانشهر موجب تحمیل تنش به اکوسیستم‌های اطراف می‌شود. به عبارتی این نظام‌ها که ردپای امرژی آن‌ها بالا است، از نظر اکولوژیک ایمن نیستند و محیط اطراف را به مخاطره می‌اندازند، مانند آنچه در پرورش ماهی در استخرهای بتنی و گالوانیزه منطقه سیستان رخ داد. پژوهشگران مقدار EFI را برای این نظام‌ها به ترتیب برابر ۵۱/۶۱ و ۳/۳۳ گزارش دادند. بر خلاف پرورش ماهی در استخرهای بتنی و گالوانیزه، پرورش این محصول در بسترهای خاکی با شدت ردپای اکولوژیک ۰/۸۶۸ (فرتوت عنایت و اصغری پور ۲۰۲۳) و تولید انگور یاقوتی با EFI، ۰/۲۸۶۲۶ (فرتوت عنایت و همکاران ۲۰۲۳) در منطقه سیستان حاکی از ظرفیت زیستی بالای این نظام‌ها بود که تنشی بر محیط اطراف تحمیل نکردند.

نتیجه‌گیری

گندم به دلیل اینکه ماده اولیه بسیاری از صنایع به‌ویژه صنایع غذایی است، دنیا آن را به‌عنوان یک محصول استراتژیک می‌شناسد. ازاین‌رو پایداری تولید این محصول جهت تأمین امنیت غذایی در جهان امری ضروری است. پایداری این سامانه‌های تولیدی به عوامل مختلفی وابسته است. مدیریت مناسب با حداقل تقاضای اکولوژیک یکی از عوامل پایداری نظام‌های تولیدی است؛ بنابراین کمی‌کردن پایداری جهت اعمال مدیریت مناسب می‌تواند بر دوام تولید این نظام‌ها مؤثر باشد. ردپای امرژی که قادر است میزان تنش تحمیلی به منابع اکولوژیک را مورد بررسی قرار دهد تکنیک مناسبی برای رسیدن به این هدف است.

ظرفیت زیستی امرژی در نظام‌های تولید گندم ایرانشهر $۳/۸۵\times۱۰^{۷}$ هکتار جهانی در یک سال زراعی محاسبه شد. همچنین این نظام‌ها در طول سال زراعی $۸/۱۲\times۱۰^{۸}$ هکتار محلی ردپای امرژی برجای گذاشتند. نتیجه بالاتر بودن ردپای امرژی از ظرفیت زیستی امرژی کسری اکولوژیک به اندازه $۳/۸۵\times۱۰^{۷}$ در یک دوره رشد در نظام‌های هدف است. همچنین این عامل (بزرگ‌تر بودن ردپای از ظرفیت زیستی) موجب افزایش تقاضای اکولوژیک نظام تولیدی می‌شود که نتیجه آن تحمیل تنش به محیط اطراف است. علاوه بر مواردی که ذکر شد تولید گندم در ایرانشهر موجب هدررفت مساحت زیادی ($۶/۲۵\times۱۰^{۹}$ هکتار جهانی در سال) از خاک حاصلخیز می‌شود؛ بنابراین تغییر مدیریت نظام‌های تولید گندم ایرانشهر به‌صورت تغییر در شیوه‌های خاک‌ورزی و آبیاری موجب کاهش هدررفت این دو نهاده مهم تولیدی و به دنبال آن کاهش هزینه‌های اکولوژیک می‌شود. همچنین کودهای شیمیایی از عوامل تاثیرگذار بر کاهش ایمنی تولید و ظرفیت زیستی بودند. بنابراین تنظیم رژیم کودی خاک براساس نتایج آزمون خاک و استفاده از آن در زمان و مکان مناسب الزامی است. در کنار این راهکارها، به روزرسانی ماشین آلات موجب کاهش مصرف سوخت و کاهش فشردگی و فرسایش خاک نیز می‌شود و می تواند مفید واقع شود.

سپاسگزاری

این مقاله در قالب رساله دکتری تخصصی و با حمایت های مالی دانشگاه زابل (کد پژوهانه IR-UOZ-GR-6280) انجام شده است. نویسندگان بدین وسیله از آن تقدیر می نمایند.

منابع مورد استفاده

Adl M, Asgharipour MR, Ramroudi M, Ghanbari A and Seyedabadi A. 2024. Evaluating the sustainability and economic efficiency of banana, mango, papaya and guava production systems in Balochistan and determining their fair sales price. Ph.D. Thesis. School of Agriculture. University of Zabol. (In Persian with English Abstract).

Amiri Z, Asgharipour MR, Campbell DE and 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

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

Bastianoni S, Pulselli FM, Castellini C, Granai C, Dal Bosco A and Brunetti M. 2009. Emergy evaluation and the management of systems towards sustainability: A response to Sholto Maud. Agriculture, Ecosystem and Environment, 120: 472–474. doi:10.1016/j.agee.2006.08.010

Brandt-Williams S.L. 2002. Handbook of emergy evaluation: a compendium of data for emergy computation issued in a series of Folios. Center for Environmental Policy Environmental Engineering Science. University of Floriga, Gainesville.

Brown MT and Bardi E. 2001. Handbook of emergy evaluation. A compendium of data for emergy computation issued in a series of folios Folio, 3.

Brown MT and Ulgiati S. 2004. Energy quality, emergy, and transformity: H.T. Odum's contributions to quantifying and understanding systems. Ecological Modelling, 178: 201-213. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2004.03.002

Campbell DE and Erban L. 2016. A reexamination of the emergy input to a system from the wind. In: Brown, M. T., Sweeney, S., Campbell, D.E., Huang, S., Rydberg, T., Ulgiati, S. (Eds.), Proceedings of the Ninth Biennial Emergy Research Conference, pp. 13–19 Gainesville.

Campbell DE, Brandt-Williams SL and Meisch MEA. 2005. Environmental Accounting Using Emergy: Evaluation of the State of West Virginia. EPA/600/R-02/ 011. USEPA, Office of Research and Development, Washington, DC, pp. 116

Cavalett O. Queiroz JFD and Ortega E. 2006. Emergy assessment of integrated production systems of grains, pig and fish in small farms in the South Brazil. Ecological Modelling, 193: 205-224. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.07.023

Cochran WG. 1942. Sampling theory when the sampling-units are of unequal sizes. Jornal of the American Statistical Association, 37: 199-212.

Cristiano S. 2021. Organic vegetables from community-supported agriculture in Italy: emergy assessment and potential for sustainable, just, and resilient urban-rural local food production. Journal of Cleaner Production, 292: 126015. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126015

Cuadra M and Rydberg T. 2006. Emergy evaluation on the production, processing and export of coffee in Nicaragua. Ecological Modelling, 196: 421-433.

Ding X, Zhou Y, Zheng N, Desideri U and Duan L. 2024. Emergy analysis and comprehensive sustainability investigation of a solar-aided liquid air energy storage system based on life cycle assessment. Applied Energy, 365: 123249. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.123249

Fallahinejad S, Armin M and Asgharipour MR. 2022. The effect of farm size on the sustainability of wheat production using emergy approach. Current Research in Environmental Sustainability, 4: 100161. https://doi.org/10.1016/j.crsust.2022.100161

Fartout Enayat F 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

Fartout Enayat F, Ghanbari A, Asgharipour MR and Sayadabadi 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

Fartout Enayat F, Ghanbari A, Asgharipour MR and Seyedabadi A. 2022. Evaluation the sustainability of some agricultural production systems using ecological footprint, emergy analysis and emergy footprint. Ph.D. Thesis. School of Agriculture. University of Zabol. (In Persian with English Abstract).

Ghaley BB, Kehli N and Mentler A. 2018. Emergy synthesis of conventional fodder maize (Zea mays L.) production in Denmark. Ecological Indicators, 87: 144-151. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.12.027

Gómez-Limón J.A and Sanchez-Fernandez G. 2010. Empirical evaluation of agricultural sustainability using composite indicators. Ecological economics, 69(5): 1062-1075. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2009.11.027

Guo T, Wang h, Zhang W, Chen B and Song D. 2023. Sustainability evaluation of protected vegetables production in China based on emergy analysis. Journal of Cleaner Production, 388: 135928. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.135928

Hau JL and Bakshi BR. 2004. Promise and problems of emergy analysis. Ecological Modelling, 178: 215-225. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2003.12.016

Houshyar E, Wu XF and Chen GQ. 2017. 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

Liu T, Wang HZ, Wang H Zh and Xu H. 2021. The spatiotemporal evolution of ecological security in China based on the ecological footprint model with localization of parameters. Ecological Indicators, 126: 1097636. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107636

Liu Y, Qu Y, Cang Y and Ding X. 2022. Ecological security assessment for megacities in the Yangtze River basin: Applying improved emergy-ecological footprint and DEA-SBM model. Ecological Indicators, 134: 108481. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108481

Lu H, Kang WL, Campbell DE, Ren H, Tan YW, Feng RX, Luo JT and Chen FP. 2009. Emergy and economic evaluations of four fruit production systems on reclaimed wetlands surrounding the Pearl River Estuary, China. Ecological Engineering, 35: 1743-1757. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.08.001

Mirshekari S, Dahmardeh M, Asgharipour M. R, GHanbari, S. A and Seyedabadi E. 2023. Assessing emergy-based sustainability in five major agricultural ecosystems in Hirmand, Sistan and Baluchestan Province. Crop Science Research in Arid Regions, 4(2): 437-457. (In Persian with English Abstract). https://doi.org/10.22034/csrar.2021.311181.1146

Mokhtari V. 2015. The ecological footprint of some crops in Iran. PhD thesis, Ferdowsi University of Mashhad.(In Persian with English Abstract).

Mwambo FM, Fürst C, Nyarko BK, Borgemeister C and Martius C. 2020. Maize production and environmental costs: Resource evaluation and strategic land use planning for food security in northern Ghana by means of coupled emergy and data envelopment analysis. Land Use Policy, 95: 104490. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104490

Nasiri Mahalati M, Kochaki A, Rizvani P and Beheshti AR. 2013. Agroecology (translation). Publications of Ferdowsi University of Mashhad. pp: 459

Odum HT. 1996. Environmental accounting: emergy and environmental decision making. Wiley, New York pp. 379.

Pan H, Zhuang M, Geng Y, Wu F and Dong H. 2018. Emergy-based ecological footprint analysis for a Mega-city: The dynamic changes of Shanghai. Cleaner Production, 210: 552-562. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.064

Peng W, Wang X, Li X and He C. 2018. Sustaiability 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

Piastrellini R, Rotolo G.C, Arena AP, Civit BM and Curadelli S. 2024. Evaluation of the environmental sustainability of agricultural production using the methodologies of emergy analysis and life cycle assessment. Case study, tomato grown in Mendoza (Argentina). Cleaner and Circular Bioeconomy, 8: 100082. https://doi.org/10.1016/j.clcb.2024.100082

Smith P, Soussana J. F, Angers D, Schipper L, Chenu C, Rasse D. P, ... and Klumpp K. 2020. How to measure, report and verify soil carbon change to realize the potential of soil carbon sequestration for atmospheric greenhouse gas removal. Global Change Biology, 26(1): 219-241. https://doi.org/10.1111/gcb.14815

Su C, Geng Y, Liu G, Borrion A and Liang J. 2021. Emergy-based environmental accounting of China's nickel production. Ecological Indicators, 161: 112006. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112006

Wang X, Tan W, Zhou S, Xu Y, Cui T, Gao H, Chen M, Dong X, Sun H, Yang J, Wu Y and Kong F. 2021. Converting maize production with low emergy cost and high economic return for sustainable development. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 136: 110443. https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110443

Xie B, Zhang X, Lu J, Liu F and Fan Y. 2022. Research on ecological evaluation of Shanghai port logistics based on emergy ecological footprint models. Ecological Indicators, 139: 108916. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108916

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. Cleaner Production, 184: 678-695. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.271

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 Q, Li T, Yin Y, Ying H, Cui Z and Zhang F. 2021. Targeting Hotspots to Achieve Sustainable Nitrogen Management in China's Smallholder-Dominated Cereal Production. Agronomy, 11(3): 557. https://doi.org/10.3390/agronomy11030557

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 H, Zhai X, Guo L, Liu L, Huang D, Yang Y, Li J, Xie Sh, Zhang C, Tang Sh and Wang K. 2019. Assessing the efficiency and sustainability of wheat production systems in different climate zon in China using emergy analysis. Journal of Cleaner Production, 235: 724-732. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.251

Zhao H, Zhai X, Guo L, Yang Y, Li J, Ren Ch, Wang K, Liu X, Zhan R and Wang K. 2019. Comparing protected cucumber and field cucumber production systems in China based on emergy analysis. Journal of Cleaner Production, 236: 117648. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117648

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

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