

Comparing the Ecological Health and Sustainability of Wheat and Pistachio Production Systems in the Goharkuh Taftan Agro-industry Complex Using a Thermodynamic Approach and Sensitivity Analysis of the Results

Mahdi Motakefi¹ , Mehdi Dahmardeh^{2*}, Ahmad Ghanbari³, Mohammad Reza Asgharipour³

Received: February 21, 2024

Accepted: August 25, 2024

بخش سیاست‌گذاری به آخر مقاله اضافه شود

- 1- Ph. D Candidate, Department of Agronomy, Faculty of Agriculture, University of Zabol, Zabol, Iran
2- Associate Professor, Department of Agronomy, Faculty of Agriculture, University of Zabol, Zabol, Iran
3- Professor, Department of Agronomy, Faculty of Agriculture, University of Zabol, Zabol, Iran
*Corresponding Author Email: dr.dahmardeh@uoz.ac.ir

Abstract

Background & Objective: In this study, we investigated how increasing energy inputs affect the stability of wheat and pistachio production systems, revealing that enhanced production may come at the cost of reduced stability in these systems.

Materials & Methods: Using approaches that can identify the extent of deviation of systems from stability will be fruitful for making future decisions. In this study, we have utilised the thermodynamic approach proposed by Steinborn and Svirezhev to determine the entropy overproduction and deviation from the stable state of the wheat and pistachio production system in the Goharkuh Taftan agro-industry complex.

Results: The examined components include excess entropy production, limit energy load, maximal crop production for sustainable agriculture, and deviation from sustainable agriculture of the system. The results indicate that both production systems have generated excess entropy. The entropy overproduction by the wheat product was approximately 67% less than that of pistachios, indicating a higher stability of the wheat product than pistachios.

Conclusion: The wheat production system has been more energy-efficient than the pistachio production system due to higher productivity. The difference in the intensity of energy flows and the variation in the structure of the two production systems complex have been the reasons for the disparity in the quantities of the components under investigation. However, none of these systems are sustainable in the long run, and adopting management approaches that reduce the intensity of energy inflows into these systems and require more use of renewable energies is essential to reach a stable state.

Keywords: Deviation from System Stability, Energy Efficiency, Entropy Overproduction, Production Systems, Renewable Energies



This is an open-access article under the CC BY NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/>)

Copyright@ 2026 Mehdi Dahmardeh Email: Dahmard@gmail.com

<https://doi.org/10.22034/saps.2024.60678.3186>



مقایسه سلامت اکولوژیکی و پایداری نظام تولیدی گندم و پسته مجتمع کشت و صنعت گوهر کوه تفتان با استفاده از رویکرد ترمودینامیکی و تحلیل حساسیت نتایج

مهدی معتکفی^۱، مهدی دهمرده^{۲*}، احمد قنبری^۳، محمدرضا اصغری پور^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۰۲	تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۰۴
--------------------------	-------------------------

- ۱- دانشجوی دکتری آگروتکنولوژی، 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

چکیده

مقدمه و اهداف: در این پژوهش، ما به بررسی چگونگی تأثیر افزایش جریان‌های انرژی ورودی بر کاهش پایداری نظام‌های تولیدی گندم و پسته پرداخته‌ایم، که نشان می‌دهد افزایش تولید می‌تواند به بهای کاهش پایداری این نظام‌ها تمام شود.

مواد و روش‌ها: استفاده از رویکردهایی که بتوان به‌وسیله آن‌ها مقدار انحراف نظام‌ها از حالت پایدار را مشخص کرد، برای اتخاذ تصمیم‌های آتی مثمر ثمر خواهد بود. در پژوهش حاضر ما از رویکرد ترمودینامیکی پیشنهاد شده توسط استینبرن و اسویرثف بهره برده‌ایم تا از این طریق مقدار آنتروپی اضافی تولید شده و انحراف از وضعیت پایدار نظام تولید گندم و پسته مجتمع کشت و صنعت گوهرکوه تفتان را مشخص کنیم.

یافته‌ها: مولفه‌های مورد بررسی شامل آنتروپی اضافی تولید شده، حداکثر انرژی مجاز ورودی، حداکثر عملکرد در شرایط پایدار و معیار انحراف از وضعیت پایدار نظام می‌باشد. نتایج نشان داد هر دو نظام تولیدی دارای آنتروپی اضافی تولید شده هستند. مقدار آنتروپی تولید شده محصول گندم در حدود ۶۷ درصد کمتر از محصول پسته بوده است که پایداری بیشتر محصول گندم نسبت به پسته را نشان می‌دهد.

نتیجه‌گیری: نظام تولیدی گندم به‌علت بهره‌وری انرژی بالاتر از پایداری بیشتری نسبت به نظام تولیدی پسته برخوردار بوده است. اختلاف شدت جریان‌های انرژی ورودی و تفاوت در ساختار دو نظام تولیدی مجتمع دلیل تفاوت در مقدار مولفه‌های مورد بررسی بوده است. اما در مجموع هیچکدام از این نظام‌ها در بلند مدت پایدار نیستند و برای رسیدن به حالت پایدار اتخاذ شیوه‌های مدیریتی که باعث کاهش شدت جریان‌های انرژی ورودی به این نظام‌ها می‌شود و استفاده بیشتر از انرژی‌های تجدید پذیر، الزامی است.

واژه‌های کلیدی: آنتروپی اضافی تولید شده، انحراف از پایداری نظام، انرژی‌های تجدید پذیر، بهره‌وری انرژی، نظام‌های تولیدی

مقدمه

کشاورزی فشرده با تغییر الگوی نظام‌های کشاورزی سنتی، مبتنی بر استفاده از منابع طبیعی و خدمات اکوسیستمی به نظام‌های تولیدی مدرن از اوایل قرن بیستم آغاز شد. رویکرد اصلی این نظام‌های تولیدی استفاده بیشتر از مکانیزاسیون، کودها، سموم شیمیایی، بذره‌های اصلاح شده و کنترل شیمیایی آفات با هدف تأمین غذای جمعیت روبه رشد بوده است (سوریا-لوپز و همکاران ۲۰۲۳). پیامدهای کشاورزی فشرده با زندگی انسانها و محیط زیست گره خورده است و ما هزینه افزایش تولید را به بهای تخریب محیط زیست (از جمله تخریب خاک، شوری خاک)، آلودگی منابع آب و از بین رفتن تنوع زیستی، افزایش گازهای گلخانه‌ای و گرم شدن کره زمین پرداخت می‌کنیم (شاه و همکاران ۲۰۱۹).

در مواجهه با چالش‌های یاد شده، ایده کشاورزی پایدار از زمان انتشار گزارش برانت لند در سال ۱۹۸۷، در کنار مفهوم کلی توسعه پایدار، اهمیت پیدا کرد. با این حال، همانند مفهوم توسعه پایدار، مفهوم کشاورزی پایدار در معنای خود مبهم است (تایت و موریس ۲۰۰۰ و پرتی و همکاران ۲۰۰۳ و تیان و همکاران ۲۰۲۱). تلاش‌های متعددی برای تعریف کشاورزی پایدار صورت گرفته است اما می‌توان گفت تمامی این تعاریف بر پایه اصول مشترکی بنا شده‌اند. این اصول به طور خلاصه بیان کننده استفاده یک نظام از منابع تجدید پذیر و عدم استفاده از منابع تجدید ناپذیر می‌باشد. این نظام‌های پایدار از یکپارچگی سیستم‌های طبیعی محافظت می‌کند به طوری که منابع طبیعی به طور مداوم بازسازی می‌شوند. علاوه بر آن نظام‌های کشاورزی پایدار منافع بلند مدت همه اعضای جامعه را در نظر گرفته، سود آور بوده و کیفیت زندگی افراد و جوامع را بهبود می‌بخشد (گربر ۱۹۹۲ و هارود ۲۰۲۰).

برای درک بهتر مفهوم پایداری در نظام‌های تولیدی نیازمند رهیافت‌هایی هستیم که بتوان به وسیله آنها ارزیابی و سنجش جامعی از مقدار پایداری در نظام داشته باشیم. با توجه به اینکه تعاریف گسترده‌ای از مفهوم پایداری تاکنون بیان شده است، از اینرو محققان

و پژوهشگران رهیافت‌های مختلفی را برای ارزیابی پایداری در نظام‌های تولیدی معرفی کرده‌اند. ارزیابی چرخه حیات (لن و یائو ۲۰۱۹)، تحلیل انرژی (ادوم ۱۹۸۴)، تحلیل انرژی (ادوم ۱۹۹۶)، تحلیل انرژی (شوبا ۲۰۱۹)، تحلیل رد پای اکولوژیک (بانرجی ۲۰۲۱)، آنتروپی اضافی تولید شده (استینرن و اسویرث ۲۰۰۰)، تاب آوری زیست محیطی (راتلج و همکاران ۱۹۷۶)، تحلیل حساسیت (لی و همکاران ۲۰۱۱) و تحلیل اقتصادی (امیری و همکاران ۲۰۲۲) از جمله روش‌های معرفی شده برای سنجش و ارزیابی پایداری نظام‌ها است.

ترمودینامیک (برگرفته از دو واژه ترمو به معنای گرما و دینامیک به معنای پویایی) شاخه‌ای از علوم طبیعی است که به بحث راجع به گرما و نسبت آن با انرژی و کار می‌پردازد. به طور کلی ترمودینامیک با انتقال انرژی از یک مکان به مکان دیگر و از شکلی به شکل دیگر سر و کار دارد. اساس ترمودینامیک بر پایه مشاهدات رامفورد و فعالیت‌های کارنو شکل گرفت و پس از آن کلوسیوس ریاضیدان و فیزیکدان آلمانی، به ترتیب قوانین اول و دوم ترمودینامیک را توسعه داد (لوئیس و همکاران ۲۰۲۰). قانون اول ترمودینامیک که در بیشتر موارد آن را شکل دیگری از قانون پایستگی انرژی می‌دانند اساس آن بر تبدیل آسان یک شکل از انرژی به شکل دیگر بنا نهاده شده است. قانون دوم ترمودینامیک بیان می‌کند، هنگامی که انرژی از شکلی به شکل دیگر تغییر می‌کند، مقداری از قابلیت انجام کار به شکل گرما از دست می‌رود که در واقع همان آنتروپی می‌باشد. به طور کلی آنتروپی یک مفهوم علمی و همچنین یک ویژگی فیزیکی قابل اندازه‌گیری است که بیشتر با حالت بی‌نظمی، تصادفی یا عدم قطعیت همراه است. در فیزیک پدیده تخریب و مفهوم آنتروپی بسیار مشابه هستند (آنتروپی اغلب به عنوان معیار تخریب استفاده می‌شود) و مفهوم پایداری در نقطه مقابل آنتروپی قرار دارد (جورجنسن، ۲۰۱۸). مطالعات بسیاری تاکنون سعی در بکارگیری مفاهیم و روش‌های ترمودینامیکی (به صورت مستقیم یا غیرمستقیم) در بوم‌شناسی نظری و ریاضی برای

نامه وزارت جهاد کشاورزی (b) بوده است. در این پژوهش ما سعی کرده‌ایم که از رهیافت معرفی شده توسط استنیرن و اسویرژف (۲۰۰۰) برای ارزیابی سلامت و نشان دادن مقدار انحراف از پایداری نظام‌های تولیدی مجتمع گوهرکوه تفتان استفاده کنیم. در واقع با کاربرد این روش به این سوالات پاسخ می‌دهیم: اول اینکه آیا نظام‌های تولیدی گندم و پسته مجتمع گوهرکوه تفتان از نقطه نظر سلامت اکولوژیکی مناسب هستند؟ و دوم اینکه کدام یک از دو نظام تولیدی مجتمع از منظر مولفه‌های ترمودینامیکی بهینه است؟ در راستای پاسخ به این سوالات پژوهش حاضر انجام شد. در پایان برای نشان دادن مقدار حساسیت خروجی به تغییر متغیرهای ورودی یک تحلیل حساسیت انجام گرفت.

مواد و روش‌ها

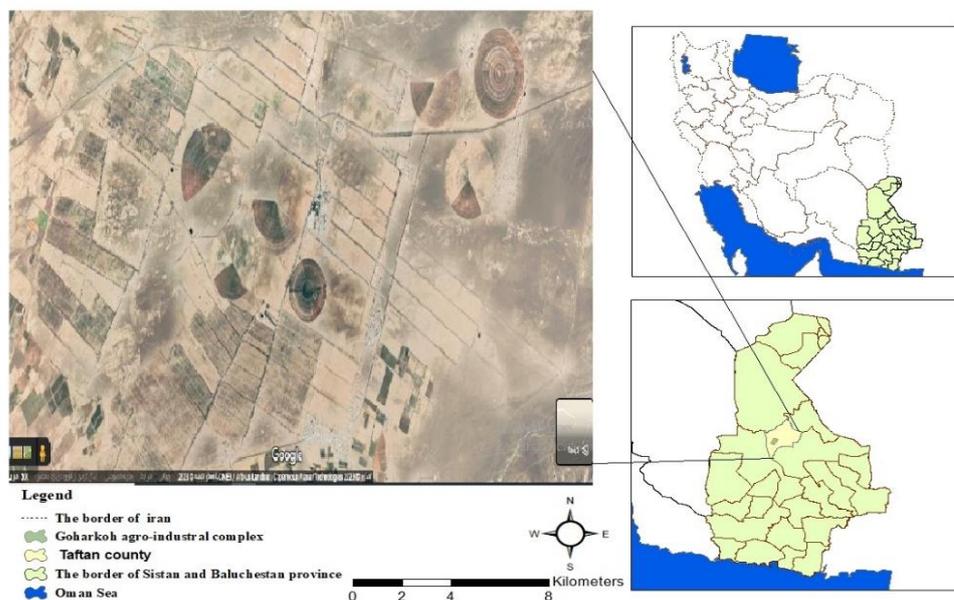
معرفی منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این تحقیق، شهرستان تفتان است که در استان سیستان و بلوچستان واقع شده است. این شهرستان در سال ۱۳۹۸، با ارتقاء بخش نوک آباد از توابع شهرستان خاش به شهرستان تبدیل شد و دارای ۴۴,۱۷۶ نفر جمعیت می‌باشد. عمده فعالیت ساکنان این منطقه کشاورزی و دامداری است. موقعیت جغرافیایی شهرستان تفتان و مجتمع کشت و صنعت گوهرکوه تفتان در شکل ۱ نشان داده شده است (شکل ۱).

شهرستان تفتان یکی از قطب‌های کشاورزی استان سیستان و بلوچستان است که سهم تولید آن در استان سالانه بیش از ۴۰ هزار تن از انواع محصولات کشاورزی می‌باشد. محصولات باغی شامل پسته، زردآلو، انگور، انار، هلو، زیتون و محصولات زراعی شامل گندم، جو، ذرت، یونجه، پنبه، سبزی و دانه‌های روغنی و پرورش گوسفند می‌باشد. این تحقیق قصد دارد سلامت اکولوژیکی برخی نظام‌های کشاورزی در این منطقه را از نقطه نظر ترمودینامیکی بررسی کند.

توصیف ماکروسکوپی جوامع بیولوژیکی و اکوسیستم‌ها داشته‌اند. اما مشکل اساسی از این قرار بود که بین مدل‌ها (به معنای وسیع) در ترمودینامیک و مدل‌های بوم‌شناسی، همسان ریختی وجود نداشت (اسویرژف ۲۰۰۰). با این حال، اسویرژف یکی از پژوهشگرانی بود که به مشکل کاربرد ایده‌های ترمودینامیکی در بوم‌شناسی پی برده و وی مدل ترمودینامیکی-اکولوژیکی را به درستی فرموله کرده و کاربرد این مفهوم را در اکوسیستم‌ها به خوبی نشان داد. استفاده از این فرمول‌ها در ارزیابی پایداری نظام‌ها بسیار مثر ثمر خواهد بود. نمونه‌ای از کاربرد مفهوم آنتروپی در اکوسیستم‌ها در مطالعه اصغری پور و همکاران (۲۰۱۴) نشان داده شده است. در این مطالعه محققان بیان کردند، مقدار آنتروپی تولید شده نظام تولیدی گندم در یک بازه زمانی ۶ ساله (۱۳۸۴-۱۳۸۹)، از ۱/۱۶ به ۱/۱۷ گیگاژول در هکتار در کلون افزایش یافت. پژوهشگران افزایش آنتروپی در این بازه زمانی را به دلیل افزایش مصرف انرژی و کاهش کارایی انرژی مصرفی در مجتمع کشت و صنعت جوین بیان کردند. همچنین مقدار انحراف از وضعیت پایدار در سال ۱۳۸۵-۱۳۸۴، ۱۲/۲۵ و در بین سال‌های ۱۳۹۰-۱۳۸۹، ۱۲/۴۲ بود که نشان دهنده کاهش پایداری نظام تولید گندم در مجتمع بود، اما این تغییرات کند و غیرمعنادار بوده است. در بین نظام‌های تولیدی میزان آنتروپی در سیستم‌های تولید یونجه از سایر مزارع کمتر و میزان آنتروپی در سیستم‌های تولید چغندر قند، بیشترین بوده است.

مجتمع کشت و صنعت گوهرکوه تفتان به‌عنوان یکی از قطب‌های فعال تولیدات کشاورزی در شهرستان تفتان، استان سیستان و بلوچستان قرار دارد. این مجتمع تولید کننده محصولات زراعی نظیر گندم، جو، یونجه، پنبه و محصولات باغی مانند پسته می‌باشد. محصول پسته مجتمع شامل ارقام اوحدی، احمد آقایی و کله قوچی می‌باشد و بیشترین سطح زیر کشت در بین محصولات مجتمع را شامل می‌شود و از اینرو سهم بالایی در تولید پسته در استان دارد. در سال زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ سطح زیر کشت گندم در این استان ۷۶,۴۲۴ هکتار (آمار نامه وزارت جهاد کشاورزی a) و پسته ۹,۹۲۹ هکتار (آمار



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی شهرستان تفتان و مجتمع کشت و صنعت گوهرکوه تفتان

سال‌های ۱۳۹۹-۱۴۰۰ به‌دست آمده است. در این پژوهش ابتدا اطلاعات مربوط به سطح زیر کشت، تولید در اراضی مجتمع و عملکرد هر محصول جمع آوری شد. سپس کلیه فعالیت‌های زراعی از قبیل آماده‌سازی زمین، میزان بذر مصرفی، میزان آب آبیاری، مصرف انرژی الکتریسیته، سوخت، کودها، سموم شیمیایی مصرفی، نیروی انسانی مورد نیاز و غیره در هر دو نظام با دقت مشخص شد. برای تعیین مقادیر جریان‌های انرژی ورودی به وسیله هر جزء ورودی محتوای کل انرژی نهاده‌های مختلف از منابع مختلف استخراج گردید. داده‌های بدست آمده پس از دسته بندی و پردازش براساس معادل انرژی، تبدیل و کلیه نهاده‌های ورودی و خروجی به واحد انرژی تبدیل شده تا براساس روابط مربوطه، میزان آنتروپی اضافی تولید شده در نظام، حداکثر انرژی مجاز ورودی، حداکثر عملکرد در شرایط پایدار و مقدار انحراف نظام‌ها از وضعیت پایدار محاسبه شود. به‌منظور برآورد میزان انرژی‌های ورودی و خروجی در مزارع معادل انرژی نهاده‌های مختلف در جدول ۱ ارائه شده است.

ساختار مدل آنتروپی تولید شده در نظام

بدنه اصلی در ترمودینامیک نظام و محیط آن هستند. ساختار یک نظام از مرز نظام و محیط نظام بوجود آمده

مجتمع کشت و صنعت گوهرکوه تفتان بزرگترین مجموعه فعال تولید محصولات کشاورزی در این شهرستان است که با طول جغرافیایی ۶۰ درجه و ۵۱ دقیقه و عرض جغرافیایی ۲۸ درجه و ۳۸ دقیقه با ارتفاع ۱۳۸۲ متر از سطح دریا در دشتی به نام گوهرکوه قرار دارد. این مجتمع دارای ۴۲۰۰ هکتار زمین کشاورزی است که محصولات آن شامل پسته (۸۰۰ هکتار)، گندم (۱۳۰ هکتار)، جو (۱۰ هکتار)، پنبه (۵۰ هکتار)، یونجه (۴۰ هکتار) و همچنین پرورش گوسفند می‌باشد. بافت خاک غالب مجتمع لوم شنی، سیستم آبیاری محصولات بارانی به وسیله سنتریپوت و محصول پسته به صورت قطره‌ای و تحت فشار است. بذور مورد استفاده جهت کاشت برای گندم رقم سیوند و پسته رقم بادامی (بذر پایه نهال) می‌باشد. این مجتمع دارای ۳۹ حلقه چاه بوده که به دلیل وجود خشکسالی‌های اخیر و افت منابع آبی در حال حاضر ۲۷ حلقه چاه آن فعال و بقیه از مدار خارج شده اند. میانگین بارندگی سالیانه منطقه ۱۲۰ میلی‌متر و میانگین درجه حرارت ۳۰ درجه سانتی‌گراد است.

جمع آوری داده‌ها

اطلاعات این مطالعه بر اساس آمار ارائه شده توسط مسئولین مجتمع کشت و صنعت گوهرکوه در طول

$dQ(t)$ گرمای تولید شده به وسیله واکنش‌های برگشت ناپذیر انجام شده توسط سیستم و $T(t)$ درجه حرارت محیط (در مقیاس کلوین) در نقطه‌ای مشخص از سطح زمین است که به وسیله بوم‌نظام کشاورزی اشغال شده است.

بر اساس تئوری توسعه یافته توسط اسویرث (۲۰۰۰)، نرخ کل سالانه آنتروپی از معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$[۳] \quad dS(t) = \sigma = \frac{1}{T} (W + \lambda P_1 - P_0)$$

در اینجا مقدار T درجه حرارت (بر حسب کلوین) در طول فصل رشد و W انرژی‌های ورودی مصنوعی سالانه است. اگر λP_1 را بخشی از تولید ناخالص سالیانه اکوسیستم فرض کنیم، P_1 بخشی از تولید است که به صورت تنفس و بقایا از دسترس خارج شده و یا به صورت محصول اقتصادی از مزرعه خارج خواهد شد (هر دو پارامتر بر اساس ژول در هکتار بیان می‌شوند). پس:

$$[۴] \quad diS = (W + \lambda P_1)/T$$

همچنین $d_e S = -P_0/T$ که P_0 تولید ناخالص اولیه سالانه (GPP) یک اکوسیستم طبیعی (ژول در هکتار یا مگاژول در هکتار) مشابه با اکوسیستم مزرعه می‌باشد. تولید خالص در یک سیستم با عبارت $(1-r) P_1$ متناسب است. r ضریب تنفسی یا بخشی از تولید ناخالص اولیه است که صرف فعالیت‌های حیاتی خود گیاه می‌شود. لذا عملکرد محصول برابر است با:

$$[۵] \quad y = k (1-r) P_1$$

K آن بخشی از تولید خالص است که به صورت محصول اقتصادی (عملکرد) از سیستم خارج می‌شود (در مورد اکوسیستم‌های زراعی نسبت عملکرد اقتصادی گیاه به کل بیوماس تولیدی در یک سال، شاخص برداشت اشاره دارد)، در اینصورت مقدار بقایا عبارت است از $(1-r) P_1$ (پس k):

$$[۶] \quad \lambda P_1 = (1-k)(1-r) P_1 \text{ residue} + r P_1 \text{ respiration} = (1-k + kr) P_1$$

$P_1 \text{ residue}$ و $P_1 \text{ respiration}$ به ترتیب بخش‌هایی از عملکرد هستند که به صورت بقایا و تنفس تلف می‌شوند. باید توجه داشت که بقایای گیاهی در این تعریف از تلفات مستثنی هستند، زیرا این بقایا دارای ارزش اقتصادی و

است، که ماده و انرژی را با محیط در سراسر مرزهای خود مبادله می‌کند. از اینرو نظام‌ها اینگونه طبقه بندی می‌شوند: نظام‌های ایزوله که در آن نه انرژی و نه ماده با محیط خود مبادله نمی‌شود. نظام‌های بسته فقط انرژی را با محیط خود مبادله می‌کند، اما نمی‌تواند ماده را مبادله کند. نظام‌های باز که انرژی و ماده را با محیط خود مبادله می‌کند. بوم‌نظام‌های زراعی از جمله نظام‌های باز هستند که انرژی (تابش ورودی خورشیدی و گرما) و ماده (آب، دی اکسید کربن، مواد مغذی و غیره) را با محیط مبادله می‌کند. بر اساس معادله فرضی پیمنتل رابطه بین عملکرد محصول y و مقدار انرژی ورودی w به صورت خطی است (پیمنتل ۱۹۸۰)، $y = \eta w$. ضریب تجربی کارایی انرژی η ، در بوم‌نظام‌های کشاورزی کشورها و مناطق مختلف محاسبه شده است. ضریب η شکلی از ضریب کارایی ترمودینامیک و پیامد قانون اول ترمودینامیک است. این ضریب بر اساس قانون دوم ترمودینامیک همیشه کم تر از واحد است. اما در مورد بوم‌نظام‌های کشاورزی معمولاً بیشتر از یک می‌شود، چرا که در محاسبات انرژی ورودی از خورشید در نظر گرفته نمی‌شود.

معادله فرضی پیمنتل بیان می‌کند، چنانچه مقدار انرژی ورودی w ، کوچک باشد عملکرد هر گیاه زراعی بسیار کم خواهد بود. پس با افزایش جریان انرژی ورودی (کشاورزی فشرده) به بوم‌نظام ما شاهد افزایش محصول خواهیم بود. اما در عمل محدودیت‌هایی وجود دارد که توسط قانون دوم ترمودینامیک تعیین شده است که از افزایش بی نهایت تولید محصول جلوگیری می‌کند. به عبارت دیگر ما هزینه افزایش بهره‌وری را با تخریب محیط زیست، به ویژه تخریب خاک پرداخت می‌کنیم (اسویرث ۲۰۰۰).

در نظام‌های باز تغییرات آنتروپی از دو جزء منشأ می‌گیرد:

$$[۷] \quad dS(t) = \sigma = diS(t) + deS(t)$$

که $dS(t) = \sigma$ ، کل آنتروپی سیستم، $diS(t)$ آنتروپی تولیدی در سیستم و $deS(t)$ آنتروپی انتقالی از خارج سیستم می‌باشد.

$$[۲] \quad diS(t) = dQ(t)/T(t)$$

در بخش دوم معادله (۹) که فقط y دارد، حداکثر عملکرد یک سیستم پایدار طبق معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$[۱۱] y_{cr} = \frac{P_0}{\left(\frac{1}{s}\right) + \left(\frac{1}{\eta}\right) - 1}$$

y_{cr} ، حداکثر تولید گیاهی (وزن ماده خشک) یک مزرعه را در حالت پایدار نشان می‌دهد.

در این پژوهش مقدار P_0 و تنفس پوشش گیاهی با استفاده از مدل بوم نظام مبتنی بر جریان (FBEM)، توصیف شده توسط وو و همکاران (وو و همکاران، ۲۰۰۹) تخمین زده شد. به طور خلاصه در این روش مقدار P_0 و تنفس پوشش گیاهی به وسیله متغیرهای محیطی محاسبه می‌شود. تنفس پوشش گیاهی به شکل تابعی از درجه حرارت (T , °C) و معادله Q_{10} ون هوف تخمین زده شد (ون هوف ۱۸۹۹).

$$[۱۲] ER = ER_0 \times Q_{10}^{T/10}$$

ER_0 مقدار تنفس بوم نظام در صفر درجه سانتی‌گراد و Q_{10} نسبت افزایش (ER/ER_0)، تنفس به ازای افزایش هر ۱۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. مقدار تولید ناخالص از طریق معادله زیر تخمین زده شد.

$$[۱۳] P_0 = NEE + ER$$

در این معادله NEE تبادلات خالص بوم نظام، P_0 تولید ناخالص اولیه و ER تنفس بوم نظام می‌باشد.

تحلیل حساسیت

تحلیل حساسیت روشی است که بررسی می‌کند چگونه تغییر در یک متغیر ورودی بر یک متغیر خروجی تحت یک مجموعه از فرضیات تأثیر می‌گذارد. این روش با استفاده از مدل‌سازی نرم افزاری، درصد تغییر در خروجی و ورودی را محاسبه می‌کند و حساسیت را به عنوان نسبت درصد تغییر در خروجی به درصد تغییر در ورودی تعریف می‌کند. دانستن اینکه سیستم در کجا حساس است می‌تواند به ما در پیش بینی تأثیرات کمک شایانی کند. این روش می‌تواند برای اهداف مختلف مانند آزمایش استحکام نتایج یک مدل، افزایش درک از روابط بین ورودی و خروجی، کاهش عدم قطعیت، ساده‌سازی مدل، بهبود ارتباط بین مدل‌سازان و تصمیم گیرندگان، یافتن نقاط بحرانی یا بهینه و کالیبراسیون پارامترهای مدل استفاده شود (ادوم و ادوم ۲۰۰۰). نمونه‌ای از تحلیل

ترمودینامیکی هستند. با استفاده از معادله (۵) مقدار P_1 را با مقدار شناخته شده گیاه، y بیان می‌کنیم و معادله (۷) را بازنویسی می‌کنیم:

$$[۷] \lambda P_1 = (1 - k + kr) P_1 = \frac{1-s}{s} y$$

که S بخشی از تولید ناخالص است که به صورت محصول اقتصادی از مزرعه خارج می‌شود پس $S = k(1-r)$ و در نهایت موازنه آنتروپی بوم‌نظام به شکل زیر بیان می‌شود:

$$[۸] \sigma = \frac{1}{T} (w + \frac{1-s}{s} y - P_0)$$

با استفاده از رابطه پیمنتل ($y = \eta W$)، داریم (پیمنتل ۱۹۸۰):

$$[۹] \sigma = \frac{1}{T} [w(1-\eta + \frac{\eta}{s}) - P_0] = \frac{1}{T} [y(\frac{1}{\eta} + \frac{1}{s} - 1) - P_0]$$

چنانچه $\sigma > 0$ باشد آنگاه در سیستم آنتروپی تجمع یافته است. باید توجه داشت سیستمی که آنتروپی را انباشته می‌کند، نمی‌تواند برای مدت طولانی وجود داشته باشد و دچار خود تخریبی خواهد شد. بنابراین، فرآیند دیگری باید وجود داشته باشد که آنتروپی را از سیستم خارج کند. مقدار σ که تولید بیش از حد آنتروپی توسط سیستم است (مازاد آنتروپی)، ممکن است به عنوان معیاری برای تخریب محیطی استفاده شود. به عبارت دیگر، مازاد آنتروپی یک هزینه آنتروپی است که باید توسط جامعه ما برای استفاده از فناوری‌های مدرن صنعتی در کشاورزی پرداخت شود. چنانچه در بخش اول معادله (۹) که فقط w دارد، مقدار آنتروپی اضافه تولید شده به وسیله سیستم را صفر فرض کنیم ($\sigma = 0$)، تخمینی برای حداکثر انرژی که مجازیم به سیستم وارد کنیم تا سیستم در وضعیت پایدار باقی بماند طبق معادله (۱۰) به دست می‌آید:

$$[۱۰] w_{cr} = \frac{P_0}{1-\eta+\left(\frac{\eta}{s}\right)}$$

w_{cr} ، حداکثر انرژی است که می‌تواند وارد سیستم شود و سیستم در وضعیت پایدار باقی بماند. این انرژی شامل تمام دخالت‌های انسان (شامل خاکورزی، کوددهی، آبیاری، کنترل آفات، برداشت، حمل و نقل، خشک کردن و غیره) می‌شود، چنانچه $w > w_{cr}$ باشد، آنگاه $\sigma > 0$ است و چنین سیستمی محیط زیست را تخریب می‌کند.

تحلیل حساسیت انتخاب شد. در پایان با تغییر این مقادیر تغییرات خروجی مدل نسبت به حالت اولیه محاسبه شد.

نتایج و بحث

جریان‌های ورودی انرژی و کارایی انرژی نظام‌ها

ساختار انرژی‌های ورودی به دو نظام تولیدی گندم و پسته مجتمع گوهر تفتان در شکل ۲ نشان داده شده است (شکل ۲). مقادیر انرژی ورودی به نظام گندم ۴۶/۷۰ و پسته ۵۲/۹۷ گیگاژول در هکتار بود (جدول ۲). میزان انرژی ورودی به نظام پسته در حدود ۱۲ درصد نسبت به نظام گندم افزایش داشته است، از اینرو بهره‌وری انرژی محصول گندم ۶۳ درصد بیشتر از محصول پسته بوده است (جدول ۲). همان‌گونه که در شکل ۲، نشان داده شده است، بیشترین مقادیر انرژی ورودی به هر دو نظام مربوط به کود نیتروژن و سوخت فسیلی بوده است (شکل ۲).

حساسیت آزمون‌هایی هستند که پاسخ خروجی سیستم را به دوبرابر شدن و یا نصف شدن هر متغیر ورودی بررسی می‌کند. در بوم نظام‌های کشاورزی تحلیل حساسیت ابزار مهمی برای ارزیابی چگونگی تأثیر تغییرات اطلاعات ورودی بر نتایج است و به تصمیم‌گیری برای تعیین اقداماتی جهت بهبود پایداری سیستم‌های تولیدی، کمک شایانی می‌کند (لی و همکاران ۲۰۱۱).

در آزمایش حاضر پس از تعیین مقادیر جریان‌های انرژی ورودی و تبدیل کلیه نهاده‌های ورودی و خروجی به واحد انرژی، مقادیر آنتروپی و انحراف از پایداری نظام مشخص خواهد شد. سپس کود نیتروژن به عنوان جریان ورودی انرژی که سهم بالایی از کل جریان انرژی ورودی به هر دو نظام را شامل می‌شود، به عنوان متغیر

جدول ۱- مقادیر، معادل‌های انرژی و معادل کل انرژی برای نهاده‌های ورودی و خروجی در دو نظام مجتمع کشت و صنعت گوهر تفتان

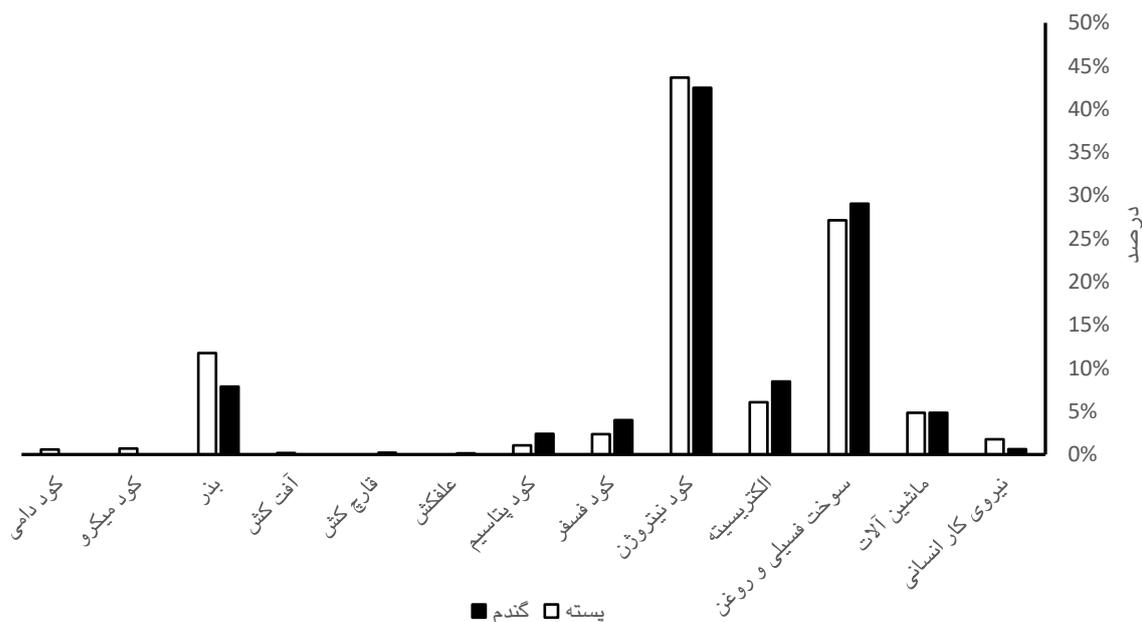
مقدار در واحد سطح (ha)		معادل انرژی (مگاژول در واحد)		معادل کل انرژی (MJ.ha ⁻¹)		واحد	ورودی
گندم	پسته	گندم	پسته	گندم	پسته		
۱۵۰	۴۵۷	۱/۹۵	۱/۹۵	۲۹۲/۵	۹۲۶/۲۵	(h)	نیروی کار انسانی
۳۶	۴۱	۶۲/۷	۶۲/۷	۲۲۵۷/۲	۲۵۷۰/۷	(h)	ماشین آلات
۲۸۴	۳۰۱	۴۷/۸	۴۷/۸	۱۳۵۷۵/۲	۱۴۳۸۷/۸	(l)	سوخت و روغن
۳۳۰/۵	۲۶۸/۷	۱۱/۹۳	۱۱/۹۳	۳۹۴۲/۸۶	۳۲۰۵/۵۹	(kwh)	الکتریسیته
۳۰۰	۳۵۰	۶۶/۱۴	۶۶/۱۴	۱۹۸۴۲	۲۳۱۴۹	(kg)	کود نیتروژن
۱۵۰	۱۰۰	۱۲/۴۴	۱۲/۴۴	۱۸۶۶	۱۲۴۴	(kg)	کود فسفر
۱۰۰	۵۰	۱۱/۱۵	۱۱/۱۵	۱۱۱۵	۵۵۷/۵	(kg)	کود پتاسیم
۰/۱۸۷	-----	۲۳۸	۲۳۸	۴۴/۵	-----	(kg)	علفکش
۰/۵	-----	۱۸۱/۹	۱۸۱/۹	۹۰/۹۵	-----	(kg)	قارچ‌کش
-----	۰/۵	۲۸۰/۴۴	۲۸۰/۴۴	-----	۵۰/۶	(kg)	آفت‌کش
-----	۳	۱۲۰	۱۲۰	-----	۳۶۰	(kg)	کود میکرو
۰	۱	۳۰۳/۱۰	۳۰۳/۱۰	-----	۳۰۳/۱	(Ton)	کود دامی
۲۵۰	۲۵۰	۱۴/۷	۱۴/۷	۳۶۷۵	۶۲۲۰	(kg)	بذر
مجموع انرژی ورودی							
۳۲۰۰	۱۲۰۰	۱۴/۷	۲۴/۸۸	۴۷۰۴۰	۲۹۸۵۶	(kg)	خروجی عملکرد اقتصادی
۲۰۰۰	-----	۱۲/۵	-----	۲۵۰۰۰	-----	(kg)	کاه و کلش
مجموع انرژی خروجی							
۷۲۰۴۰							

اطلاعات برای محصول گندم از منبع (قربانی و همکاران ۲۰۱۱)، پسته (کولکچی و آکسوی ۲۰۱۳)، سوخت و الکتریسیته از منبع (موسوی

اول و همکاران ۲۰۱۱) اقتباس شده است.

جدول ۲- مقدار انرژی مصرفی (w)، انرژی خروجی (y) و کارایی انرژی (η)، دو نظام گندم و پسته مجتمع کشت و صنعت گوهر کوه تفتان

نوع محصول	انرژی ورودی (GJ ha ⁻¹) w	انرژی خروجی (GJ ha ⁻¹) y	ورودی به خروجی η
گندم	۴۶/۷۰	۷۲/۰۴	۱/۵۴
پسته	۵۲/۹۷	۲۹/۸۵	۰/۵۶۴



شکل ۲- ساختار انرژی‌های ورودی به دو نظام تولیدی گندم و پسته مجتمع کشت و صنعت گوهرکوه تفتان

که نشان دهنده مقدار بهره‌وری انرژی η ، $1/54$ می‌باشد (جدول ۲). مقدار K برای محصول گندم 0.74 گزارش شده است (جدول ۳). ضریب تنفس بوم نظام برای منطقه مورد مطالعه با استفاده از مدل بوم نظام مبتنی بر جریان^۱ مقدار 0.33 محاسبه شد. مقدار S به شکل $S = k(1-r)$ ، 0.496 محاسبه شد.

پوشش غالب بوم نظام طبیعی مستقر در این منطقه گیاه درمنه کوهی (*Artemisia sieberi*) می‌باشد و مقدار P_0 برای آن در مرحله کلیماکس با استفاده از روش وو و همکاران (۲۰۰۹) و با در نظر گرفتن خصوصیت اقلیمی منطقه ۲۲ گیگاژول در هکتار برآورد شد. نمونه‌گیری گیاه درمنه کوهی از پنج ناحیه به صورت کاملاً تصادفی انجام شد، در هر منطقه از یک متر مربع گیاهان برداشت شده و در هوای آزاد خشک شدند. سپس میانگین وزن خشک

۳.۲. آنتروپی اضافی تولید شده

نحوه انجام محاسبات مقدار آنتروپی و انحراف از پایداری، برای محصول گندم در ادامه ارائه می‌شود، این محاسبات برای محصول پسته به همین ترتیب انجام شده است. جزئیات محاسبات مربوط به مقدار آنتروپی اضافی تولید شده، حداکثر انرژی ورودی مجاز، حداکثر عملکرد در شرایط پایدار و انحراف از پایداری دو نظام تولیدی مورد بررسی در پیوست ارائه شده است. برای دستیابی به موازنه آنتروپی در رابطه A ، مشخص کردن پارامترهای مورد نیاز این رابطه الزامی است. این پارامترها شامل w ، y ، η ، $S = k(1-r)$ و P_0 می‌شود. مقدار انرژی ورودی w ، محصول گندم $46/70$ گیگاژول در هکتار برآورد شد. بر اساس عملکرد این گیاه مقدار انرژی خروجی y ، $72/04$ گیگاژول در هکتار محاسبه شد

پنج ناحیه به عنوان وزن نهایی نمونه در نظر گرفته شد. در طول فصل رشد گندم ۲۹۰/۵۴ درجه کلون تخمین همچنین بر اساس داده‌های هواشناسی مقدار دمای هوا زده شد (جدول ۳).

جدول ۳- مقادیر شاخص‌های مختلف برای دو نظام مورد مطالعه در مجتمع گوهر کوه تفتان

نوع محصول	K	S	T (°K)	r
گندم	۰/۷۴	۰/۴۹۶	۲۹۰/۵۴	۰/۳۳
پسته	۰/۱۵	۰/۱۰	۲۹۴/۷۵	۰/۳۳

K، آن بخش از تولید خالص که به صورت محصول اقتصادی از مزرعه خارج می‌شود (نسبت عملکرد اقتصادی گیاه به کل بیوماس تولیدی در یک سال).
S، آن بخش از تولید ناخالص که به صورت محصول اقتصادی از مزرعه خارج می‌شود.
T، درجه حرارت بر حسب کلون در طی دوره رشد محصول می‌باشد.
مقادیر K و S از منبع (ویشیل ۱۹۹۵) اقتباس شده است.

$$[۱۴] S_d = \frac{W - W_{cr}}{W_{cr}} = \frac{y - y_{cr}}{y_{cr}}$$

به وسیله این معادله می‌توان مقدار انحراف یک نظام از وضعیت پایدار را محاسبه کرد، که در مطالعه حاضر این مقدار برای نظام گندم ۴/۴۵ بود. تمامی محاسبات برای محصول پسته انجام شده است و مقادیر به دست آمده در جدول ۴ ارائه شده است (جدول ۴).

با جایگزینی تمامی مقادیر مشخص شده در موازنه آنروپی معادله ۸، مقدار آنروپی تولید شده در نظام گندم ۰/۳۳۶ گیگاژول در هکتار در کلون محاسبه شد. با انجام محاسبات معادله ۱۰، حداکثر انرژی ورودی مجاز به سیستم ۸/۵۶ گیگاژول در هکتار و با استفاده از معادله ۱۱، حداکثر عملکرد پایدار نظام تولیدی گندم ۱۳/۲۱ گیگاژول در هکتار به دست خواهد آمد.

برای تخمین میزان انحراف از وضعیت پایدار یک نظام، معیار زیر توسط استینبرن و اسویرثف (۲۰۰۰) معرفی شد:

جدول ۴- آنروپی اضافی تولید شده σ ، حداکثر انرژی مجاز ورودی W_{cr} ، حداکثر عملکرد در شرایط پایدار y_{cr} و معیار

انحراف از وضعیت پایدار S_d ، دو نظام تولیدی مجتمع گوهرکوه تفتان

نوع محصول	σ (GJ ha ⁻¹ K ⁻¹)	W_{cr} (GJ ha ⁻¹)	y_{cr} (GJ ha ⁻¹)	S_d
گندم	۰/۳۳۶	۸/۵۶	۱۳/۲۱	۴/۴۵
پسته	۱/۰۱	۳/۶۲	۲/۰۴	۱۳/۶۲

درصد افزایش یافت. در نتیجه، تولید آنروپی، که تأثیر کشاورزی بر محیط زیست را اندازه گیری می‌کند، تقریباً ۱۱ درصد کاهش یافت. انحراف از پایداری نیز تقریباً به همان میزان کاهش یافته است. به طور خلاصه نتایج آن‌ها پیشرفت آهسته نظام مورد مطالعه را به سمت یک نظام پایدار نشان داد. محصولات ذرت، جو دوسر و گندم از نقطه نظر شاخص آنروپی بر محیط زیست تأثیر منفی بر جای می‌گذارند اما چاودار، جو و کلزا حتی با افزایش بسیار کمی از آنروپی به دلیل بهبودهای تکنولوژیکی

مطالعه‌ای به منظور ارزیابی پایداری اکوسیستم‌های کشاورزی با استفاده از شاخص آنروپی در منطقه تحقیقاتی اکولوژی کیل واقع در شمال آلمان در طی سال‌های ۱۹۸۸ و ۱۹۹۷ انجام شد. این منطقه شامل زمین‌های زراعی، جنگل‌های نیمه طبیعی، سایر مناطق طبیعی و شهرک‌های روستایی است. به‌طور کلی نتایج نشان داد کل انرژی ورودی در یک بازه زمانی ۹ ساله تقریباً ۴۹ درصد کاهش یافت، با این وجود میانگین عملکرد در همان بازه زمانی به میزان ناچیزی تقریباً ۶

از تغییرات بی‌نظمی نظام‌های تولیدی کمک خواهد کرد. در نتیجه تصمیم‌گیری‌های مدیریتی آتی در مدیریت جریان‌های ورودی انرژی به این نظام‌ها را بهبود خواهد بخشید.

نتایج نشان داد با دو برابر شدن کود نیتروژن انحراف از وضعیت پایدار نظام گندم در حدود ۲۰ و پسته ۷ درصد افزایش یافت، همچنین با این رویکرد حداکثر عملکرد در شرایط پایدار نظام تولیدی گندم ۱۴ و نظام تولیدی پسته ۶ درصد با کاهش روبرو شد. این نتایج بیانگر این مطلب است که با افزایش جریان ورودی کود نیتروژن به نظام‌های تولیدی، آنتروپی تولیدی این نظام‌ها افزایش یافته و این نظام‌ها به سمت ناپایداری حرکت خواهند کرد. در نقطه مقابل با نصف شدن مقدار کود نیتروژن وارد شده به نظام‌ها، میزان انحراف از وضعیت پایداری نظام گندم و پسته به ترتیب در حدود ۱۱ و ۴ درصد کاهش یافت، از طرف دیگر حداکثر عملکرد در شرایط پایدار این نظام‌ها به همان ترتیب در حدود ۸ و ۳/۵ درصد افزایش یافت (جدول ۵). این نتایج نشان داد با مدیریت مناسب در ورودی‌های تجدید ناپذیر همانند کود نیتروژن که تأثیر زیادی در عملکرد نظام‌های تولیدی دارد، می‌توان علاوه بر کاهش دادن مقدار آنتروپی تولید شده در نظام و انحراف از وضعیت پایداری، حداکثر عملکرد در شرایط پایدار را بهبود بخشید. البته باید توجه داشت این مدیریت در جریان‌های انرژی ورودی تأثیری بر انرژی خروجی نظام نداشته باشد. همانطور که در مطالعه ساریخانی و امینی (۲۰۲۰)، به بررسی نقش کودهای زیستی در کشاورزی پایدار پرداخته شده است، نقش این کودها را در افزایش عملکرد گیاهان و بهبود حاصلخیزی خاک نشان می‌دهد، کودهای زیستی در نقطه مقابل کودهای شیمیایی قرار دارند، که استفاده از آنها نه تنها سبب افزایش پایداری بوم‌نظام‌های زراعی خواهد شد بلکه اثرات زیست محیطی کمتری نسبت به کودهای شیمیایی به همراه خواهد داشت.

(افزایش قابل توجه عملکرد در ازای انرژی ورودی کمتر) امکان حفظ تعادل آنتروپی را فراهم آورد (استینبرن و اسویرث ۲۰۰۰).

بر اساس نتایج حاضر مقدار آنتروپی تولید شده نظام تولیدی گندم در حدود ۶۷ درصد کمتر از مقدار آنتروپی تولید شده در نظام پسته می‌باشد. دلیل این امر این است که محصول گندم از انرژی ورودی کمتر و انرژی خروجی بیشتری نسبت به محصول پسته برخوردار است و این امر سبب کارایی انرژی بالاتر این محصول نسبت به محصول پسته بوده است. از اینرو مقدار آنتروپی تولید شده توسط این نظام تولیدی کمتر از نظام تولیدی پسته بوده است و بنابراین بر طبق این نتایج محصول گندم از نقطه نظر ترمودینامیکی نسبت به محصول پسته در وضعیت پایداری بهتر قرار دارد (جدول ۴).

۳.۳. تحلیل حساسیت

۳.۳.۱. تحلیل حساسیت جریان انرژی ورودی

در مطالعه حاضر کود نیتروژن به‌عنوان یک جریان ورودی انرژی که بخش بزرگی از انرژی ورودی به نظام‌های تولیدی را شامل می‌شود به‌عنوان متغیر تحلیل حساسیت انتخاب شد. در این بخش تغییرات خروجی مدل را با دوبرابر و نصف کردن مقادیر اولیه جریان انرژی ورودی کود نیتروژن محاسبه می‌کنیم. تغییر در جریان انرژی ورودی با فرض ثابت ماندن مقادیر انرژی خروجی در نظر گرفته شد که نوعی از تحلیل‌های حساسیت یک طرفه^۲ می‌باشد. تحلیل حساسیت یک طرفه شامل تغییر یک متغیر ورودی در یک زمان و در عین حال ثابت نگه داشتن سایر متغیرها، برای مشاهده تغییرات حاصل در خروجی است. این روش به شناسایی عواملی که بیشترین تأثیر را بر نتیجه دارند کمک می‌کند. ما با استفاده از این رویکرد تغییرات مقادیر آنتروپی و انحراف نظام‌ها از حالت پایدار نسبت به حالت اولیه را نشان خواهیم داد. استفاده از این روش به درک بهتر ما

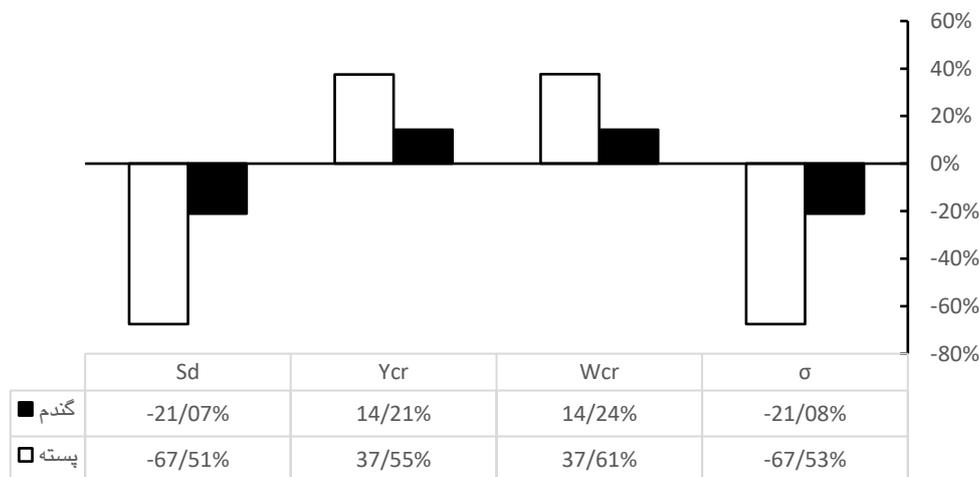
جدول ۵- نتایج تحلیل حساسیت ورودی کود نیتروژن بر شاخص‌های مورد بررسی دو نظام گندم و پسته مجتمع گوهرکوه تفنان

نوع محصول	نوع ورودی	تغییر متغییر	آنتروپی اضافی تولید شده (σ)		حداکثر انرژی مجاز ورودی (W_{cr})		حداکثر عملکرد در شرایط پایدار (Y_{cr})		معیار انحراف از وضعیت پایدار (S_d)	
			درصد تغییر (%)	($GJ ha^{-1} K^{-1}$)	درصد تغییر (%)	($GJ ha^{-1} K^{-1}$)	درصد تغییر (%)	($GJ ha^{-1} K^{-1}$)	درصد تغییر (%)	($GJ ha^{-1} K^{-1}$)
گندم	کود نیتروژن	دوبرابر شدن	+۲۰/۴	۰/۴۰۵	+۲۲/۴	۱۰/۴۹	-۱۴/۳	۱۱/۳۲	۵/۳۶	+۲۰/۴
	کود نیتروژن	نصف شدن	-۱۱/۰۱	۰/۳۰۳	-۱۶/۰۳	۷/۳۸	+۸/۱	۱۴/۳	۴	-۱۱/۰۱
پسته	کود نیتروژن	دوبرابر شدن	+۷/۷	۱/۰۹	+۳۴/۲	۴/۸۶	-۶/۷	۱/۹۰	۱۴/۶۸	+۷/۷
	کود نیتروژن	نصف شدن	-۳/۹۶	۰/۹۷	-۲۲/۹	۲/۹۴	+۳/۵	۲/۱۱	۱۳/۱	-۳/۹۴

۳.۴. تحلیل حساسیت شاخص برداشت

در این بخش ما با تغییر مقدار شاخص برداشت دو محصول مورد بررسی، تغییر نتایج خروجی مدل را بر متغیرهای مدل بررسی کرده‌ایم. برای رسیدن به این هدف، مقادیر شاخص برداشت محصولات گندم و پسته را به میزان ۱۰ درصد افزایش می‌دهیم، در نتیجه مقدار S طبق معادله $S = k(1-r)$ تغییر خواهد کرد. در نهایت مقادیر به دست آمده با مقادیر اولیه مقایسه شده و درصد تغییرات در شکل ۳، ارائه شده است (شکل ۳). نتایج نشان داد با افزایش ۱۰ درصد شاخص برداشت، مقدار آنتروپی تولید شده و انحراف از وضعیت پایدار گندم و پسته به ترتیب در حدود ۲۱ و ۶۷ درصد کاهش یافت. در نقطه مقابل، حداکثر انرژی مجاز ورودی و حداکثر عملکرد در شرایط پایدار به همان ترتیب در حدود ۱۴ و ۳۷ درصد

افزایش نشان داد. در میان این نتایج درصد حساسیت بالای شاخص‌های مورد بررسی نظام تولید پسته به افزایش ۱۰ درصدی شاخص برداشت به خوبی نشان داده شده است. از دلایل اختلاف شاخص برداشت محصول پسته با سایر محصولات زراعی می‌توان به دوره رشد متفاوت، باربری متناوب، دوره بلوغ طولانی‌تر، نیاز آبی و نیازهای تغذیه‌ای، عوامل اقلیمی، مدیریت آفات و بیماری متفاوت با سایر گیاهان زراعی اشاره کرد (کمالی و اوجی ۲۰۱۶ و خزری و همکاران ۲۰۲۰). این عوامل سبب کمتر بودن شاخص برداشت پسته نسبت به سایر محصولات زراعی بوده و در نتیجه افزایش ۱۰ درصدی در شاخص برداشت این محصول می‌تواند سبب کاهش ۶۷ درصدی مقدار آنتروپی تولید شده و انحراف از وضعیت پایدار توسط این نظام شود (شکل ۳).



شکل ۳- نتایج تحلیل حساسیت افزایش ۱۰ درصد شاخص برداشت محصولات بر شاخص‌های مورد بررسی در مطالعه

نتیجه‌گیری

به‌طور کلی نتایج این پژوهش نشان داد افزایش جریان انرژی ورودی به نظام‌های تولیدی سبب کاهش پایداری این نظام‌ها و افزایش مقدار آنتروپی تولید شده و کاهش حداکثر عملکرد در شرایط پایدار خواهد شد، که تمامی این موارد منجر به انحراف یک نظام از حالت پایدار در بلند مدت می‌شود. در مقابل کاهش جریان ورودی انرژی به نظام‌های تولیدی سبب افزایش پایداری این نظام‌ها، کاهش مقدار آنتروپی تولید شده و افزایش حداکثر عملکرد در شرایط پایدار خواهد شد که این موارد به حفظ پایداری یک نظام تولیدی در بلند مدت کمک خواهد کرد. معادله ۹ را می‌توان با قرار دادن مقدار $k(1-r)$ به جای S اینگونه بازنویسی کرد:

$$\sigma = \frac{1}{T} [w + (\frac{1}{k(1-r)} - 1)y] \quad [15]$$

همانطور که در پژوهش استینبرن و اسویرث (۲۰۰۰)، اشاره شده است، افزایش مقدار عملکرد گیاهان (شاخص برداشت بیشتر) مستلزم مقدار انرژی ورودی بیشتری به نظام‌های تولیدی خواهد بود. علاوه بر این نتایج تحلیل حساسیت این پژوهش نشان داد که هر چه مقدار انرژی ورودی افزایش یابد، آنتروپی تولید شده نیز افزایش یافته و نظام به سمت ناپایداری پیش خواهد رفت. اما طبق معادله ۹، چنانچه بتوان با مقدار انرژی ورودی کمتری بهره‌وری گیاه را افزایش داد می‌توان دستیابی به شرایط پایدار یک نظام در بلند مدت را تسهیل کرد. چندین راهکار برای کاهش مقدار انرژی ورودی به یک نظام تولید کشاورزی بدون به خطر انداختن کارایی وجود دارد:

۱- اجرای کشاورزی دقیق: استفاده از فناوری‌هایی مانند GPS، حسگرها و هواپیماهای بدون سرنشین برای اعمال دقیق ورودی‌ها مانند آب، کودها و آفت‌کش‌ها، در جهت کاهش ضایعات و بهینه سازی استفاده از منابع.

۲- خاکورزی حفاظتی: با به حداقل رساندن یا حذف کردن خاکورزی علاوه بر کاهش مصرف سوخت و فرسایش خاک، در عین حال می‌توان سلامت خاک و حفظ آب را بهبود بخشید.

۳- استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر: برای تامین انرژی عملیات مزرعه و کاهش اتکا به سوخت‌های فسیلی،

پنل‌های خورشیدی، توربین‌های بادی یا سایر سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر کمک شایانی خواهد کرد.

۴- بهینه سازی روش‌های آبیاری: استفاده از روش‌های آبیاری کارآمد مانند آبیاری قطره‌ای برای کاهش مصرف آب و انرژی و افزایش کارایی مصرف آب.

۵- بهبود ماشین آلات و تجهیزات: برای کاهش مصرف انرژی در طول کاشت، داشت، برداشت و سایر عملیات مزرعه، باید از ماشین‌آلات و تجهیزات پیشرفته‌تر و کارآمدتر در سوخت بهره برد.

۶- تناوب زراعی و افزایش تنوع: استفاده از تناوب زراعی و افزایش تنوع برای بهبود حاصلخیزی خاک، سبب کاهش نیاز به کودهای شیمیایی و مصنوعی و به حداقل رساندن نهاده‌های انرژی خواهد شد.

۷- استفاده از گیاهان پوششی

۸- اتخاذ مدیریت یکپارچه آفات (IPM): برای به حداقل رساندن استفاده از آفت‌کش‌های شیمیایی.

۹- ترویج جنگل زراعی و شیوه‌های اکولوژیکی کشاورزی: سبب افزایش تنوع زیستی، سلامت خاک و کاهش نیاز به نهاده‌های خارجی خواهد شد.

با اجرای این راهکارها، می‌توان میزان انرژی ورودی به نظام‌های تولید کشاورزی را کاهش داد و در عین حال کارایی و بهره‌وری را حفظ یا حتی بهبود بخشید.

در این پژوهش تحلیل حساسیت نشان داد با افزایش مقدار k ، مقدار آنتروپی تولید شده و انحراف از وضعیت پایدار نظام‌ها کاهش می‌یابد و در نقطه مقابل حداکثر انرژی مجاز ورودی و حداکثر عملکرد در شرایط پایدار افزایش خواهد یافت. به این ترتیب بر اساس معادله ۹، چنانچه بتوان شاخص برداشت یک محصول را بهبود بخشید، می‌توان به پایداری بیشتر آن نظام تولیدی در بلند مدت دست یافت. دستیابی به شاخص برداشت بالا در یک گیاه بدون افزایش جریان انرژی ورودی می‌تواند چالش برانگیز باشد، اما با مدیریت دقیق و بهینه سازی امکان پذیر است. چند راهکار برای دستیابی به این هدف وجود دارد:

از یک گیاه دست یافت و در نتیجه کارایی و پایداری عملکرد را به حداکثر رساند.

برای ارتقاء بهره‌وری انرژی در مجتمع کشت و صنعت گوهرکوه تفتان در استان سیستان و بلوچستان، راهکارهای ذیل با توجه به شرایط جغرافیایی و اقلیمی منطقه و خصوصیات هر کدام از نظام‌های تولیدی در مجتمع پیشنهاد می‌شود:

۱- با جایگزینی سیستم‌های سنتی با سیستم‌های مدرن و بهره‌گیری از فناوری‌های به‌روز، می‌توان بهره‌وری آب را در نظام‌های پسته به میزان قابل توجهی افزایش داد. این امر به طور همزمان کارایی بیشتر و افزایش صرفه‌جویی در انرژی را تضمین می‌کند.

۲- برداشت دستی پسته منجر به تلفات قابل توجه محصول قبل از رسیدن به ماشین آلات حمل و نقل می‌شود و تلفات بیشتری در طی مسیر چند مرحله‌ای حمل و نقل به قسمت فرآوری رخ می‌دهد. بهره‌گیری از تجهیزات مدرن برداشت و حمل و نقل مستقیم به قسمت فرآوری می‌تواند از این تلفات ناخواسته جلوگیری کند.

۳- با توجه به پتانسیل بالای بهره‌برداری از انرژی خورشیدی در شهرستان تفتان و اکثر مناطق استان سیستان و بلوچستان، استفاده از پنل‌های خورشیدی برای تولید برق در این مجموعه به دو دلیل کلیدی حائز اهمیت است. اولاً به کاهش انرژی‌های ورودی تجدید ناپذیر مجتمع و افزایش بازده کلی آن کمک خواهد کرد. ثانیاً با تکیه بیشتر به منابع انرژی تجدیدپذیر، پایداری سیستم‌های تولید مجتمع گوهرکوه تفتان در بلندمدت افزایش خواهد یافت.

سپاسگزاری

از همکاران محترم مجتمع کشت و صنعت گوهرکوه خاش که در انجام این تحقیق نهایت همکاری را داشتند تقدیر و تشکر می‌شود.

۱- انتخاب ژنتیکی: انتخاب گونه‌های گیاهی که از نظر ژنتیکی مستعد تولید نسبت بالاتری از عملکرد قابل برداشت هستند،

۲- تراکم کاشت بهینه: کاشت محصولات با تراکم بهینه می‌تواند منجر به استفاده بهتر گیاهان از منابع تولید (نور، دی اکسید کربن، آب و ...) و در نتیجه شاخص‌های برداشت بالاتر شود. این راهکار را می‌توان بدون افزایش جریان انرژی ورودی با برنامه‌ریزی دقیق و بهینه‌سازی فاصله بین گیاهان به‌دست آورد.

۳- مدیریت کارآمد مواد مغذی: شیوه‌های مدیریت دقیق و کارآمد مواد مغذی اطمینان می‌دهد که گیاه مواد مغذی لازم را برای رشد بهینه و تولید محصول دریافت می‌کند. استفاده از کودهای آهسته رهش یکی از راهکارهای نیل به این هدف است.

۴- مدیریت آب: اجرای روش‌های آبیاری کارآمد، مانند آبیاری قطره‌ای یا آبیاری دقیق، برای رساندن آب به‌طور مستقیم به منطقه ریشه گیاه، به حداقل رساندن هدر رفت آب و به حداکثر رساندن راندمان مصرف آب می‌تواند به حفظ شاخص‌های برداشت بالا بدون افزایش قابل توجه جریان انرژی ورودی کمک کند.

۵- مدیریت یکپارچه آفات و بیماری‌ها: این راهکارها می‌تواند شامل کنترل بیولوژیکی و استفاده از ارقام مقاوم برای حفظ شاخص‌های برداشت بالا بدون افزایش جریان انرژی ورودی باشد.

۶- زمان بهینه برداشت: برداشت محصولات در زمان بهینه می‌تواند نسبت عملکرد قابل برداشت را به حداکثر برساند و منجر به شاخص برداشت بالاتر شود. زمان‌بندی مناسب تضمین می‌کند که منابع گیاهی بدون افزایش جریان انرژی ورودی به طور موثر به بخش‌های قابل برداشت تخصیص یابد.

با اجرای این راهکارها می‌توان بدون افزایش قابل توجه جریان انرژی ورودی به شاخص برداشت بالایی

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>

- Asgharipour MR, Soleymanazizi F and Ramroudi M. 2014. Evaluation of Agro-Ecosystem Health Using Energy-Use Efficiency and Overproduction of Entropy. *Environmental Sciences*, 12(2): 1-10. (In Persian with English Abstract).
- Banerjee A, Jhariya MK, Meena RS and Yadav DK. 2021. Ecological footprints in agroecosystem: an overview. *Agroecological footprints management for sustainable food system*, 1-23. https://doi.org/10.1007/978-981-15-9496-0_1.
- Gerber JM. 1992. Farmer participation in research: A model for adaptive research and education. *American Journal of Alternative Agriculture*, 7(3): 118-121. <https://doi.org/10.1017/S0889189300004628>
- Ghorbani R, Mondani F, Amirmoradi S, Feizi H, Khorramdel S, Teimouri M, Sanjani S, Anvarkhah S and Aghel H. 2011. A case study of energy use and economical analysis of irrigated and dryland wheat production systems. *Applied energy*, 88(1): 283-288. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.04.028>
- Harwood RR. 2020. A history of sustainable agriculture. Pp: 3-19. In: *Sustainable agricultural systems*. CRC Press.
- Jorgensen SE. 2018. *Thermodynamics and ecological modelling*. CRC press.
- Kamali A and Owji A. 2016. Agro-ecological requirements for growing pistachio trees: A Literature. *Elixir Agric*, 96: 41450-41454.
- Khezri M, Heerema R, Brar G and Ferguson L. 2020. Alternate bearing in pistachio (*Pistacia vera* L.): A review. *Trees*, 34: 855-868. <https://doi.org/10.1007/s00468-020-01967-y>
- Külekçi M and Aksoy A. 2013. Input-output energy analysis in pistachio production of Turkey. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 32(1): 128-133. <https://doi.org/10.1002/ep.10613>
- Lan K and Yao Y. 2019. Integrating life cycle assessment and agent-based modeling: a dynamic modeling framework for sustainable agricultural systems. *Journal of Cleaner Production*, 238: 117853. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117853>
- Lewis GN, Randall M, Pitzer KS and Brewer L. 2020. *Thermodynamics*. Courier Dover Publications.
- Li, L., Lu, H., Ren, H., Kang, W., & Chen, F. 2011. Emergy evaluations of three aquaculture systems on wetlands surrounding the Pearl River Estuary, China. *Ecological Indicators*, 11(2): 526-534. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2010.07.008>
- Ministry of Agriculture-Jihad (a). <https://amar.maj.ir/page-amar/FA/65/form/pId3352#>
- Ministry of Agriculture-Jihad (b). <https://amar.maj.ir/page-amar/FA/65/form/pId28997>
- Mousavi-Avval SH, Rafiee S, Jafari A and Mohammadi A. 2011. Energy flow modeling and sensitivity analysis of inputs for canola production in Iran. *Journal of Cleaner Production*, 19(13): 1464-1470. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.04.013>
- Odum HT and Odum EC. 2000. *Modeling for all scales: an introduction to system simulation*. Elsevier.
- Odum HT. 1984. Energy Analysis of the Environmental Role in Agriculture. In: Stanhill, G. (eds) *Energy and Agriculture*. Advanced Series in Agricultural Sciences, vol 14. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-69784-5_3
- Odum HT. 1996. *Environmental Accounting-emergy for Environmental Decision Making*. John Wiley & Sons, Inc., New York, USA.
- Pretty JN, Morison JI and Hine RE. 2003. Reducing food poverty by increasing agricultural sustainability in developing countries. *Agriculture, ecosystems & environment*, 95(1): 217-234. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(02\)00087-7](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(02)00087-7)
- Pimentel D. 1980. *Handbook of Energy Utilization in Agriculture*. CRC Press, Boca Raton, FL. 475 pp.
- Rutledge RW, Basore BL and Mulholland RJ. 1976. Ecological stability: an information theory viewpoint. *Journal of Theoretical Biology*, 57(2): 355-371. [https://doi.org/10.1016/0022-5193\(76\)90007-2](https://doi.org/10.1016/0022-5193(76)90007-2)
- Sarikhani MR and Amini R. 2020. Biofertilizer in Sustainable Agriculture: Review on the Researches of Biofertilizers in Iran. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 30(1): 329-365. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.24764310.1399.30.1.20.1>

- Sciubba E. 2019. Exergy-based ecological indicators: from thermo-economics to cumulative exergy consumption to thermo-ecological cost and extended exergy accounting. *Energy*, 168: 462-476. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.11.101>.
- Shah SIA, Zhou J and Shah AA. 2019. Ecosystem-based Adaptation (EbA) practices in smallholder agriculture; emerging evidence from rural Pakistan. *Journal of cleaner production*, 218: 673-684. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.028>
- Soria-Lopez A, Garcia-Perez P, Carpena M, Garcia-Oliveira P, Otero P, Fraga-Corral M, Cao H, Prieto MA and Simal-Gandara J. 2023. Challenges for future food systems: From the Green Revolution to food supply chains with a special focus on sustainability. *Food Frontiers*, 4(1): 9-20. <https://doi.org/10.1002/fft2.173>
- Steinborn W and Svirezhev Y. 2000. Entropy as an indicator of sustainability in agro-ecosystems: North Germany case study. *Ecological Modelling*, 133(3): 247-257. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(00\)00323-9](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(00)00323-9)
- Svirezhev YM. 2000. Thermodynamics and ecology. *Ecological Modelling*, 132(1-2): 11-22. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(00\)00301-X](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(00)00301-X)
- Tait J and Morris D. 2000. Sustainable development of agricultural systems: competing objectives and critical limits. *Futures*, 32(3-4): 247-260. [https://doi.org/10.1016/S0016-3287\(99\)00095-6](https://doi.org/10.1016/S0016-3287(99)00095-6)
- Tian Z, Wang JW, Li J and Han B. 2021. Designing future crops: challenges and strategies for sustainable agriculture. *The Plant Journal*, 105(5): 1165-1178. <https://doi.org/10.1111/tpj.15107>
- Van't Hoff J H. 1899. *Lectures on Theoretical and Physical Chemistry*. Edward Arnold, London.
- Weisheil K. 1995. Kohlenstoffdynamik am gänzlich stundenort; untersuchen an 4 dominanten grasarten, kieler p. 141.
- Wu J.B, Xiao XM, Guan DX, Shi TT, Jin CJ and Han SJ. 2009. Estimation of the gross primary production of an old-growth temperate mixed forest using eddy covariance and remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*, 30(2): 463-479. <https://doi.org/10.1080/01431160802372143>

بیوست

جزئیات محاسبات مربوط به آنتروپی مازاد تولید شده σ ، حداکثر انرژی ورودی مجاز w_{cr} ، حداکثر عملکرد در شرایط پایدار y_{cr} و میزان انحراف از وضعیت پایدار S_d ، نظام‌های تولیدی مجتمع گوهرکوه تفتان

1. Wheat

$$1.1: \sigma = \frac{1}{T} \left(w + \frac{1-s}{s} y - P_0 \right); \sigma = \frac{1}{2.20E+10} \left(4.67E+10 + \frac{1-0.496}{0.496} 7.20E+10 - 2.20E+10 \right) = 3.36E+08 \text{ GJ ha}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

$$1.2: w_{cr} = \frac{P_0}{1-\eta+\left(\frac{1}{s}\right)}; w_{cr} = \frac{2.20E+10}{1-1.6057+\left(\frac{1.6057}{0.496}\right)} = 8.56E+09 \text{ GJ ha}^{-1}$$

$$1.3: y_{cr} = \frac{\left(\frac{1}{s}\right)+\left(\frac{1}{\eta}\right)-1}{\left(\frac{1}{0.496}\right)+\left(\frac{1}{1.6057}\right)-1}; y_{cr} = \frac{1.32E+10}{1} = 1.32E+10 \text{ GJ ha}^{-1}$$

$$1.4: S_d = \frac{W-w_{cr}}{w_{cr}} = \frac{y-y_{cr}}{y_{cr}}; S_d = \frac{(4.67E+10)-(8.56E+09)}{8.56E+09} = 4.45$$

2. Pistachio

$$2.1: \sigma = \frac{1}{T} \left(w + \frac{1-s}{s} y - P_0 \right); \sigma = \frac{1}{2.20E+10} \left(5.30E+10 + \frac{1-0.1}{0.1} 2.99E+10 - 2.20E+10 \right) = 1.01E+09 \text{ GJ ha}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

$$2.2: w_{cr} = \frac{P_0}{1-\eta+\left(\frac{1}{s}\right)}; w_{cr} = \frac{2.20E+10}{1-0.5586+\left(\frac{0.5586}{0.1}\right)} = 3.62E+09 \text{ GJ ha}^{-1}$$

$$2.3: y_{cr} = \frac{\left(\frac{1}{s}\right)+\left(\frac{1}{\eta}\right)-1}{\left(\frac{1}{0.1}\right)+\left(\frac{1}{0.5586}\right)-1}; y_{cr} = \frac{2.04E+09}{1} = 2.04E+09 \text{ GJ ha}^{-1}$$

$$2.4: S_d = \frac{W-w_{cr}}{w_{cr}} = \frac{y-y_{cr}}{y_{cr}}; S_d = \frac{(5.30E+10)-(3.62E+09)}{3.62E+09} = 13.62$$