Agricultural Economics and Development
Vol.32, No.125, Spring 2024

Research Paper

Energy Efficiency and Ecological Footprint Analysis of Tomato Production Farms in Asadabd County of Iran

M. Abdolmaleky [1], M. Najafi [2], K. Naderi Mahdiei [3]

Received: 9 August, 2023 Accepted: 9 March, 2024

Introduction: In modernization era, high consumption level and improper use of external agricultural inputs (fertilizers, pesticides, and fuels), particularly in developing countries, have resulted in different consequences such as climate change, water pollution, or natural resource depletion. For example, agriculture is responsible for approximately 20 percent of greenhouse gas emissions. Iran is the largest emitter of greenhouse gases in the Middle East. Hence, over recent years, evaluating environmental capacities and studying environmental impacts of agricultural production have increased. One important facet of studying agricultural systems is to evaluate their sustainability. One of the most important quantitative models of measuring sustainability is the ecological footprint known as an accounting metric, which assesses humanity's pressure on natural resources and situates consumption levels within the Earth's ecological limits. Due to the increase in population and demand for agricultural products, creating new forms of energy in the agricultural sector and improper use of inputs, this economic sector has become an energy consuming sector. So far, various studies have been conducted to measure energy efficiency in the agricultural sector. Despite the fact that a large proportion of tomato production in the Hamedan province of Iran is related to Asadabad County, there seems to be no clear attention to sustainability status of agricultural operations. Therefore, this study aimed at studying the ecological footprint and energy efficiency to assess sustainability of the tomato production in Asadabad as a main tomato producer in the west Iran. The specific

1 . Corresponding Author and Assistant Professor, Department of Agriculture, Khorramabad Branch, Islamic Azad University, Khorramabad, Iran (Mo.Abdolmaleky@iau.ac.ir).
2. MSc. Graduate in Agricultural Extension and Education, Department of Agricultural Extension and Education, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.
3. Associate Professor, Department of Agricultural Extension and Education, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

DOI: 10.30490/AEAD.2024.363151.1544

objectives of the study included: (1) Describing the demographic and technical profile of tomato producers, (2) Evaluating the energy efficiency regarding the inputs and products, and (3) Estimating the direct and indirect ecological footprint of tomato production to identify the most crucial production inputs in terms of pollutant emissions.

Materials and Methods: The ecological footprint (EF) has become a popular indicator since it was first introduced in a publication in the 1990s**.** Based on energy consumption, the place-oriented method was used, and therefore, consumption-based EF as well as direct and indirect EF were calculated. Global hectares approach was used to measure the ecological footprint unit. In addition, according to energy input and output resulting from the consumption of inputs and from the products, energy efficiency was estimated. The study was conducted in a descriptive-survey research method using a questionnaire, and a sample of 210 tomato producers was randomly selected. To estimate the energy consumption, equivalence factors ($E_q F$) were used to estimate the amount of energy produced from each of the inputs and outputs. The ecological footprint was defined as the sum of real and virtual lands directly or indirectly related to crop production, and were required to absorb CO_2 emitted by that production, which was expressed in Equation (1), where EF_{real} showed the land occupied over time by croplands, built area, pastures and forests for crop production, and was calculated by Equation (2), in which A_a represented the amount of occupied land with type *a* (cropland, forest, pasture, built area), $\sum_a A_a$ equaled one while $E_q F_a$ resembled the equivalence factor for land type a, $E_q F_a$ was equal to 2/2. EF_{co2} showed the amount of forest required for absorbing CO_2 emitted during the product's lifecycle, which was calculated by Equation (3), where E_i represented the amount of energy consumption by inputs in GJ ha^{-1}, E_p was the ability of a hectare of forest land to absorb carbon released from energy equal to 71 GJ petroleum:

$$EF = EF_{real} + EF_{co2} \quad (1)$$

$$EF_{real} = \sum_a A_a \cdot E_q F_a \quad (2)$$

$$EF_{co2} = \frac{E_i}{E_p} \quad (3)$$

Energy efficiency and productivity indices were estimated as shown in the following equations:

$$\text{Energy efficiency index}_{\text{tomato}} = \frac{\text{energy output (MJ ha}^{-1})}{\text{energy input (MJ ha}^{-1})} \quad (4)$$

$$\text{Energy productivity index}_{\text{tomato}} = \frac{\text{tomato output (Kg ha}^{-1})}{\text{energy input (MJ ha}^{-1})} \quad (5)$$

Results and Discussion: Results of the EF analysis showed that the EF_{co2} was estimated at 1/42 gha and the consumption-based EF was measured to be 7.57 gha. Accordingly, an area of 1/42 ha of productive land would be needed to meet the challenge of bio-capacity reduction. The total energy consumption was more than the ecological capacity of the required land to produce tomato per hectare, indicating the unsustainability of potato production regarding the environmental impacts. Energy efficiency and productivity indices from the ratio of energy output and tomato yield to energy input resulted from inputs, especially electricity with 38.9 percent, nitrogen fertilizer with 26.9 percent and gasoline with 15.2 percent, a total of 81 percent, were calculated equal to 0.34 and 0.42 MJ, respectively. In the EF_{co2} and the consumption-based EF, the highest share belonged to electricity, nitrogen fertilizer, and gasoline, respectively. Thus, due to the emission of pollutants, because of irregular and unprincipled consumption of inputs, tomato production in Asadabad County was found to be ecologically unsustainable.

Conclusions: The study findings implied that lower use of electricity, fertilizers and gasoline could play a significant role in mitigating the environmental impacts of tomato production. Due to the water shortage in the studied region, and high consumption of electricity for electric irrigation pumps, strategies such as using high efficiency pumps, regular technical repair of equipment, use of ponds and tanks to store water, allocating low-interest facilities to farmers to use modern irrigation methods and encouraging them to integrate their farms are recommended. About the high consumption level of chemical fertilizers, strategies such as increase in the use of organic and compost fertilizers, compliance with the permissible limit, and also using non-chemical methods such as biological control to prevent pests' resistance to chemical toxins are recommended as well. Regarding the high consumption level of gasoline, use of combined and advanced machinery to reduce the plowing operations, and technical inspection of agricultural machinery for lower and optimal fuel consumption are also recommended.

Keywords: *Energy Input, Energy Output, Direct Ecological Footprint, Indirect EF, Energy Efficiency*

JEL Classification: Q40, Q56, Q57

اقتصاد کشاورزی و توسعه

سال ۳۲، شماره ۱۲۵، بهار ۱۴۰۳

مقاله پژوهشی

تحلیل کارآیی انرژی و ردپای بوم‌شناختی مزارع تولید گوجه‌فرنگی در شهرستان اسدآباد

محمد عبدالملکی[۱]، مهدی نجفی[۲]، کریم نادری مهدیی[۳]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۱۹

چکیده

مطالعه جنبه‌های زیست‌محیطی نظام‌های زراعی بسیار اهمیت دارد. از این‌رو، هدف پژوهش حاضر ارزیابی پایداری زیست‌محیطی تولید گوجه‌فرنگی در شهرستان اسدآباد بود که با بهره‌گیری از روش‌های ارزیابی ردپای بوم‌شناختی و کارآیی انرژی انجام شد. نمونه آماری پژوهش متشکل از ۲۱۰ گوجه‌فرنگی‌کار بود که از جامعه آماری شامل ۵۶۹ گوجه‌فرنگی‌کار به‌صورت تصادفی انتخاب شدند. رویکرد پژوهش حاضر کاربردی و روش آن پیمایشی با واحد تحلیل مزرعه بود. اطلاعات مورد نیاز پژوهش با استفاده از پرسشنامه و مصاحبه رو در رو جمع‌آوری شد. روایی پرسشنامه از طریق روایی ظاهری و محتوایی و پایایی آن با روش پیش‌آزمون- پس‌آزمون تعیین شد. نتایج مطالعه نشان داد که شاخص کارآیی و بهره‌وری انرژی به‌دست‌آمده از نسبت انرژی خروجی حاصل از محصول گوجه‌فرنگی به انرژی‌های ورودی ناشی از نهاده‌های مصرفی به‌ویژه برق با ۳۸/۹ درصد، کود ازته با ۲۶/۹ درصد و گازوئیل با ۱۵/۲ درصد، (در مجموع، ۸۱ درصد)، به‌ترتیب، برابر با ۰/۳۴ و

۱- نویسندهٔ مسئول و استادیار ترویج و آموزش کشاورزی، گروه کشاورزی، واحد خرم آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، خرم آباد، ایران. (Mo.Abdolmaleky@iau.ac.ir)

۲- دانش‌آموختهٔ کارشناسی ارشد ترویج و آموزش کشاورزی، گروه ترویج و آموزش کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.

۳- دانشیار ترویج و آموزش کشاورزی، گروه ترویج و آموزش کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.

DOI: 10.30490/AEAD.2024.363151.1544

۰/۴۲ مگاژول است. عامل اصلی پایین بودن کارآیی و بهره‌وری انرژی، مصرف بی‌رویه نهاده‌ها به‌ویژه برق و کودهای ازته است. افزون بر این، ردپای بوم‌شناختی تولید گوجه‌فرنگی ۳/۶۲ هکتار جهانی (ردپای مستقیم ۲/۲ و غیرمستقیم ۱/۴۲ هکتار جهانی) برآورد شد؛ به دیگر سخن، ۱/۴۲ هکتار زمین بهره‌ور جهانی لازم است تا آلاینده‌های تولیدشده در اثر تولید گوجه‌فرنگی را جذب کند. یافته‌های تحقیق نشان‌دهنده عدم پایداری تولید گوجه‌فرنگی در شهرستان اسدآباد بر اثر تولید و انتشار آلاینده‌های ناشی از کاربرد بی‌رویه و غیراصولی نهاده‌ها است. با توجه به میزان مصرف بالای برق در پمپ‌های آبیاری می‌توان با انتخاب پمپ‌ها و موتورهای با راندمان بالا، سرویس و تعمیر مرتب تجهیزات، آبیاری در ساعات غیر پیک، استفاده از کانالهای بتونی بجای کانالهای سنتی موجود، استفاده از استخر و مخازن ذخیره آب و تبدیل سامانه‌های آبیاری سنتی به سامانه‌های تحت فشار، مصرف این نهاده را کمتر کرد. همچنین، از طریق به‌کارگیری انواع نهاده‌های آلی و ارگانیک و روش‌های مبارزه زیست‌شناختی (بیولوژیک) با آفات (گل جالیز گوجه‌فرنگی) به‌جای مصرف انواع نهاده‌های شیمیایی و نیز استفاده از ادوات ترکیبی و پیشرفته کشاورزی برای کاهش عملیات زراعی و بررسی و معاینه فنی ماشین‌آلات کشاورزی و در نتیجه، مصرف کمتر گازوئیل، می‌توان اثرات زیست‌محیطی این نظام تولیدی را کاهش داد؛ همچنین، برای بهبود کارآیی و بهره‌وری انرژی، جایگزینی بذرهای اصلاح‌شده به‌جای بذور محلی توصیه می‌شود.

کلیدواژه‌ها: *انرژی ورودی، انرژی خروجی، ردپای مستقیم، ردپای غیرمستقیم، کارآیی انرژی.*

طبقه‌بندی JEL : Q40, Q56, Q57

مقدمه

افزایش جمعیت، افزایش تقاضا برای غذا و افزایش استانداردهای زندگی تغییر در عملیات‌های کشاورزی را ضروری ساخته و سبب افزایش استفاده از نهاده‌های بیرونی همچون سوخت، برق، کودهای شیمیایی و سموم در بخش کشاورزی شده است (Esengun et al., 2007; Yousefi et al., 2014). بر اساس برآوردهای موجود، پنجاه درصد افزایش عملکرد در سطح جهان در طول این قرن مرهون به‌کارگیری کودهای شیمیایی بوده است (Yara International, 2023). بر اساس داده‌های گردآوری‌شده از ۴۲ کشور آسیایی و عمدتاً در حال توسعه، میانگین مصرف کودهای شیمیایی در این کشورها برابر با ۲۵۷/۹ کیلوگرم در هکتار و میانگین جهانی آن برای ۱۶۱ کشور مورد مطالعه برابر با ۱۸۰/۱ کیلوگرم در هکتار در زمین‌های زراعی است (Global Economy, 2023). مصرف سموم، کودها، ماشین‌آلات و برق در تولید محصولات کشاورزی، گرچه سبب افزایش عملکرد و ارتقای کیفیت محصولات کشاورزی شده، ولی آثار مخرب زیست‌محیطی را به‌دنبال داشته است. پدیده تغییر اقلیم و گرمایش جهانی در اثر انتشار گازهای گلخانه‌ای از مهم‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی جهان امروز بوده، زندگی آینده روی کره زمین را به مخاطره انداخته است (Mohammadi and Omid, 2010). بخش کشاورزی سهمی به‌سزا در

انتشار گازهای گلخانه‌ای و در نتیجه، گرمایش جهانی دارد، به‌گونه‌ای که تقریباً بیست درصد از انتشار گازهای گلخانه‌ای به بخش کشاورزی مرتبط می‌شود (USEPA, 2016). سهم بخش کشاورزی ایران در انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلاینده N_2O، SO_2، CO_2 ، NOx و CH_4، به‌ترتیب، معادل ۳۲/۲۵ ، ۵/۷۴، ۲/۶۴، ۲/۶۳ و ۱/۰۵ درصد برآورد شده است (MOE, 2023). آلاینده‌های کشاورزی مانند کودها، آفت‌کش‌ها، نمک‌ها و عناصر کمیاب ناشی از فعالیت‌های مختلف مانند آبیاری و کاربرد این نهاده‌ها از طریق فرسایش خاک و آب‌شویی مواد مغذی و مواد شیمیایی سبب تنزل کیفی محیط زیست می‌شود؛ در نتیجه، کشاورزی یکی از بزرگ‌ترین منابع آلودگی پراکنده شناخته می شود (Vanden Bergh and Grazi, 2014).

از آنجا که هر گونه فعالیتی برای ارتقای کیفیت زندگی و توسعه انسانی در محیط زیست تحقق می‌یابد، وضعیت محیط زیست و منابع آن از نظر پایداری یا ناپایداری بر فرآیند توسعه تأثیرگذار است. بدین ترتیب، ابزار و روش‌هایی نیاز است تا به کمک آنها، پایداری زیست‌محیطی نظام‌های کشاورزی ارزیابی و اندازه‌گیری شود (Cerutti et al., 2010). با گسترش مفهوم توسعه پایدار در سطح جهان، دانشمندان به ارائۀ مدل‌های کمی و کیفی متعدد برای ارزیابی پایداری نظام‌های کشاورزی و اثرات زیست–محیطی مخرب آنها در سطح مزرعه پرداخته‌اند. شاخص ردپای بوم‌شناختی[1] از مهم‌ترین مدل‌های کمی اندازه‌گیری پایداری است. ردپای بوم‌شناختی یک شاخص پیچیده برای اندازه‌گیری منابع قابل استفاده در سطح مزرعه است که از طریق تبدیل مواد و منابع مورد مصرف در مزرعه و نشان دادن نتایج بر اساس رویکرد هکتار جهانی[2]، که به‌ویژه با نظام‌های کشاورزی مرتبط است، برآورد می‌شود (Crishna, 2007). برای محاسبه ردپای بوم‌شناختیی، دو روش اصلی وجود دارد: ارزیابی چرخه زندگی[3] و تجزیه‌وتحلیل ورودی–خروجی[4] (Agostinho and Pereira, 2013). این روش‌ها مورد انتقاد قرار گرفته‌اند، زیرا ارزیابی ردپای بوم‌شناختیی نیازمند رویکردی متفاوت در سطح کلان در مقایسه با سطوح خرد مانند یک شهر و استان و برای فعالیت‌های کشاورزی خاص و تولید محصول در مزرعه است. بنابراین، در دهه اول قرن بیست‌ویکم، رویکرد مکان‌گرا[5] به‌عنوان یک روش جدید ردپای بوم‌شناختیی توسط دانشمندانی مانند کیسینجر و گوتلیب (Kissinger and Gottlieb, 2012) و گوزمن و همکاران (Guzman et al., 2013) پیشنهاد شد. این روش، با ادغام دو شیوۀ قبلی، بر یک مکان خاص تمرکز

1. ecological footprint analysis
2. global hectare approach
3. life cycle assessment
4. input and output analysis
5. place-oriented approach

می‌کند. در برخی مطالعات (Cheng et al., 2011; Dong et al., 2013; Tittonell and Giller, 2013)، از ردپای بوم‌شناختیی برای ارزیابی پایداری تولیدات کشاورزی بر اساس مصرف انرژی و میزان محصول تولیدی استفاده شده است. مطالعات دیگری نیز پایداری کشاورزی را با استفاده از تحلیل ردپای بوم‌شناختیی به روش‌های مختلف ارزیابی کرده‌اند؛ برای نمونه، آکیفدستک و سرکودی (Akifdestek and Sarkodie, 2019)، دشتی و همکاران (Dashti et al., 2019) و اصفهانی و همکاران (Esfahani et al., 2017) به برآورد ردپای بوم‌شناختیی با استفاده از تحلیل ورودی- خروجی پرداختند. همچنین، در برخی پژوهش‌ها (Gan et al., 2011; Khorramdel et al., 2016)، ردپای بوم‌شناختیی کشاورزی و تناسب آن بر اساس ارزیابی چرخه زندگی بررسی شده است. حبیبی و همکاران (Habibi et al., 2018) و کنچاناروک و اسلم (Kanchanaroek and Aslam, 2018) نیز برای تخمین ردپای بوم‌شناختیی و مطالعه پایداری کشاورزی از رویکرد مکان‌گرا استفاده کرده‌اند. در ایران، از سال ۱۹۶۱ تا به امروز، چندان روند کاهندهٔ ظرفیت زیستی مشاهده نشده، اما مقدار ردپای بوم‌شناختی با روندی فزاینده و پرشتاب همراه بوده است که بر اثر آن، از سال ۱۹۸۰ به بعد، مقدار ردپای بوم‌شناختی ایران بیش از ظرفیت زیستی شده و کسری بوم‌شناختی در کشور رخ داده است (Rezaei et al., 2019). از سوی دیگر، به‌دلیل کاربرد بی‌رویه و نادرست نهاده‌های کشاورزی، این بخش اقتصادی به بخش مصرف‌کننده انرژی تبدیل شده است (Dekamin, 2021). مهار مصرف انرژی، افزایش استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و افزایش کارآیی مصرف انرژی از اجزای مهم اقدام در راستای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای است. استفاده کارآمد از انرژی سبب کاهش آسیب‌های زیست‌محیطی، صرفه‌جویی‌های اقتصادی و افزایش سودآوری تولیدات کشاورزی خواهد شد و از این‌رو، یکی از اصول کشاورزی پایدار به‌شمار می‌رود (Mobtaker et al., 2012).

کارآیی یکی از شاخص‌های مهم در ارزیابی کمی فعالیت‌های اقتصادی است که به نسبت‌های ورودی و خروجی یک نظام اقتصادی مربوط می‌شود. کارآیی اقتصادی به‌عنوان درجه موفقیت بهره‌بردار در حداقل‌سازی هزینه تولید میزانی معین از محصول بیان می‌شود که شامل دو بخش تخصیصی یا قیمتی و فنی است. کارآیی تخصیصی به مصرف بهینه منابع با توجه به قیمت آنها و کارآیی فنی به نحوه استفاده از منابع موجود اشاره دارد (Farrell, 1957).

تاکنون، مطالعات مختلف با استفاده از شاخص‌های ردپای بوم‌شناختیی و کارآیی انرژی در ارتباط با محصول گوجه‌فرنگی و سایر محصولات کشاورزی انجام شده است که در پی، به برخی از آنها اشاره می‌شود.

اصفهانی و همکاران (Esfahani et al., 2017)، در مطالعه خود با عنوان «کارآیی و پایداری تولید ذرت علوفه‌ای با استفاده از تحلیل پوششی داده‌ها و ردپای بوم‌شناختیی چندکارکردی در شهرستان سرایان»، به بررسی انواع کارآیی شامل کارآیی فنی، فنی خالص و کارآیی مقیاس و نیز با محاسبه شاخص ردپای بوم‌شناختی مستقیم و غیرمستقیم، ردپا بر اساس میزان محصول و ردپا بر اساس درآمد، به مطالعه پایداری تولید این محصول پرداخته‌اند. عبدالملکی و همکاران (Abdolmaleky et al., 2022)، در مطالعه خود با عنوان «ارزیابی پایداری زیست‌محیطی: تولید سیب‌زمینی در غرب ایران»، با استفاده از رویکرد مکان‌گرا، شاخص ردپای بوم‌شناختیی کربن، شاخص ردپا بر مبنای نهاده‌ها و نیز ردپا بر مبنای محصول را محاسبه و پایداری تولید محصول سیب‌زمینی را ارزیابی کرده‌اند. در مطالعه‌ای دیگر، با عنوان «بررسی پایداری تولید سیب‌زمینی و خیار با روش ردپای بوم‌شناختی در شهرستان بهار»، رضایی و همکاران (Rezaei et al., 2019)، شاخص ردپای بوم‌شناختیی برا ساس رهیافت مصرف انرژی محاسبه و پایداری تولید این دو محصول ارزیابی شده است. در پژوهش نادری مهدیی و همکاران (Naderi Mahdiei et al., 2015)، با عنوان «ارزیابی پایداری نظام‌های زراعی در استان همدان با استفاده از تحلیل ردپای بوم‌شناختی (مورد مطالعه: گندم آبی)»، با به‌کارگیری روش مصرف انرژی و رویکرد مکان‌گرا ارئه‌شده توسط کیسینجر و گوتلیب (Kissinger and Gottlieb, 2012) و گوزمن و همکاران (Guzman et al., 2013)، به سنجش و ارزیابی شاخص ردپای بوم‌شناختی در نظام‌های کشاورزی مرسوم و حفاظتی و مقایسه پایداری تولید گندم در این دو نظام زراعی پرداخته‌اند. افزون بر این، مطالعات دیگری نیز در همین زمینه انجام شده، که از آن جمله‌اند: مصـرف انـرژی در تولید گوجه‌فرنگی در استان توکات ترکیه (Esengun et al., 2007)، ارزیابی راندمان انرژی در زراعت گوجه‌فرنگی استان آذربایجان (Hassanzadeh et al., 2008)، بررسی الگوی مصرف انرژی تولید گوجه‌فرنگی در شهرسـتان مرنـد (Jadidi et al., 2012)، ارزیابی انرژی و تحلیل اقتصادی و اثرات زیست‌محیطی تولید گوجه‌فرنگی و خیار تحت کشت فضای باز و گلخانه در استان فارس (Zarei, 2017)، مطالعه مصرف انرژی و هزینه نهاده‌های تولید پنبه در ترکیه (Yilmaz et al., 2005) و بررسی الگوی مصرف انرژی تولیدکنندگان سبزی گلخانه‌ای در آنتالیا (Canakci and Akinci, 2006).

اسدآباد یکی از شهرستان‌های استان همدان و واقع در غرب این استان است. این شهرستان در تولیدات شاخص مانند گوجه‌فرنگی در رتبه اول استان قرار گرفته است. هر ساله بیش از هفتاد درصد از سطح زیر کشت این محصول در استان همدان به شهرستان اسدآباد اختصاص دارد (HAJO, 2021). با توجه به متداول بودن کشت گوجه‌فرنگی و ناشناخته بودن وضعیت پایداری تولید آن در این شهرستان،

تحقیق حاضر به بررسی پایداری زیست‌محیطی تولید این محصول در شهرستان اسدآباد با استفاده از شاخص کارآیی انرژی و ارزیابی ردپای بوم‌شناختی پرداخته است تا راهکارهای لازم برای مدیریت پایدار آن در اختیار برنامه‌ریزان و سیاست‌گذاران بخش قرار گیرد. بر اساس محدودیت‌های بخش کشاورزی منطقه، ارتقای کارآیی تولید محصولات کشاورزی عاملی مهم و تاثیرگذار در بهبود بهره‌وری عوامل تولید بدون نیاز به هزینه اضافی است. از این‌رو، مطالعه و توجه به ارتقای بهره‌وری حتی در مقوله توسعه پایدار نیز یک عنصر کلیدی در میان اهداف زیست‌محیطی تلقی می‌شود. تحلیل کارآیی و بهره‌وری تولید و ترکیب و تلفیق آن با شاخص‌های ارزیابی پایداری زیست‌محیطی روشی جدید و در حال تکامل است که در تحقیق حاضر، بدان پرداخته می‌شود. اهداف اختصاصی تحقیق عبارت‌اند از: ۱) شناسایی ویژگی‌های فردی و فنی گوجه‌فرنگی‌کاران، ۲) ارزیابی کارآیی انرژی‌های ورودی و خروجی حاصل از مصرف نهاده‌ها و محصول تولیدی و ۳) برآورد ردپای بوم‌شناختی محصول گوجه‌فرنگی بر اساس مصرف نهاده‌ها، ردپای مستقیم و غیرمستقیم و تعیین مهم‌ترین نهاده‌های تولید از نظر انتشار آلاینده‌ها.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه و جمع‌آوری داده‌ها

در پژوهش حاضر، اسدآباد به‌عنوان یکی از شهرستان‌های استان همدان منطقهٔ مورد مطالعه است. گوجه‌فرنگی یکی از محصولات مهم جالیزی این شهرستان است که هرساله در نزدیک به پانصد تا هزار و پانصد هکتار کشت می‌شود. میانگین تولید محصول از هر هکتار سطح زیر کشت گوجه‌فرنگی به‌طور متوسط پنجاه تن بوده و نود درصد از کشت‌های اراضی گوجه‌فرنگی این شهرستان به‌صورت آبیاری قطره‌ای است. همچنین، بیست درصد از محصول گوجه‌فرنگی اسدآباد به رُب‌پزی خانگی اختصاص دارد و بقیهٔ محصول به مراکز کارخانه‌های تولید رُب ارسال می‌شود (HAJO, 2021).

مطالعهٔ حاضر از نوع تحقیقات کاربردی و مبتنی بر روش توصیفی با راهبرد پیمایشی بوده و در آن، از ابزار پرسشنامه، مصاحبه رو در رو و منابع کتابخانه‌ای استفاده شده است. با بهره‌گیری از پرسشنامه محقق‌ساخته شامل شصت سؤال باز و بسته در مورد ویژگی‌های فردی، مالکیت زمین و مقدار مصرف نهاده‌های کشاورزی از قبیل بذر، کودها، سموم، نیروی کار، سوخت، برق و آب در تمامی مراحل کشت گوجه‌فرنگی، اطلاعات لازم جمع‌آوری شد. با توجه به آمار و اطلاعات به‌دست‌آمده از مدیریت جهاد کشاورزی اسدآباد، جامعه آماری تحقیق شامل ۵۶۹ گوجه‌فرنگی‌کار با سطح زیر کشت ۶۵۶ هکتار بوده که برای تعیین حجم نمونه، پس از انجام پیش‌آزمون در یک نمونه سی‌نفره از گوجه‌فرنگی‌کاران، از

رابطهٔ کوکران در قالب رابطه (۱) استفاده شده است. بر این اساس، نمونه آماری تحقیق ۲۰۶ نفر محاسبه شده که برای کسب نتایج دقیق‌تر، این تعداد به ۲۱۰ نفر افزایش یافته است:

$$n=\frac{\frac{z^2pq}{d^2}}{1+\frac{1}{N}\left(\frac{z^2pq}{d^2}-1\right)}=\frac{\frac{1/96^2*0/70*0/30}{0/05^2}}{1+\frac{1}{569}\left(\frac{1/96^2*0/70*0/30}{0/05^2}-1\right)}=206 \qquad (۱)$$

در رابطه (۱)، n حجم نمونه، N حجم جامعهٔ آماری، d دقت احتمالی مطلوب، t مقدار ضریب اطمینان قابل قبول، p درصد افراد دارای صفت موجود در جامعه و q درصد افراد فاقد آن صفت در جامعه است (Naderi Mahdiei et al., 2015).

روایی ابزار تحقیق با استفاده از پانل کارشناسان متشکل از اساتید رشته‌های ترویج و آموزش کشاورزی و توسعه روستایی دانشگاه بوعلی سینا همدان و میزان پایایی پرسشنامه با استفاده از روش پیش‌آزمون- پس‌آزمون به‌دست آمده و برای تحلیل داده‌ها و آمار توصیفی نیز از نرم‌افزار SPSS(26) استفاده شده است. ارزیابی و سنجش پایداری زیست‌محیطی تولید گوجه‌فرنگی با استفاده از روش ردپای بوم‌شناختی، به‌ترتیب، شامل ردپای بوم‌شناختی بر حسب مصرف نهاده‌ها، ردپای مستقیم و غیرمستقیم و همچنین، تحلیل کارآیی انرژی صورت گرفته است.

ارزیابی ردپای بوم‌شناختی

از زمان معرفی پایداری و مدیریت زیست‌محیطی، مطالعات زیادی برای ارائه شاخص‌های مرتبط به‌منظور کمک به تصمیم‌گیران، برنامه‌ریزان و به‌ویژه محیط‌بانان انجام شده و توسعه یافته است. یکی از این شاخص‌ها که توجه بیشتری را در سطوح علمی و دانشگاهی، سیاسی و آموزشی به خود جلب کرده، ارزیابی ردپای بوم‌شناختی است (Fatemi et al., 2018). مفهوم ردپای بوم‌شناختی، نخست، از سوی پروفسور ریس و دکتر واکرناگل در اوایل دهه ۱۹۹۰ و در دانشگاه بریتیش کلمبیا مطرح شد (Habibi et al., 2018). ردپای بوم‌شناختی، با ارزیابی انرژی و مواد مورد استفاده در یک شهر، منطقه یا کشور، به برآورد فشاری می‌پردازد که جمعیت و فرآیندهای صنعتی بر زیست‌بوم وارد می‌کنند (Toth et al., 2018) و به‌عنوان رهیافت و روشی برای تعیین میزان پایداری یا ناپایداری فعالیت‌ها، مناطق یا کشورها معرفی شده است (Vanden Bergh and Grazi, 2014). ردپای بوم‌شناختی بر حسب هکتار جهانی اندازه‌گیری می‌شود (Rees and Wackernagel, 1996). این شاخص نشان‌دهندهٔ مقدار مصرف انسان‌ها از منابع زیستی و تولید پسماند بر حسب نواحی زیست‌بوم اختصاص‌یافته است و می‌تواند بعد

از آن، با ظرفیت تولیدی زیست‌کره در یک سال معین مقایسه شود. از این‌رو، منطقه‌ای ناپایدار در نظر گرفته می‌شود که ردپای بوم‌شناختیی آن بیش از ظرفیت زیستی‌اش در مقیاس جهانی باشد؛ یعنی، انسان بیش از آن چیزی که می‌تواند احیا شود، استفاده می‌کند (Lim, 2020). این شاخص می تواند میزان زمین مورد نیاز برای تولید محصولات و جذب ضایعات تولیدی را پیش‌بینی کند (Guzman et al., 2013). در مطالعهٔ حاضر، ردپای بوم‌شناختیی عبارت است از مساحت زمین مولد مورد نیاز برای جبران آلودگی‌های زیست‌محیطی کشاورزی ناشی از مصرف نهاده‌ها و منابع مورد استفاده از جمله بذر، آب، کود، برق، ماشین‌آلات، سوخت و آفت‌کش‌ها که بر حسب هکتار جهانی طی یک سال زراعی در فرایند تولید گوجه‌فرنگی در شهرستان اسدآباد به‌دست می‌آید.

ارزیابی ردپای بوم‌شناختی بر اساس مصرف نهاده ها

کودها، ادوات و سموم مورد استفاده در نظام‌های کشاورزی ردپایی بزرگ از تولید کربن ایجاد می‌کنند (Vander Werf and Turnen, 2008). بر اساس تحقیقات انجام‌گرفته، هر هکتار زمین توانایی جذب ۱/۸ تن کربن را دارد (Gharkhloo et al., 2009). در صورتی که ردپای بوم‌شناختی محصولی بیش از این مقدار (۱/۸ تن در هکتار) باشد، از لحاظ زیست‌محیطی، ناپایدار تلقی می‌شود. در پژوهش حاضر، برای ارزیابی ردپای بوم‌شناختی بر حسب کربن، از شاخص انرژی استفاده می‌شود. برای مشخص کردن انرژی استفاده‌شده، مجموعه‌ای از عوامل معادل‌ساز[1] ویژه وجود دارد که با استفاده از آنها، میزان انرژی حاصل از تأثیر هر کدام از عوامل اثرگذار بر محیط زیست، بر حسب هکتار جهانی، برآورد می‌شود. در جدول ۱، متغیرها، مقیاس اندازه‌گیری و عوامل معادل‌ساز انرژی هر نهاده و محصول تولیدی به‌منظور محاسبه انرژی‌های ورودی و خروجی مورد نیاز برای ارزیابی کارآیی انرژی و ردپای بوم‌شناختی تولید گوجه‌فرنگی آمده است، که در کشت «در فضای باز» شناسایی شده، مورد استفاده قرار می‌گیرند.

از برق در موتورپمپ‌ها برای استخراج آب از چاه استفاده می‌شود. ملاک ارزیابی مقدار برق (کیلو وات ساعت) بر اساس کارکرد کنتور چاه‌های زراعی در طول مراحل آبیاری است که مقدار آن از حاصل‌ضرب «میانگین زمان صرف‌شده برای هر آبیاری» در «میانگین برق مصرفی برای هر بار آبیاری» به‌دست آمده است. گازوئیل برای انجام عملیات زراعی، حمل‌ونقل، تولید و نگهداری ادوات و ماشین‌آلات‌کشاورزی به‌کار می‌رود و واحد اندازه‌گیری آن لیتر است. ملاک تعیین میزان مصرف سوخت

1. equivalent factors

«لیتر بر هکتار» بوده که بر اساس پاسخ رانندگان تراکتور (کشاورزان) و از طریق پرسشنامه گردآوری شده است. طی جمع آوری داده‌ها در منطقه، مشخص شد که در کشت محصول، برای آبیاری از گازوئیل استفاده نمی‌شود. داده‌های مرتبط با میزان مصرف آب بر اساس واحد متر مکعب و از طریق سؤال از کشاورزان جمع‌آوری شده است.

جدول ۱- عوامل معادل‌ساز انرژی منابع ورودی و خروجی

ورودی‌ها	واحد مصرف	معادل انرژی (مگاژول) ($MJ\ Unit^{-1}$)	منبع
برق	kwh	۱۱/۹۳	(Ozkan et al., 2006)
کود ازته	kg	۶۶/۱۴	(Rees and Wackernagel., 1996)
گازوئیل	l	۵۶/۳۱	(Singh et al., 2010)
آب آبیاری	m^3	۱/۰۲	(Zangeneh et al., 2010)
پلاستیک	kg	۹۰	(Canakci and Akinci, 2006)
فسفات	kg	۱۲/۴۴	(Tabatabaie et al., 2013)
کود دامی	ton	۳۰۰	(Pervanchon, 2002)
نیروی انسانی	h	۱/۹۶	(Zangeneh et al., 2010)
کود میکرو	kg	۱۲۰	(Canakci and Akinci, 2006)
ماشین‌آلات	h	۶۲/۷	(Cetin and Vardar, 2008)
پتاسیم	kg	۱۱/۱۵	(Esengun et al., 2007)
قارچ‌کش	kg	۲۱۶	(Zangeneh et al., 2010)
حشره‌کش	kg	۱۰۱/۲	(Pervanchon, 2002)
علف‌کش	kg	۲۳۸	(Zangeneh et al., 2010)
گوگرد	kg	۱/۱۲	(Mohammadi et al., 2014)
بذر گوجه‌فرنگی	kg	۱	(Singh et al., 2010)
خروجی			
گوجه‌فرنگی	kg	۰/۸	(Jadidi et al., 2012)

مأخذ: یافته‌های پژوهش

مدل ردپای بوم‌شناختی که توسط کیسینجر و گوتلیب (Kissinger and Gottlieb, 2012) و گوزمن و همکاران (Guzman et al., 2013) برای ارزیابی پایداری زیست‌محیطی کشاورزی ارائه شده، بر مبنای مصرف انرژی و رویکرد مکان‌محور، برای ارزیابی پایداری تولید گوجه‌فرنگی در مدل زیر در قالب روابط (۲) تا (۴) نشان داده شده است:

$$EF_t = \sum_{i=1}^{n} EF_i = \left(\frac{E_i \times T}{C_o}\right) \quad (۲)$$

$$E_c = F_i \times EQF \times 1000 \quad (۳)$$

$$T = \left(\frac{P_c}{E_c \times O_c \times K}\right) \quad (۴)$$

در این مدل، EF_t شاخص ردپای بوم‌شناختی بر حسب هکتار جهانی، E_c توانایی تولید انرژی توسط هر گرم ذغال سنگ (۲۰ کیلوژول)، T عدد ثابت، E_i انرژی عامل i بر حسب کیلوژول (kj)، F_i انرژی عامل i ام و C_o توانایی یک هکتار زمین در جذب کربن بر حسب تن (۱/۸ تن)، EQF عامل معادل‌ساز iام برای تبدیل زمین مولد[1] به هکتار جهانی، P_c درصد کربن موجود در زغال سنگ (۰/۸۵ درصد) بر حسب گرم، O_c درصد زغال سنگ بازدهی‌شده توسط گیاهان معادل (۰/۳۱۴ درصد) بر حسب گرم و K ضریب ثابت برای تبدیل گرم به تن (۱۰۰۰۰۰۰) است (Gharkhloo et al., 2009).

ارزیابی ردپای مستقیم و غیرمستقیم تولید گوجه‌فرنگی

اگرچه فرمول‌بندی تحلیل ردپای بوم‌شناختی ارائه‌شده توسط ریس و واکرناگل (Rees and Wackernagel, 1996) بر پنج نوع متفاوت زمین (زراعی، مرتع، جنگل، ساختمان و انرژی) متمرکز شده، ولی تحقیقات متعدد نشان داده است که ردپای بوم‌شناختی را می‌توان این‌گونه تعریف کرد: مجموع زمین واقعی (EF_{real}) و مجازی (EF_{co2}) که به‌صورت مستقیم و غیرمستقیم به تولید محصول مرتبط می‌شود و برای جذب دی‌اکسید کربن (CO_2) تولیدشده در طول دوره تولید محصول لازم است؛ و زمین واقعی نشان‌دهندهٔ زمین مستقیماً تصرف‌شده در فرآیند تولید است (Cerutti et al., 2013).

EF_{real} زمین تصرف‌شده در طول زمان برای زمین‌های زراعی، ساختمان، مراتع و جنگل به‌منظور تولید محصول است که به‌صورت رابطهٔ زیر محاسبه می‌شود:

$$EF_{real} = \sum_a A_a \cdot E_q F_a \quad (۵)$$

که در آن، A_a میزان زمین تصرف‌شده نوع a (زراعی، جنگلی، مرتع و ساختمان) و $E_q F_a$ ضریب تعادل متناظر با هر نوع زمین است که بدین ترتیب، $\sum_a A_a$ برابر با یک است؛ همچنین، $E_q F_a$ عامل هم‌ارزی منطقه ساخته‌شده برابر با ۲/۲ است. عامل هم‌ارزی، با توجه به تفاوت توان بهره‌وری پهنه‌های مختلف زمین،

1. effective land

دارای مقدار متفاوت است و برای زمین زراعی، جنگلی، مرتع و زمین ساخته‌شده، به‌ترتیب، برابر با ۲/۲، ۱/۴، ۰/۵ و ۲/۲ هکتار جهانی است (Wackernagel et al., 2005). بنابراین، با توجه به نوع زمین تصرف‌شده، مقدار EF_{real} هم متفاوت خواهد بود.

EF_{co2} ردپای CO_2 زمین تصرف‌شده به‌صورت غیرمستقیم برای سوخت‌های فسیلی بوده، به میزان انتشار CO_2 سالانه مرتبط است. ردپای CO_2 به برآورد مقدار زمین بهره‌ور زیستی اضافی که برای ترسیب کربن منتشرشده از سوخت‌های فسیلی نیاز است، می‌پردازد و همچنین، میزان CO_2 جذب‌شده برای جنگل‌کاری را محاسبه می‌کند که از رابطه (۶) محاسبه می‌شود (Cerutti et al., 2013). در این معادله، E_i مقدار انرژی مصرفی نهاده‌ها بر اساس گیگاژول بر هکتار و E_p توانایی یک هکتار زمین جنگلی در جذب کربن آزادشده از انرژی معادل ۷۱ گیگاژول نفت است:

$$EF_{co2} = \frac{E_i}{E_p} \qquad (۶)$$

ارزیابی کارآیی و بهره‌وری انرژی تولید گوجه‌فرنگی

در پژوهش حاضر، برای ارزیابی الگوی مصرف انرژی، از شاخص‌های کارآیی انرژی و بهره‌وری انرژی استفاده شده و منظور از کارآیی انرژی، بر اساس رابطه (۷)، نسبت انرژی‌های خروجی ناشی از محصولات تولیدی در یک هکتار و انرژی‌های ورودی ناشی از مصرف نهاده‌ها (بذر، سموم، کود، سوخت، آب و ...) است. کارآیی انرژی نشان می‌دهد که به ازای هر مگاژول انرژی مصرفی در هکتار به‌منظور تولید، چه میزان انرژی تولید شده است. هرچه میزان انرژی حاصل از محصولات تولیدی به مصرفی بیشتر باشد، بیانگر کارآیی بیشتر یا پایداری سیستم است و برعکس. بهره‌وری انرژی نیز بر اساس رابطه (۸)، عبارت است از نسبت عملکرد محصول بر حسب کیلوگرم در هکتار به انرژی حاصل از نهاده‌های مصرفی بر حسب مگاژول (Omid et al., 2011).

$$EEI_{tomato} = \frac{\text{energy output (MJ ha}^{-1})}{\text{energy input (MJ ha}^{-1})} \qquad (۷)$$

$$EPI_{tomato} = \frac{\text{tomato output (Kg ha}^{-1})}{\text{energy input (MJ ha}^{-1})} \quad \text{کیلوگرم بر مگاژول} \qquad (۸)$$

نتایج و بحث

یافته‌های توصیفی

در ارتباط با ویژگی‌های فردی و فنی پاسخ‌گویان در منطقه مورد مطالعه، یافته‌ها نشان می‌دهد که از نظر سنی، بیشترین درصد فراوانی با ۴۵/۷ درصد مربوط به گروه ۴۰-۲۹ سال بوده و حداقل و حداکثر سن نمونه‌ها، به‌ترتیب، ۱۷ و ۷۲ سال است. بررسی وضعیت تاهل کشاورزان نشان می‌دهد که ۸۹ درصد آنها متاهل هستند. میانگین سابقه کار افراد مورد مطالعه در کشاورزی ۲۵ سال بوده و بیشترین درصد فراوانی با ۳۸/۱ درصد مربوط به سابقه کاری ۱۵ تا ۲۵ سال است. از نظر وضعیت سواد، سطح تحصیلات بیش از نیمی از کشاورزان (۵۳/۳ درصد) در حد ابتدایی و راهنمایی و ۱۱/۴ درصد آنها هم بی‌سواد بوده‌اند. وضعیت مالکیت زمین کشاورزان نشان می‌دهد که میانگین مالکیت زمین کشاورزی ۶/۳۵ هکتار بوده و در حدود دوسوم آنها (۶۵/۲ درصد) کمتر از پنج هکتار زمین داشته‌اند. از لحاظ مالکیت ادوات کشاورزی نیز نتایج نشان می‌دهد که ۴۴/۸ درصد کشاورزان از تراکتور برخوردار بوده و بقیه نیز مالک سایر ادوات کشارزی مانند نهرکن بوده‌اند. منبع آب مورد استفاده ۸۷/۱ درصد کشاورزان چاه عمیق و برای بقیهٔ آنها چشمه، قنات و چاه نیمه‌عمیق بوده است. از نظر وضعیت مالکیت منبع آب حدود ۵۸/۶ درصد دارای مالکیت شخصی بوده‌اند. میانگین دبی فعلی چاه ۱۵/۹ لیتر بر ثانیه بوده است. میانگین کل آب، سوخت گازوئیل و برق مصرفی در سطح یک هکتار کشت گوجه‌فرنگی، به‌ترتیب، برابر با ۵۲۷۲/۲ متر مکعب ، ۲۷۱/۵ لیتر و ۳۲۸۲ کیلووات ساعت بوده است. میانگین عملکرد محصول برابر با ۴۲/۳۰ تن با حداقل عملکرد ده و حداکثر ۱۲۰ تن در هکتار بوده و بیشترین فراوانی مربوط به گروه ۳۱ تا۵۰ تن با ۴۵/۷ درصد بوده است.

تحلیل انرژی نهاده‌ها و محصول، کارآیی و بهره‌وری انرژی و محاسبه ردپای بوم‌شناختیی برآورد انرژی‌های ورودی و خروجی تولید گوجه‌فرنگی

در بخش تحلیل انرژی‌ها، با ضرب عوامل معادل‌ساز انرژی هر نهاده مصرفی و محصول تولیدی (جدول ۱) در مقدار مصرف هر نهاده و مقدار محصول تولیدی، مقدار انرژی ورودی حاصل از مصرف هر کدام از نهاده‌ها و مقدار انرژی خروجی حاصل از میزان گوجه‌فرنگی تولیدشده محاسبه شد. در این محاسبات، از میانگین مصرف نهادها و عملکرد محصول به‌عنوان مقادیر لازم برای انجام محاسبات استفاده شده، که نتایج آن در جدول ۲ آمده است.

جدول ۲- برآورد انرژی‌های ورودی نهاده‌های مصرفی و انرژی خروجی حاصل از تولید محصول گوجه‌فرنگی

ورودی‌ها	واحد	میزان مصرف	ضریب تبدیل	برآورد انرژی(مگاژول) ($MJ\ ha^{-1}$)	درصد	رتبه
برق	kwh	۳۲۸۲	۱۱/۹۳	۳۹۱۵۴/۳	۳۸/۸۷	۱
کود ازته	kg	۴۱۰	۶۶/۱۴	۲۷۱۱۷/۴	۲۶/۹۲	۲
گازوئیل	l	۲۷۱/۵	۵۶/۳۱	۱۵۲۸۸/۲	۱۵/۱۸	۳
آب آبیاری	m^3	۵۲۷۲/۲	۱/۰۲	۵۳۷۷/۶	۵/۳۴	۴
پلاستیک	kg	۴۵/۶	۹۰	۴۱۰۴	۴/۰۷	۵
فسفات	kg	۲۴۲/۷	۱۲/۴۴	۳۰۱۹/۲	۳	۶
کود دامی	ton	۶/۷۵	۳۰۰	۲۰۲۵	۲/۰۱	۷
نیروی انسانی	h	۱۰۱۲/۸	۱/۹۶	۱۹۸۵/۱	۱/۹۷	۸
کود میکرو	kg	۷	۱۲۰	۸۴۰	۰/۸۳	۹
ماشین‌آلات	h	۱۰/۴	۶۲/۷	۶۵۲/۱	۰/۶۵	۱۰
پتاسیم	kg	۴۵/۴۳	۱۱/۱۵	۵۰۶/۵	۰/۵۰	۱۱
قارچ‌کش	kg	۱/۵۱	۲۱۶	۳۲۶/۲	۰/۳۲	۱۲
حشره‌کش	kg	۱/۸۵	۱۰۱/۲	۱۸۷/۲	۰/۱۹	۱۳
علف‌کش	kg	۰/۶۱	۲۳۸	۱۴۵/۲	۰/۱۴	۱۴
گوگرد	kg	۳/۳۲	۱/۱۲	۳/۷	۰/۰۰۴	۱۵
بذر گوجه‌فرنگی	kg	۰/۶۵	۱	۰/۷	۰/۰۰۰۶	۱۶
				۱۰۰۷۳۲/۳	۱۰۰	
خروجی						
گوجه‌فرنگی		۴۲۳۰۰	۰/۸	۳۳۸۴۰	۱۰۰	

مأخذ: یافته‌های پژوهش

الف) انرژی‌های ورودی

با توجه به یافته‌های جدول ۲، مجموع انرژی‌های حاصل از مصرف منابع و نهاده‌های ورودی برابر با ۱۰۰۷۳۲ مگاژول است، که انرژی حاصل از برق مصرفی با ۳۹۱۵۴ مگاژول و ۳۸/۸۷ درصد در رتبه اول و کود ازت و گازوییل مصرفی هر کدام، به‌ترتیب، با حدود ۲۷۱۱۷ و ۱۵۲۸۸ مگاژول و ۲۶/۹۲ و ۱۵/۱۸ درصد در رتبه‌های دوم و سوم قرار داشته‌اند، به‌گونه‌ای که انرژی حاصل از مصرف این نهاده‌ها در مجموع ۸۰/۹۷ درصد از کل انرژی‌های ورودی را شامل می‌شود. انرژی حاصل از آب مصرفی با حدود ۵۳۷۷ مگاژول و ۵/۳۴ درصد در رتبه چهارم واقع شده است. کمترین انرژی به گوگرد و بذر مصرفی، به‌ترتیب، با حدود ۰/۰۰۴ و ۰/۰۰۰۶ درصد در رتبه‌های پانزدهم و شانزدهم برمی‌گردد. از کل

انرژی‌های ورودی (۱۰۰۷۳۲ مگاژول)، مقدار ۶۱۸۰۵ مگاژول برابر با ۶۱/۳۶ درصد را انرژی‌های مستقیم (نیروی کار، برق، گازوئیل و آب) و ۳۸۹۲۷ مگاژول برابر با ۳۸/۶۴ درصد را انرژی‌های غیرمستقیم (کودها، بذر، سموم و ماشین‌آلات) تشکیل می‌دهند.

ب) انرژی‌های خروجی

برابر داده‌های جدول ۲، انرژی‌های خروجی حاصل از تولید محصول گوجه‌فرنگی طبق برآورد صورت‌گرفته ۳۳۸۴۰ مگاژول بوده که حاصل از تولید ۴۲۳۰۰ کیلوگرم محصول گوجه‌فرنگی در سطح یک هکتار است.

محاسبه کارآیی و بهره‌وری انرژی تولید گوجه‌فرنگی

یکی از مهم‌ترین گام‌های ارزیابی عملکرد، تعیین شاخص‌های ارزیابی عملکرد است. کارآیی و بهره‌وری از جمله شاخص‌های شایان توجه به‌شمار می‌روند. منظور ازکارآیی، نسبت بازده واقعی به بازده استاندارد و مورد انتظار است؛ یا به دیگر سخن، نسبت مقدار کاری که انجام می‌شود، به مقدار کاری که باید انجام شود. از دیدگاه اقتصاددانان، بهره‌وری به معنی تولید محصول بیشتر با استفاده از منابع و امکانات موجود یا به دیگر سخن، استفاده مؤثرتر از عوامل تولید است. در مفهوم کارآیی، گفته می‌شود که کدام بنگاه کارآ عمل می‌کند؛ ولی در مفهوم بهره‌وری، گفته می‌شود که در طول زمان، کدام بنگاه‌ها بهره‌وری عوامل تولید خود را تغییر داده‌اند. بهره‌وری به مفهوم مقایسه کارآیی یک بنگاه طی زمان‌های متفاوت است و به بیان بهتر، بهره‌وری مقایسهٔ کارآیی است. پیداست که پیش‌شرط بهبود بهره‌وری در سطح خرد و کلان مستلزم سنجش کارآیی است که این سنجش در ارزیابی کیفیت و ترکیب به‌کارگیری منابع، سطح بازدهی فعالیت‌ها و ارزیابی وضع موجود مؤثر بوده و نیز در کشف و اصلاح روش‌های بهبود بهره‌وری و تخصیص بهینه منابع بسیار مؤثر است (Hedayat Mazhari et al., 2021).

در اینجا، بر اساس روابط (۷) و (۸)، کارآیی انرژی تولید برابر با ۰/۳۴ و بهره‌وری انرژی تولید معادل ۰/۴۲ کیلوگرم بر مگاژول محاسبه و برآورد شده است:

$$EEI_t = \frac{33840}{100732.3} = 0.34$$

$$EPI_t = \frac{42300}{100732.3} = 0.42$$ کیلوگرم بر مگاژول

پایین بودن کارآیی و بهره‌وری انرژی کشت گوجه‌فرنگی در شهرستان اسدآباد حاکی از پایین بودن مقدار انرژی خروجی (محصول تولیدی) نسبت به انرژی‌های ورودی حاصل از نهاده‌های مصرفی

به‌ویژه برق (۳۸/۹ درصد)، کود ازته (۲۶/۹ درصد) و گازوئیل (۱۵/۱۸ درصد) است که نشان‌دهندهٔ ناپایداری تولید این محصول در شهرستان اسدآباد به‌دلیل استفاده غیراصولی از نهاده‌هایی چون برق و کودهای ازته است.

در این زمینه، در پژوهش زبردست و همکاران (Zabardast et al., 2023)، با عنوان «ارزیابی انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای تولید زیتون در غرب ایران (مطالعه موردی: شهرستان ایلام) »، کارآیی و بهره‌وری انرژی، به‌ترتیب، برابر با ۱/۳۶ و ۰/۱۲ کیلوگرم بر مگاژول گزارش شده است و نهاده‌های برق و کود نیتروژن، به‌ترتیب، با ۷۳/۷۸ و ۱۶/۸۱ درصد بیشترین سهم از انرژی‌های ورودی را به خود اختصاص داده‌اند؛ بنابراین، از نظر شناسایی مهم‌ترین نهاده‌های مصرف‌کننده انرژی و همچنین، پایین بودن بهره‌وری انرژی در تولید، نتایج مطالعهٔ آنها با یافته‌های پژوهش حاضر مطابقت دارد. در مطالعهٔ یلماز و همکاران (Yilmaz et al., 2005)، با عنوان «مصرف انرژی تولید پنبه در ترکیه»، کارآیی و بهره‌وری مصرف انرژی، به‌ترتیب، برابر با ۰/۷۴ و ۰/۰۶ کیلوگرم کتان برای مصرف یک مگاژول انرژی محاسبه شد که این نتایج، از نظر پایین بودن نسبت‌های یادشده، با نتایج این بخش از پژوهش حاضر مطابقت دارد. نتایج تحقیق در محاسبه معادل انرژی نهاده‌های ورودی و کارآیی انرژی در تولید گوجه‌فرنگی، از نظر مشابهت در نهاده‌هایی با بیشترین مصرف انرژی و کم بودن کارآیی انرژی تولید، با نتایج برخی دیگر از مطالعات (Zarei, 2017; Esfahani et al., 2017; Esengun et al., 2007) همخوانی دارد. همچنین، یافته‌های این بخش از تحقیق حاضر با مطالعات انجام‌شده در خصوص محاسبه معادل انرژی سایر محصولات کشاورزی (Abdullah et al., 2015; Ghasemi Mobtaker et al., 2010) مطابقت دارد.

در مقابل، اوزکان و همکاران (Ozkan et al., 2006)، در مطالعه و تحلیل نسبت انرژی ستاده به نهاده و بهره‌وری انرژی در تولید چغندر در ترکیه، به‌ترتیب، اعداد ۲۵/۷۵ و ۱/۵۳ را گزارش کردند، که این نسبت‌ها با نسبت‌های به‌دست مده در مطالعه حاضر متفاوت است و مطابقت ندارد. همچنین، در مطالعهٔ دکامین (Dekamin, 2021)، با عنوان «هزینه‌یابی جریان مواد و انرژی سیب‌زمینی در استان همدان»، کارآیی و بهره‌وری مصرف انرژی، به‌ترتیب، برابر با ۲/۶۵ و ۰/۷۴ محاسبه شده است، که این نسبت‌ها با شاخص‌های کارآیی و بهره‌وری انرژی محاسبه‌شده در مطالعهٔ حاضر مطابقت ندارد.

محاسبه کارآیی فنی و تخصیصی تولید گوجه‌فرنگی

برای تحلیل کارآیی تولید گوجه‌فرنگی در منطقه مورد مطالعه، کارآیی فنی و تخصیصی محاسبه و سنجیده شد، که نتایج آن در خروجی نرم‌افزار DEAP 2.1 در جدول ۳ آمده است. بر اساس نتایج

این جدول، میانگین کارآیی فنی برابر با ۰/۸۶۶۷ و در این حالت، میزان عدم کارآیی فنی معادل ۰/۱۳۳۳، میانگین کارآیی تخصیصی معادل ۰/۸۹۳۰ و میزان ناکارآیی تخصیصی ۰/۱۰۷ بوده است. از آنجا که میانگین کارآیی فنی و میانگین کارآیی تخصیصی کمتر از یک است، می‌توان نتیجه گرفت که حداقل تعدادی از واحدهای تولیدی گوجه‌فرنگی ناکارآ بوده‌اند.

جدول ۳- محاسبه کارآیی فنی و تخصیصی

کارآیی	میانگین	انحراف معیار
کارآیی فنی	۰/۸۶۶۷	۰/۱۶۳۴۰
کارآیی تخصیصی	۰/۸۹۳۰	۰/۱۶۶۰۷
جمع	۲۱۰	

مأخذ: یافته‌های پژوهش

نتایج تحقیق کوئلی و همکاران (Coelli et al., 2002)، با عنوان «بررسی کارآیی فنی، تخصیصی، هزینه و مقیاس برنج‌کاران بنگلادشی با استفاده از روش تحلیل پوششی داده‌ها»، نشان داد که میانگین کارآیی‌های فنی، تخصیصی، هزینه و مقیاس برای فصل خشک، به‌ترتیب، ۶۹/۴، ۸۱/۳، ۵۶/۲، ۹۴/۹ درصد بوده و مهم‌ترین مؤلفه‌های تأثیرگذار بر ناکارآیی تخصیصی به‌کارگیری بیش از حد نیروی کار و کود است. همچنین، اصفهانی و همکاران (Esfahani et al., 2017) در مطالعه خود با عنوان «کارآیی و پایداری تولید ذرت علوفه‌ای با استفاده از تحلیل پوششی داده‌ها و ردپای بوم‌شناختی چندکارکردی در شهرستان سرایان»، میانگین کارآیی فنی، کارآیی فنی خالص و کارآیی مقیاس را به‌ترتیب، برابر با ۰/۸۶، ۰/۹۳ و ۰/۸۰ محاسبه و گزارش کرده‌اند.

محاسبه ردپای مستقیم و غیرمستقیم و ردپای بوم‌شناختی براساس مصرف نهاده‌ها

در پژوهش حاضر، برای محاسبه ردپای بوم‌شناختی مستقیم و غیرمستقیم، از روش برآورد عوامل معادل‌ساز انرژی (جدول ۲) در قالب روابط (۵) و (۶) و همچنین، برای محاسبه ردپای بوم‌شناختی منابع و نهاده‌های مصرفی، از مدل ردپای بوم‌شناختی ارائه‌شده توسط کیسینجر و گوتلیب (Kissinger and Gottlieb, 2012) و گوزمن و همکاران (Guzman et al., 2013) در قالب روابط (۲) تا (۴) بهره گرفته شده است:

ردپای مستقیم $2.2*1 = 2.2EF_{direct}$

ردپای غیرمستقیم $1.42 = \frac{100.732\ GJ}{71\ GJ}\ EF_{co2}$

ردپای کل تولید گوجه‌فرنگی (EF_{total}): $EF_{total} = 2.2 + 1.42 = 3.62$

بر پایهٔ یافته‌های پژوهش حاضر، در این مدل، ردپای کل برای تولید گوجه‌فرنگی برابر با ۳/۶۲ هکتار جهانی بوده، که حاصل‌جمع ردپای مستقیم (۲/۲) و ردپای غیرمستقیم (۱/۴۲) هکتار جهانی است. «هکتار جهانی» یک واحد اندازه‌گیری استاندارد شده برای ردپای بوم‌شناختی مردم یا فعالیت‌های آنها و ظرفیت زیستی زمین و مناطق آن است. «ردپای بوم‌شناختی» تقاضای انسان برای مصرف منابع طبیعی را اندازه‌گیری می‌کند و «ظرفیت زیستی» منطقه‌ای مولد است که می‌تواند آنچه را مردم از طبیعت تقاضا می‌کنند، بازتولید کند. ردپای مستقیم (واقعی) میزان زمین تصرف‌شده در اثر کاربری‌های مختلف مانند زمین‌های زراعی، ساختمان، مراتع و جنگل برای تولید محصول را نشان می‌دهد. ردپای غیرمستقیم (مجازی) به میزان انتشار CO_2 سالانه در تولید محصول مرتبط است. این ردپا میزان زمین مورد نیاز (اضافی) برای جذب آلودگی‌های زیست‌محیطی و کشاورزی ناشی از مصرف نهاده‌ها و منابع مورد استفاده (کودها، بذر، نیروی انسانی، آب، سوخت و سموم) را نشان می‌دهد که بر حسب هکتار جهانی طی یک سال زراعی در تولید محصول به‌دست می‌آید. در جدول ۴، نتایج محاسبه ردپای غیرمستقیم (کودها، بذر، سموم و ماشین‌آلات) و ردپای حاصل از منابع و نهاده‌های مصرفی برای تولید گوجه‌فرنگی به‌تفکیک ارائه شده است.

جدول ۴- ردپای غیرمستقیم و ردپای منابع و نهاده‌های مصرفی تولید گوجه‌فرنگی

ورودی‌ها	انرژی تولیدی (گیگاژول) ($GJ\ ha^{-1}$)	ردپای غیرمستقیم (gha)	ردپای نهاده مصرفی (gha)
برق	۳۹/۱۵	۰/۵۵	۲/۹۴
کود ازته	۲۷/۱۲	۰/۳۸	۲/۰۴
گازوئیل	۱۵/۲۹	۰/۲۲	۱/۱۵
آب آبیاری	۵/۳۸	۰/۰۸	۰/۴۰
پلاستیک	۴/۱۰	۰/۰۶	۰/۳۱
فسفات	۳/۰۲	۰/۰۴	۰/۲۳
کود دامی	۲/۰۳	۰/۰۲۹	۰/۱۵
نیروی انسانی	۱/۹۹	۰/۰۲۸	۰/۱۵
کود میکرو	۰/۸۴	۰/۰۱	۰/۰۶
ماشین‌آلات	۰/۶۵	۰/۰۰۹	۰/۰۵
پتاسیم	۰/۵۱	۰/۰۰۷	۰/۰۳۸
قارچ‌کش	۰/۳۳	۰/۰۰۴۶	۰/۰۲۵
حشره‌کش	۰/۱۹	۰/۰۰۲۶	۰/۰۱۴
علف‌کش	۰/۱۵	۰/۰۰۲	۰/۰۱۱
گوگرد	۰/۰۰۴	۰/۰۰۰۰۵	۰/۰۰۰۲۸
بذر گوجه‌فرنگی	۰/۰۰۰۷	۰/۰۰۰۰۰۹	۰/۰۰۰۰۴۹
جمع انرژی‌های ورودی	۱۰۰		
جمع کل ردپای غیرمستقیم و ردپای نهاده‌های مصرفی		۱/۴۲	۷/۵۷

مأخذ: یافته‌های پژوهش

بر اساس یافته‌های حاصل از جدول ۴، برق با ۳۹/۱۵ گیگاژول انرژی تولیدی و ردپای غیرمستقیم و نهاده، به‌ترتیب، ۰/۵۵ و ۲/۹۴ در رتبه اول و کود ازته با ۲۷/۱۲ گیگاژول و ردپای غیرمستقیم و نهاده، به‌ترتیب، ۰/۳۸ و ۲/۰۴ در رتبه دوم و گازوئیل با ۱۵/۲۹ گیگاژول انرژی تولیدی و ردپای غیرمستقیم و نهاده، به‌ترتیب، ۰/۲۲ و ۱/۱۵ در رتبه سوم قرار دارند و بیشترین تأثیر را بر ردپای غیرمستقیم و ردپای نهاده دارند. بنابراین، در تولید محصول گوجه‌فرنگی در شهرستان اسدآباد، مصرف نهاده‌های برق، کود ازته و گازوئیل، به‌ترتیب، بیشترین نقش را در تولید و انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلاینده زیست‌محیطی داشته‌اند. ردپای غیرمستقیم تولید گوجه‌فرنگی برابر با ۱/۴۲ محاسبه شد. به بیان دیگر، ۱/۴۲ هکتار زمین بهره‌ور جهانی لازم است تا آلاینده‌های تولیدشده در اثر تولید گوجه‌فرنگی را

جذب کند. با توجه به ردپای کل ۳/۶۲ هکتار جهانی و فاصله ۲/۸۲ آن با ظرفیت زیستی ۰/۸ موجود ایران، طبق این مدل همانند ارزیابی کارآیی انرژی، تولید گوجه‌فرنگی در شهرستان اسدآباد از جنبهٔ اثرات زیست‌محیطی در شرایط ناپایداری قرار دارد. افزون بر این، ردپای بوم‌شناختی بر مبنای نهاده‌های مصرفی ۷/۵۷ هکتار جهانی برآورد شد، که این مقدار نیز بسیار بیشتر از ظرفیت بوم‌شناختی زمین مورد استفاده برای تولید گوجه‌فرنگی در سطح یک هکتار است. به بیان دیگر، این محصول مقدار ۵/۷۷ تن کربن اضافه تولید می‌کند که بیش از ظرفیت یک هکتار زمین انرژی برای جذب آلودگی‌های زیست–محیطی است. بر این اساس، به مساحتی معادل ۳/۲ هکتار زمین مولد نیاز خواهد بود تا چالش کاهش ظرفیت زیستی مرتفع شود. با توجه به این یافته نیز می‌توان نتیجه گرفت که تولید گوجه‌فرنگی از جنبه اثرات زیست‌محیطی در شرایط ناپایداری قرار دارد.

از آنجا که شاخص ردپا به‌عنوان روشی جدید در پژوهش‌های مرتبط با پایداری مطرح شده، مطالعه در مورد تولید گوجه‌فرنگی به‌صورت محدود انجام گرفته است. از این‌رو، نتایج مطالعهٔ حاضر بیشتر با نتایج مطالعات صورت‌گرفته در زمینه سایر محصولات کشاورزی مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. در مطالعه‌ای با عنوان «ارزیابی پایداری زیست‌محیطی کشت سیب‌زمینی و خیار در شهرستان بهار»، ردپای بوم‌شناختیی بر مبنای مصرف نهاده برای سیب‌زمینی برابر با ۳/۸۸ و خیار برابر با ۳/۱۵ هکتار جهانی محاسبه شد. ردپای مستقیم، رد پای غیرمستقیم و ردپای کل، به‌ترتیب، برابر با ۲/۲، ۰/۷۵ و ۲/۹۵ هکتار جهانی برای کشت سیب‌زمینی و ۲/۲، ۰/۶ و ۲/۸ هکتار جهانی برای کشت خیار محاسبه شده است (Rezaei et al., 2019). در مطالعه‌ای دیگر، شاخص ردپای بوم‌شناختی برای کشت گندم در استان همدان به روش مرسوم و حفاظتی، به‌ترتیب، ۲/۹۶ و ۲/۸۴ هکتار جهانی محاسبه شد (Naderi Mahdiei et al., 2015). در تحقیقی که در زمینه شاخص ردپای بوم‌شناختیی برای تولید یک تن محصولات باغی شامل سیب، زردآلو و کیوی انجام شد، این شاخص، به‌ترتیب، ۱/۵۷، ۱/۶۱ و ۳/۰۵ محاسبه شده است (Cerutti et al., 2013). در بررسی ردپای بوم‌شناختی تولید شلیل در ایتالیا، نتایج مطالعه نشان داد که ردپای تولید یک تن شلیل برابر با ۱/۳۴ هکتار جهانی بوده است (Cerutti et al., 2010).

نتایج تحقیق حاضر نشان داد که برق و سپس، کودهای شیمیایی ازته بیشترین سهم را در ردپای دی‌اکسید کربن داشته‌اند. از آنجا که ردپای دی‌اکسید کربن به‌طور مستقیم با انتشار گازهای گلخانه‌ای مرتبط است، نتایج نشان داد که مصرف نهاده‌های برق و کودهای ازته، منابع اصلی انتشار گازهای گلخانه‌ای در تولید گوجه‌فرنگی در منطقه مورد مطالعه بودند که علاوه بر افزایش هزینه‌های

تولید، افزایش آلودگی‌های زیست‌محیطی را نیز به‌دنبال دارد. همچنین، یافته‌ها نشان داد که عامل مهم دیگر انتشار گازهای گلخانه‌ای مصرف بی‌رویه سوخت (گازوئیل) برای انجام عملیات کشاورزی در نتیجه ساعات زیاد کار ماشین‌آلات بوده که باعث ایجاد آلودگی‌های زیست‌محیطی شده است. در تأیید این یافته‌ها، محمدی و همکاران (Mohammadi et al., 2014) گزارش کردند که برق و سپس، گازوئیل به‌عنوان منابع اصلی گازهای گلخانه‌ای در تولید ذرت علوفه‌ای و سویا شناخته شده‌اند. در مطالعه‌ای برای بررسی میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای در تولید کیوی در شمال ایران، برق به‌عنوان منبع اصلی انتشار این گازها گزارش شده است (Nikkhah et al., 2015). در مطالعه روی تولید گازهای گلخانه‌ای در تولید چغندرقند، برق (با بیشترین مقدار) نقشی مهم در انتشار گازهای گلخانه‌ای داشته است. در این مطالعه، برق با ۷۳ درصد از کل انتشار گازهای گلخانه‌ای در رتبهٔ اول و پس از آن، اوره با پانزده درصد و سوخت با هفت درصد در رتبه‌های دوم و سوم جای گرفته‌اند (Yousefi et al., 2014). در پژوهشی دیگر، چروتتی و همکاران (Cerutti et al., 2010) ردپای بوم‌شناختی تولید شلیل در ایتالیا را بررسی کردند و نتایج نشان داد که برق با بیشترین سهم در جایگاه اول و سوخت در جایگاه دوم قرار داشتند. همچنین، اصفهانی و همکاران (Esfahani et al., 2017)، در بررسی کارآیی و پایداری تولید ذرت علوفه‌ای در منطقه سرایان، گزارش کردند که مهم‌ترین منابع و عوامل در ردپای دی‌اکسید کربن، به‌ترتیب، عبارت‌اند از برق، کود شیمیایی و سوخت. در مقابل، یلماز و همکاران (Yilmaz et al., 2005) نیز مصرف انرژی و هزینه نهاده‌های تولید پنبه را در ترکیه بررسی کردند و گزارش دادند که از کل انرژی مصرفی، بیشترین درصد آن مربوط به سوخت دیزل است. همچنین، عبدالملکی و همکاران (Abdolmaleky et al., 2022)، در مطالعه خود با عنوان «ارزیابی پایداری زیست‌محیطی: تولید سیب‌زمینی در غرب ایران»، گزارش کرده‌اند که ردپای غیرمستقیم تولید محصول ۰/۵۷ هکتار جهانی و شاخص ردپا بر حسب مصرف انرژی ۳/۰۶ بوده است. عوامل بذر، گازوییل و کودهای نیتروزنه، به‌ترتیب، بیشترین تاثیر را در عدم پایداری زیست–محیطی داشتند. نادری مهدیی و همکاران (Naderi Mahdiei et al., 2015) و گان و همکاران (Gan et al., 2011) نیز مصرف بی‌رویه سوخت در نظام‌های مختلف کشاورزی را یکی از عوامل مهم ایجاد اثرات نامطلوب زیست‌محیطی دانسته‌اند.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

تحلیل ردپای بوم‌شناختی در کشاورزی موضوعی جدید و در حال تکامل است که میزان زمین بهره‌ور مورد نیاز برای جبران اثرات زیست‌محیطی ناشی از فعالیت‌های گوناگون کشاورزی را مشخص می‌کند. عوامل مختلف مخاطرات زیست‌محیطی کشاورزی را تشدید می‌کنند که در پژوهش حاضر، با

روش‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج تحلیل ردپای بوم‌شناختی بر حسب هر کدام از شاخص‌های مورد استفاده در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد که تولید گوجه‌فرنگی از لحاظ بوم‌شناختی ناپایدار است. بر اساس نتایج ارزیابی انرژی‌ها نیز مقدار انرژی مورد استفاده در تولید محصول گوجه‌فرنگی بیش از ظرفیت بوم‌شناختی زمین مورد نیاز برای تولید آن در واحد سطح (یک هکتار) است. همچنین، شاخص‌های کارآیی و بهره‌وری انرژی اثرات زیست‌محیطی تولید گوجه‌فرنگی را ارزیابی و آلودگی‌های ناشی از آن را تأیید می‌کند. یافته‌های محاسباتی ردپای بوم‌شناختیی محصول گوجه‌فرنگی و فاصله ۲/۸۲ هکتار جهانی آن از ظرفیت زیستی معادل ۰/۸ موجود در ایران (Rezaei et al., 2019)، کارآیی انرژی پایین ناشی از مصرف نهاده‌ها به‌ویژه برق، کودهای ازته و گازوئیل در رتبه‌های اول تا سوم انرژی‌های ورودی با حدود ۸۱ درصد و نسبت انرژی خروجی ناشی از میزان تولید محصول گوجه‌فرنگی در هکتار نشان‌دهندهٔ ناپایداری تولید گوجه‌فرنگی در شهرستان اسدآباد با اثرات زیست–محیطی نامطلوب است.

در پایان، با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از تحقیق حاضر و به‌منظور حرکت به‌سوی کشاورزی پایدار، با انتخاب پمپ‌ها و موتورهای با راندمان بالا، تعمیر و نگهداری مرتب تجهیزات برای افزایش راندمان، آبیاری در ساعات غیر از اوج باری (پیک مصرف)، استفاده از کانال‌های بتونی به‌جای کانال‌های سنتی موجود، استفاده از استخر و مخازن آب به‌منظور ذخیره آب برای بهره‌برداری در زمان اوج باری شبکه (ساعات اولیه شب)، تبدیل سامانه‌های آبیاری سنتی به سامانه‌های تحت فشار و نیز از طریق روش‌های مختلف مدیریت نظام‌های زراعی نظیر روش‌های مدیریتی بر مبنای بهره‌گیری از اصول کم‌نهاده شامل کاربرد انواع نهاده‌های آلی و ارگانیک، به‌کارگیری روش‌های مبارزهٔ زیست‌شناختی (بیولوژیک) با آفات (به‌ویژه گل جالیز گوجه‌فرنگی) به‌جای مصرف انواع نهاده‌های شیمیایی، کاشت گیاهان تثبیت‌کنندهٔ نیتروژن و چندساله، استفاده از تناوب زراعی و بهره‌گیری از الگوهای متفاوت کاشت مانند کشت مخلوط، می‌توان اثرات زیست‌محیطی این نظام تولیدی را کاهش داد. همچنین، جایگزینی بذرهای اصلاح‌شده به‌جای بذور محلی برای افزایش تولید و در نتیجه، بهبود کارآیی و بهره‌وری انرژی و استفاده از ادوات ترکیبی و پیشرفته کشاورزی برای کاهش عملیات زراعی و شخم، بررسی و معاینه فنی ماشین‌آلات کشاورزی برای مصرف کمتر و بهینه سوخت‌های فسیلی (گازوئیل)، تقویت کارآیی بخش ترویج و آموزش کشاورزی سازمان جهاد کشاورزی در راستای ارتقای دانش و آگاهی کشاورزان در زمینه اثرات زیست‌محیطی نامطلوب نهاده‌های مصرفی و سرانجام، تشویق

کشاورزان به ایجاد و عضویت در تعاونی‌های تولیدی به‌منظور افزایش مشارکت آنها در تصمیم‌گیری‌های مربوط به مدیریت منابع طبیعی پیشنهاد و توصیه می‌شود.

منابع

1. Abdolmaleky, M. Naderi Mahdiei, K., & Nejatian, P. (2022). Environmental sustainability assessment: potato production in western Iran. *Process Integration and Optimization for Sustainability, 6*(4), 1063-1073. DOI: 10.1007/s41660-022-00262.
2. Abdullah, A., Marzban, Z., Asoudar, A., Amin, M., & Abdoshahi, A. (2015). Energy analysis of watermelon production in plastic and open space cultivation system via DEA method in Khuzestan. *Iranian Journal of Agricultural Economics and Development Research, 47*(2), 293-301. [In Persian]
3. Agostinho, F., & Pereira, L. (2013). Support area as an indicator of environmental load: comparison between embodied emergy, ecological footprint, and energy accounting methods. *Ecological Indicators, 24*, 494 - 503.
4. Akifdestek, M., & Sarkodie, A. S. (2019). Investigation of environmental Kuznets curve for ecological footprint: the role of energy and financial development. *Science of the Total Environment, 650*(2).
5. Canakci, M., & Akinci, I. (2006). Energy use pattern analysis of greenhouse vegetable production. *Energy, 31*, 1243-1256.
6. Cerutti, A., Beccaro, G. L., Bagliani, M., Donno, D., & Bounous, G. (2013). Multifunctional ecological footprint analysis eco-efficiency (a case study of fruit production systems in Northern Italy). *Journal of Cleaner Production, 40*, 108-117.
7. Cerutti, A. k., Bagliani, M., Beccaro, G. L., & Bounous, G. (2010). Application of ecological footprint analysis on nectarine production: methodological issues and results from a case study in Italy. *Journal of Cleaner Production, 18*(8), 771-776.
8. Cetin, B., &Vardar, A. (2008). An economic analysis of energy requirements

and input costs for tomato production in Turkey. *Renewable Energy, 33*, 428-433.

9. Cheng, K., Pan, G., Smith, P., Luo, T., Li, L., Zheng, J., Zhang, X., Han, X., & Yan, M. (2011). Carbon footprint of China's crop production: an estimation using agro-statistics data over 1993-2007. *Agriculture, Ecosystems & Environment, 142*, 231-237.
10. Coelli, T., Rahman, S., & Thirtle, C. (2002). Technical, allocative, cost and scale efficiencies in Bangladesh rice cultivation: a non-parametric approach. *Journal of Agricultural Economics, 53*(3), 607-626.
11. Crishna, N. (2007). Review and application of the ecological footprint (a case study of agricultural systems in Scotland). Master Thesis, Center for the Study of Environmental Change and Sustainability, University of Edinburgh.
12. Dekamin, M. (2021). Potato energy and material flow cost accounting in Hamadan province, Iran. *Journal of Agricultural Economics and Development, 35*(2), 105-119. [In Persian]
13. Dashti, Q., Pourmoradi, M., & Hayati, B. (2019). The relationship between agricultural efficiency and sustainability in potato fields in Kaboudar Ahang city. *Journal of Agricultural Knowledge and Sustainable Production, 29*(1), 181-192. [In Persian]
14. Dong, G., Mao, X., Zhou, J., & Zeng, A. (2013). Carbon footprint accounting and dynamics and the driving forces of agricultural production in Zhejiang province, China. *Journal of Ecological Economic, 91*, 38-47.
15. Esengun, K., Erdal, G., Gunduz, O., & Erdal, H. (2007). An economic analysis and energy use in stake tomato production in Tokat province of Turkey. *Renewable Energy, 32*, 1873-1881.
16. Esfahani, S. M. J., Naderi Mahdiei, K., Saadi, H., & Dourandish, A. (2017). Efficiency and sustainability of silage corn production by data envelopment analysis and multi-functional ecological footprint: evidence from Sarayan county. *Journal of Agricultural Science and Technology, 19*(7), 1453-1468.
17. Farrell, M. J. (1957). The measurement of productive efficiency. *Journal of The Royal Statistical Society, Series* A, *120*(3), 253-290.

18. Fatemi, M., Rezaei, K., Wackernagel, M., & Shennan, C. (2018). Sustainability of environmental management in Iran: an ecological footprint analysis. *Iran Agricultural Research, 37*(2), 53-68. DOI: 10.22099/iar.2018.4958.
19. Gan, Y., Liang, C., Wang, X., & McConkey, B. (2011). Lowering carbon footprint of durum wheat by diversifying cropping systems. *Field Crops Research, 122*, 199-206.
20. Gharkhloo, M., Pourkhabbaz, H., Amiri, M., & Faraji, S. H. (2009). Assessing the ecological potential of Qazvin region to determine potential points of urban development using GIS. *Urban Region Studies and Research, 1*, 51-68. [In Persian]
21. Ghasemi Mobtaker, H., Keyhani, A., Mohammadi, A., Rafiee, S., & Akram, A. (2010). Sensitivity analysis of energy inputs for barley production in Hamedan province of Iran. *Agriculture, Ecosystems and Environment, 137*, 367-372. [In Persian]
22. Global Economy (2023). Fertilizer use-country rankings. Available at https://www.theglobaleconomy.com. Retrieved at 9 November, 2023.
23. Guzman, J., Marrero, M., & Arellano, A. (2013). Methodology for determining the ecological footprint of the construction of residential buildings in Andalusia (Spain). *Ecological Indicator, 25*, 239-249.
24. Habibi, K., Ghaderi, A., Asadi, J., & Rahimi, A. (2018). Assessing the level of sustainability of informal neighborhoods using ecological footprint model, case study: Abbasabad neighborhood of Sanandaj. *Journal of Urban Studies, 26*, 89-98. [In Persian]
25. HAJO (2021). Potato production. Hamedan Agriculture-Jahad Organization (HAJO). Islamic Republic News Agency (IRNA). Available at https://www.irna.ir/news/84416443. Retrieved at 29 July, 2021.
26. Hassanzadeh Qort Tappeh, A., Haji Hassani, M., Nikzad, P., & Zahedmanesh, M. (2008). Evaluation of energy efficiency in tomato cultivation of West Azerbaijan province. Proceedings of the First National Congress on Tomato Production and Processing Technology, Mashhad, 23-24 February, 2008.

27. Hedayat Mazhari, R., Khorramabadi, M., & Lashgarara, S. (2021). Assessing efficiency using data envelopment analysis method and its relation to financial ratios. *Journal of Financial Accounting Research, 13*(3), 89-110. DOI: 10.22108/far.2022.129532.1785. [In Persian]
28. Jadidi, M. R., Sabuni, M. S., Homayounifar, M., & Mohammadi, A. (2012). Assessment of energy use pattern for tomato production in Iran (a case study from the Marand region). *Agricultural Engineering, 58*, 119-130. [In Persian]
29. Kanchanaroek, Y., & Aslam, U. (2018). Policy schemes for the transition to sustainable agriculture: farmer preferences and spatial heterogeneity in northern Thailand. *Land Use Policy, 78*(C), 227-235.
30. Khorramdel, S., Abolhassani, L., & Rahmati, E. (2016). Environmental impacts assessment of saffron agroecosystems using life cycle assessment methodology (case study: Torbat-e Heydariyeh and Ghaen counties). *Journal of Saffron Research, 4*(2), 229-248. [In Persian]
31. Kissinger, M., & Gottlieb, D. (2012). From global to place oriented hectares: the case of Israel's wheat ecological footprint and its implication for sustainable resource supply. *Ecological Indicator, 16*, 51-57.
32. Lim, A. (2020). What is ecological footprint? Definition and how to calculate it. Sustainability for All. A newsletter published by Treehugger. Available at https://www.treehugger.com. Retrieved at 10 August, 2020.
33. Mobtaker, H. G., Akram, A., & Keyhani, A. (2012). Energy use and sensitivity analysis of energy inputs for alfalfa production in Iran. *Energy for Sustainable Development*, *16*, 84-89.
34. MOE (2023). Energy balance sheet. Ministry of Energy (MOE) of Iran, Planning Administration and Microeconomics of Power and Energy. Available at https://pep.moe.gov.ir. Retrieved at 15 November, 2023.
35. Mohammadi, A., & Omid, M. (2010). Economical analysis and relation between energy inputs and yield of greenhouse cucumber production in Iran. *Applied Energy, 87*, 191-196.
36. Mohammadi, A., Rafiee, S., Jafari, A., Keyhani, A., Mousavi Avval, S. H., & Nonhebel, S. (2014). Energy use efficiency and greenhouse gas emissions of

farming systems in north Iran. *Renew, Sustainable Energy Rev*iew, *30*, 724-733.

37. Naderi Mahdiei, K., Bahrami, A., Aazami, M., & Sheklabadi, M. (2015). Assessment of agricultural farming systems sustainability in Hamedan province using ecological footprint analysis (case study: irrigated wheat). *Journal of Agricultural Science and Technology, 17*, 1409-1420. DOR: 20.1001.1.16807073.2015.17.6.21.2.
38. Nikkhah, A., Emadi, B., & Firouzi, S. (2015). Greenhouse gas emissions footprint of agricultural production in Guilan province of Iran. *Sustainable Energy Technologies Assessments, 12*, 10-14.
39. Omid, M., Ghojabeige, F., Delshad, M., & Ahmadi, H. (2011). Energy use pattern and benchmarking of selected greenhouses in Iran using data envelopment analysis. *Energy Conversion and Management, 52*(1), 153-162.
40. Ozkan, B., Akcaoz, H., & Fert, C. (2006). Energy input-output analysis in Turkish agriculture. *Renewable Energy, 29*, 39-51.
41. Pervanchon, E. T. (2002). Assessment of energy use in arable farming systems by means of an agro ecological indicator. *The Energy Indicator, Agricultural System, 72*, 149-172.
42. Rees, W. E., & Wackernagel, M. (1996). Urban ecological footprints: why cities cannot be sustainable and why they are a key to sustainability? *Environmental Impact Assessment Review, 16*, 223-248.
43. Rezaei, P., Naderi Mahdiei, K., Karimi, S., & Shahnazi, K. (2019). Assessing the ecological sustainability of the crop system using ecological footprint analysis (case study: potato and cucumber cultivation in Sefalgaran village of Bahar city). *Journal of Agricultural Knowledge and Sustainable Production, 29*(2), 53-66. [In Persian]
44. Singh, H., Mishra, D., & Nahar, N. M. (2010). Energy use pattern in production agriculture of a typical village in arid zone India – Part I. *Energy Conversion and Management, 43*(16), 2275-2286.
45. Tabatabaie, S. M. H., Rafiee, S. H., Keyhani, A., & Heidari, M. D. (2013). Energy use pattern and sensitivity analysis of energy inputs and input costs

for pear production in Iran. *Renewable Energy, 51*, 7-12.

46. Tittonell, P., & Giller, K. (2013). When yield gaps are poverty traps: the paradigm of ecological intensification in African smallholder agriculture. *Field Crop Research*, *143*, 76-90.
47. Toth, G., Szigeti, C., Harangozo, G., & Szabo, D. (2018). Ecological footprint at the micro-scale, how it can save costs? The case of ENPRO. *Resources*, *7*(3)45, 1-14. DOI: 10.3390/resources7030045.
48. UsEPA (2016). Global greenhouse gas emissions data. United States Environmental Protection Agency (USEPA). Available at https://www.epa.gov/ghgemissions/global-greenhouse-gas-emissions. Retrieved at 22 June, 2021.
49. Vanden Bergh, J. C. J. M., & Grazi, F. (2014). Ecological footprint policy? Land use as an environmental indicator. *Journal of Industrial Ecology, 18*(1), 10-19. DOI: 10.1111/jiec.12045.
50. Vander Werf, H. M. G., & Turnen, L. (2008). The environmental impacts of the production of hemp and flax textile yarn. *Industrial Crops Production, 27*, 1-10.
51. Wackernagel, M., Monfreda, C., Moran, D., Wermer, P., Goldfinger, S., Deumling, D., & Murray, M. (2005). National footprint and biocapacity accounts 2005: the underlying calculation method. *Global Footprint Network*, 1-33. Available at https://elearning.humnet.unipi.it/pluginfile.php/16763/mod_resource/content/0/Footprint%20Method%202005.pdf.
52. Yara International (2023). Crop and agronomy knowledge. Growing more food, sustainably. Available at https://www.yara.com. Retrieved at 9 November, 2023.
53. Yilmaz, I., Akcaoz, H., & Ozkan, B. (2005). An analysis of energy use and input costs for cotton production in Turkey. *Renewable Energy, 30*, 145-155.
54. Yousefi, M., Khorramivafa, M., & Mondani, F. (2014). Integrated evaluation of energy use, greenhouse gas emissions and global warming potential for sugar beet *(*Beta Vulgaris*)* agroecosystems in Iran. *Atmospheric Environment,*

92, 501-505.

55. Zabardast, M., Azizpanah, A., Yeganeh, R., Fath, R., & Bahamin, S. (2023). Evaluation of energy and emission of greenhouse gases for olive production in west Iran (case study: Ilam province, Ilam city). *Agricultural Knowledge and Sustainable Production, 33*(1), 237-250. DOI: 10.22034/saps.2021.41099.2521. [In Persian]
56. Zangeneh, M., Omid, M., & Akram, A. (2010). A comparative study on energy use and cost analysis of potato production under different farming technologies in Hamadan province of Iran. *Energy*, *35*, 2927-2933. [In Persian]
57. Zarei, M. J. (2017). Energy evaluation and economic analysis and environmental effects of tomato and cucumber production under open field cultivation and greenhouse in Fars province. Master Thesis of Agricultural Mechanization, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Ramin. [In Persian]