


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

Nosrat Keshtegar<sup>1</sup>, Esmael Seyedabadi<sup>2\*</sup> , Ahmad Ghanbari<sup>3</sup>, Mohamamd Reza Asgharipour<sup>3</sup>, Mehdi Dahmardeh<sup>3</sup>, Tohid Bagherpour<sup>4</sup>

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-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

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

نصرت کشته گر<sup>۱</sup>، اسماعیل سیدآبادی<sup>۲\*</sup>، احمد قنبری<sup>۳</sup>، محمدرضا اصغری پور<sup>۳</sup>، مهدی دهمرده<sup>۳</sup>، توحید باقر پور<sup>۴</sup>

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، به منظور ارزیابی پایداری از روش ردپای امرژی و شاخص‌های برگرفته از آن استفاده شده است. این روش توانایی کمی کردن تأثیر فعالیت‌های انسان بر منابع اکولوژیک نظام تولیدی و اکوسیستم‌های اطراف را دارد. داده‌های موردنیاز برای این مطالعه در سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۲ 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 ( $3/85 \times 10^7$  هکتار جهانی در یک سال زراعی) نسبت به ردپای امرژی ( $8/12 \times 10^8$  هکتار محلی در یک سال زراعی) در منطقه هدف شد. این امر باعث شد تا نظام‌های تولید گندم در منطقه با کسری اکولوژیک ( $7/73 \times 10^8$  - هکتار) مواجه باشند و امنیت اکولوژیک نظام‌ها و محیط اطراف آن‌ها به مخاطره بیفتد.

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

**واژه‌های کلیدی:** اثرات زیست‌محیطی، سامانه‌های تولیدی، شاخص‌های امرژی، عملکرد حداکثری، نهاده‌های ورودی

**مقدمه**  
 توسعه پایدار ایفا کرده است. با این حال، منابع و نهاده‌های کشاورزی نظیر آب، خاک، انرژی و سرمایه، به دلایل مختلفی از جمله تغییرات اقلیمی، افزایش جمعیت،

کشاورزی به‌عنوان یکی از قدیمی‌ترین فعالیت‌های اقتصادی بشر، نقش حیاتی در تأمین امنیت غذایی و

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). تجزیه و تحلیل 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).

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

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 نه تنها 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، به شرط مناسب بودن 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. از این رو 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. باتوجه به 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 باتوجه به 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

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 (فروتوت عنایت و اصغری پور ۲۰۲۳). همچنین تفاوت ۱۴ برابری ردپای امرژی نسبت به ظرفیت تحمل امرژی، ناپایداری مزرعه ماهی در چین را نشان داد (ژائو و همکاران ۲۰۱۳).

باتوجه به اهمیت نظام‌های تولید گندم در شهرستان ایرانشهر و مشاهدات اولیه مبنی بر تزیق بی‌رویه نهاده‌ها به این نظام‌ها با هدف دریافت عملکرد مطلوب توسط کشاورزان که موجب فشار بر محیط زیست 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 مورد مطالعه

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 معمولاً از اواسط پاییز شروع می‌گردد. عملیات خاکورزی با استفاده از گاواهن و دیسک انجام می‌شود. این ماشین‌آلات خاک سطحی را نرم، علف‌های هرز را حذف و زمین را تسطیح می‌کنند. کشت بذر معمولاً 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

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 آبیان در سیستان (فروتوت عنایت و همکاران ۲۰۲۳)، ارزیابی پایداری تولید انگور یاقوتی در سیستان (فروتوت عنایت و همکاران، ۱۴۰۲) اشاره کرد.

باوجود اینکه 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 نخستین بار 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.

فروتوت 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

انتخاب شدند. جهت تعیین حجم نمونه از فرمول کوکران استفاده گردید که معادل ۲۳۰ بدست آمد (کوکران ۱۹۴۲).

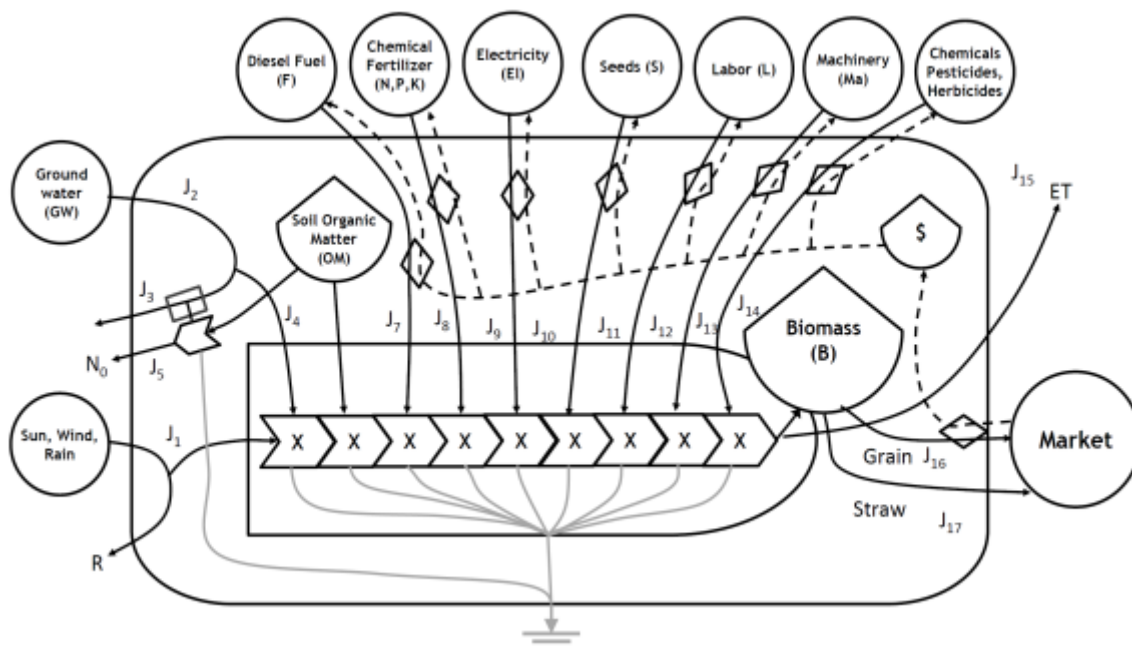
این عملیات (برداشت) توسط ماشین‌آلات و نیروی انسانی صورت می‌گیرد.

### 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 ۱۴۰۱-۱۴۰۲ مشخص شد و مرز مکانی دروازه مزارع گندم شهرستان ایرانشهر بود. پس از مشخص شدن 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 (کاوالت و همکاران ۲۰۰۶).

### 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. به منظور مشخص شدن جامعه آماری مورد مطالعه، تعداد مزارع گندم موجود در منطقه به عنوان نمونه کل



شکل ۱- دیاگرام جریان امرژی در نظام‌های تولید گندم

( $J, h$  و  $g, m^3$ ) شناخته می‌شوند، بنابراین جهت بررسی پایداری آن‌ها باید همه این واحدها به یک مبنا مشترک ترجمه شوند. تحلیل امرژی روشی است که قادر به انجام این کار است.

باتوجه به اینکه نظام کشاورزی علاوه بر ورودی‌هایی مانند ماشین‌آلات، کود، سموم و آب، نهادهایی چون باد، باران و نیروی انسانی را نیز دریافت می‌کند و این منابع (نهادهای اقتصادی و محیطی) توسط واحدهای مختلفی

جدول ۱- مجموع و روی‌ها به نظام‌های تولید گندم در ایرانشهر

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

### ظرفیت زیستی امرژی<sup>۲</sup> (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<sub>1</sub>) با واحد ام‌ژول خورشیدی در مترمربع در سال را در اختیار داشته باشیم.

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

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<sub>e</sub>) محاسبه می‌شود. رابطه ۲ این مفهوم را نشان می‌دهد:

(رابطه ۲)

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

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<sup>۳</sup> (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

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 به جز 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 ایران شهر پرداخته شد. فرسایش خاک توسط مدل جهانی فرسایش خاک (USLE<sup>۱</sup>) 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 پیش‌بینی شده 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 مشخص شدن 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).

<sup>3</sup> Emergy Environmental Burden

<sup>1</sup> Universal Soil Loss Equation

<sup>2</sup> Emergy Carrying Capacity

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<sup>۴</sup> (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 می‌باشد.

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

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<sup>۵</sup> (EED/EES)، شاخص فشار اکولوژیکی<sup>۶</sup> (EPI) و شدت ردپای اکولوژیک<sup>۷</sup> (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 تجزیه و تحلیل سود و زیان زیست‌محیطی در نظر گرفته می‌شود به گونه‌ای که می‌توان با کمک این شاخص وضعیت تحمل و توانایی توسعه پایدار بوم نظام تولیدی را اندازه‌گیری کرد. در صورتی که 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	$EFI = EEF / ECC$

پتانسیل آب باران و آب رودخانه نهاده‌های محیطی تجدیدپذیر ورودی به مزارع گندم ایرانشهر هستند. به منظور جلوگیری از ارزیابی مضاعف، نهاده با بیشترین امرژی ورودی که در نظام‌های تولیدی هدف، آب

#### نتایج و بحث

##### ظرفیت زیستی امرژی (ECC)

در بررسی نهاده‌ها مشخص شد که انرژی خورشید، انرژی جنبشی باد، انرژی شیمیایی آب باران، انرژی ژئو

<sup>6</sup> Ecological Pressure Index

<sup>7</sup> Ecological Footprint Intensity

<sup>4</sup> Emergy Ecological Footprint

<sup>5</sup> Emergy Ecological Deficit/Surplus

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  $۸/۸۰ \times ۱۰^۷$ ،  $۱/۰۲ \times ۱۰^۷$  و  $۶/۶۸ \times ۱۰^۵$  هکتار جهانی در یک دوره پرورش (فرتوت عنایت و اصغری‌پور ۲۰۲۳) و مقدار این شاخص را برای تولید انگور یا قوتی  $۱/۳۵ \times ۱۰^۹$  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  $۸/۱۲ \times ۱۰^۸$  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 در صورتی که به صورت 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  $۷/۹۱ \times ۱۰^۹$  هکتار محلی محاسبه شد (فرتوت عنایت و همکاران، ۱۴۰۱). نظام‌های پرورش ماهی در بسترهای

رودخانه ( $۹/۴۱ \times ۱۰^{۱۷}$ ) ام‌ژول خورشیدی در مجموع سطح زیر کشت) است، به همراه امرژی خورشید و امرژی چرخه زمین برای محاسبه ظرفیت زیستی مورد استفاده قرار گرفت. پس از محاسبات انجام شده، ظرفیت زیستی امرژی برای سامانه‌های تولید گندم ایرانشهر  $۳/۸۵ \times ۱۰^۷$  هکتار جهانی در یک سال زراعی برآورد شد. پژوهشگران ECC را برای گندم در منطقه سیستان استان سیستان و بلوچستان به مقدار  $۱/۸۶ \times ۱۰^{۱۰}$  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 به مراتب کمتر از منطقه سیستان است.

در تحقیقی دیگر مساحت اکولوژیکی که از تولید انگور یا قوتی در سیستان حمایت می‌کند به عنوان ظرفیت زیستی مورد بررسی قرار گرفت و مقدار آن  $۳/۹۳ \times ۱۰^۸$  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 ( $۷/۴۴ \times ۱۰^۷$ ) هکتار جهانی (در سال)، تولید انبه در قصرقند ( $۲/۵۴ \times ۱۰^۷$ ) هکتار جهانی (در سال)، پاپایا در سرباز ( $۱/۷۳ \times ۱۰^۵$ ) هکتار جهانی (در سال) و گواوا در دشتیاری ( $۳/۱۰ \times ۱۰^۶$ ) هکتار جهانی (در سال) بود.

### بار زیست‌محیطی امرژی (EEB)

این شاخص که با واحد هکتار جهانی بیان می‌گردد، میزان تلفات نهاده‌های محیطی تجدیدناپذیر را به خوبی نشان می‌دهد (فرتوت عنایت و همکاران ۲۰۲۳). مقدار بار زیست‌محیطی در مطالعه حاضر  $۶/۲۵ \times ۱۰^۹$  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

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.

حاکمی، بتنی و گالوانیزه در منطقه سیستان به ترتیب  $۳/۷۵ \times ۱۰^۵$ ،  $۲/۰۴۹ \times ۱۰^۶$  و  $۵/۰۳ \times ۱۰^۴$  هکتار محلی در یک دوره پرورش ردپای برجای گذاشتند (فرتوت عنایت و اصغری پور ۲۰۲۳). مقدار این شاخص برای نظام‌های تولید انگور یا قوتی در منطقه سیستان  $۱/۱۲۵ \times ۱۰^۸$  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

جدول ۳- شاخص‌های وابسته به ردپای امرژی

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

#### شاخص فشار اکولوژیکی (EPI)

مقدار این شاخص برای مزارع گندم در منطقه موردنظر  $۰/۹۲۲۲۰۳۳$  محاسبه شد؛ بنابراین با توجه به توصیفی که پژوهشگران برای نتیجه حاصل از این شاخص ارائه داده‌اند ( $۰/۵ < EPI < ۰$ )، ظرفیت محیط بالاتر از مصرف منابع است،  $EPI < ۰/۵$ ، 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).

#### شاخص کسری/مازاد اکولوژیک امرژی (EED/EES)

مقدار این شاخص برای نظام‌های تولید گندم در ایرانشهر  $۷/۷۳ \times ۱۰^۸$  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 گواوا بلوچستان (عدل و همکاران، ۱۴۰۲) و پرورش ماهی در استخرهای بتنی و گالوانیزه منطقه سیستان (فرتوت عنایت و اصغری پور ۲۰۲۳) نیز به همین دلایل با کسری اکولوژیک مواجه شدند. عکس این حالت برای تولید انگور یا قوتی 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).

## شدت ردپای اکولوژیک (EFI)

مقدار EFI برای مطالعه حاضر ۲۱/۰۹۰۹۰۹ محاسبه شد. باتوجه به اینکه عدد برآورد شده بزرگتر از ۱ است بنابراین تولید گندم در ایران شهر 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 یا قوتی با EFI، ۰/۲۸۶۲۶ (فرتوت عنایت و همکاران ۲۰۲۳) در منطقه سیستان حاکی از ظرفیت زیستی بالای این نظام‌ها بود که تنش 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. از این رو 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.

## منابع مورد استفاده

ظرفیت زیستی امرژی در نظام‌های تولید گندم ایران شهر  $3/85 \times 10^7$  هکتار جهانی در یک سال زراعی محاسبه شد. همچنین این نظام‌ها در طول سال زراعی  $8/12 \times 10^8$  هکتار محلی ردپای امرژی برجای گذاشتند. نتیجه بالاتر بودن ردپای امرژی از ظرفیت زیستی امرژی کسری اکولوژیک به اندازه  $3/85 \times 10^7$  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 ایران شهر موجب هدررفت مساحت زیادی ( $6/25 \times 10^9$  هکتار جهانی در سال) از خاک حاصلخیز می‌شود؛ بنابراین تغییر مدیریت نظام‌های تولید گندم ایران شهر 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 می‌تواند 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.

- 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 Florida, 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. *Journal 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 Megacity: 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. 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>

- 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, Borrión 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>