نشریه مکانیزاسیون کشاورزی/ دوره ۸ شماره ۳/ سال ۱۴۰۲/ صفحه‌های ۴۳-۲۷

ارزیابی تولید توت‌فرنگی گلخانه‌ای به روش هیدروپونیک بر اساس شاخص‌های زیست محیطی، اکسرژی و امرژی برای بهبود پایداری

شهلا حردانی[۱]، مجید خانعلی[۲]، اسداله اکرم[۳]، حسین مبلی[۴]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۳/۳۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۸/۱۹

۱- گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

۲- گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

۳- گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

۴- گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

* مسئول مکاتبه: مجید خانعلی E-mail: khanali@ut.ac.ir

چکیده

در این مطالعه تولید توت‌فرنگی گلخانه‌ای به روش هیدروپونیک در شهرستان ساوجبلاغ از نظر تبعات زیست‌محیطی ناشی از مصرف نهاده‌های کشاورزی، شاخص تقاضای اکسرژی و امرژی مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. نتایج حاصل از شاخص‌های ارزیابی با استفاده از روش IMPACT 2002+ در نرم‌افزار Simapro بدست آمد. نتایج نشان داد که کود فسفات (P_2O_5) با حدود ۸۹ درصد بیش‌ترین تأثیر را بر بخش اثر استخراج منابع دارد. طبق محاسبات انجام شده حاصل از وزن‌دهی، دسته خسارت انسان دارای بیش‌ترین مقدار و دسته کیفیت زیست‌بوم دارای کم‌ترین مقدار خسارت بود. احتراق سوخت دیزل و الکتریسیته به ترتیب با مقادیر ۴۳/۶۸ mPt و ۳۲/۱۷ mPt، دارای تأثیر به‌سزایی در خسارت سلامت انسان بودند. بر اساس شاخص اکسرژی نیز، منابع تجدیدناپذیر فسیلی با سهم حدود ۹۹ درصد و مقدار ۱/۰۹E+۴ مگاژول بر تن، بیش‌ترین تقاضای اکسرژی تجمعی را به خود اختصاص دادند. همچنین بر اساس نتایج، بیش‌ترین امرژی در تولید محصول مربوط به نیروی کار انسانی با مقدار (sej/ha) ۱/۷۳E+۱۶ و پس از آن بیش‌ترین مقادیر امرژی به ترتیب مربوط به آب آبیاری با مقدار (sej/ha) ۱/۳۶E+۱۶ و گاز شهری معادل (sej/ha) ۵/۳۶E+۱۵ محاسبه شد. بر اساس نتایج حاصل، پیشنهاد می‌گردد که با به‌کارگیری روش‌های نوین مدیریت گلخانه بر مبنای مصرف بهینه نهاده‌های کشاورزی، اثرات زیست‌محیطی ناشی از تولید توت‌فرنگی را کاهش و پایداری تولید این محصول را افزایش داد.

واژه‌های کلیدی: اثرات زیست‌محیطی، ارزیابی چرخه زندگی، امرژی، پایداری، توت‌فرنگی

How to cite:

Hardani, Sh., Khanali, M., Akram, A., and Mobli, H. 2023. Evaluation of environmental pollutants in greenhouse strawberry production by hydroponic method using damage, exergy and emergy indicators in order to achieve production sustainability. *Journal of Agricultural Mechanization* 8 (3): 27−43.

Evaluation of environmental pollutants in greenhouse strawberry production by hydroponic method using damage, exergy and emergy indicators in order to achieve production sustainability

Shahla Hardani[1], Majid Khanali[2]*, Asadalah Akram[3], Hossein Mobli[4]

Accepted: June 21, 2023 Received: November 10, 2023

1- Department of Agricultural Machinery Engineering, Faculty of Agriculture, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

2- Department of Agricultural Machinery Engineering, Faculty of Agriculture, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

3- Department of Agricultural Machinery Engineering, Faculty of Agriculture, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

4- Department of Agricultural Machinery Engineering, Faculty of Agriculture, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

Abstract

In this study, strawberry production in hydroponic greenhouses in Saujblag city was evaluated and analyzed in terms of environmental consequences caused by the consumption of agricultural inputs, exergy demand index and emergy demand. The results of the evaluation indicators were obtained using the IMPACT 2002+ method in Simapro software. The results showed that phosphate fertilizer (P2O5) with about 89% has the greatest effect on the resource extraction effect. According to the weighting calculations, the human damage category had the highest amount and the ecosystem quality category had the least amount of damage. Combustion of diesel fuel and electricity had a significant effect on human health damage with values of 43.68 mPt and 32.17 mPt, respectively. According to the exergy index, non-renewable fossil resources with a share of about 99% and a value of 10,893.13 megajoules per ton accounted for the highest cumulative exergy demand. Also, based on the results, the highest emergy in crop production is related to human labor with a value of 1.73E+16 (sej/ha) and then the highest emergy values were related to irrigation water and natural gas with a value of 1.36E+16 and 5.36E+15, respectively. Based on the results, it is suggested that by using new methods of greenhouse management based on the optimal consumption of agricultural inputs and replacing all kinds of chemical fertilizers with organic fertilizers, the environmental effects of strawberry production will be reduced and the sustainability of this product will be increased.

Keywords: Environmental effects, Life cycle assessment, Emergy, Sustainability, Strawberry

۱- مقدمه

با بالا رفتن سطح متوسط زندگی و پیدایش عادات غذایی جدید، درخواست‌کنندگان محصولات خارج از فصل، روزبه‌روز بیش‌تر می‌شوند. توت‌فرنگی به عنوان یکی از میوه‌های نوبرانه که درخواست خارج از فصل آن رو به افزایش است، از نظر شرایط رشد بسیار حساس بوده و در طول دوره رشد برای تولید محصول کافی و با کیفیت، نیاز به محیط کشت مناسب و مواد غذایی کافی دارد (Khammayom et al., 2022).

این محصول با توجه به آمارنامه فائو در سال ۲۰۲۰ در جهان حدود ۸۸۶۱۳۸۱ تن تولید داشته و سطح زیر کشت معادل ۳۸۴۶۶۸ هکتار را به خود اختصاص داده است. میزان تولید این محصول در ایران سالانه حدود ۶۴۹۶۹ تن و مساحت زیر کشت، ۴۲۶۸ هکتار است که با توجه به افزایش تقاضا، تولید این محصول رو به افزایش است (FAO, 2020). استان البرز با حدود ۷۷ هکتار سطح زیر کشت و تولید ۵۷۷۴ تن محصول توت‌فرنگی گلخانه‌ای در سال، قطب تولید توت‌فرنگی گلخانه‌ای کشور است که عمده گلخانه‌های توت‌فرنگی استان در شهرستان ساوجبلاغ فعالیت می‌نمایند (Ministry of Jihad-e-Agriculture of Iran, 2020). گلخانه‌ها با داشتن قابلیت‌هایی نظیر امکان کنترل بهتر عوامل مؤثر در تولید محصول و امکان استفاده از ارتفاع به جای سطح، شرایط مناسبی را برای افزایش تولید در واحد سطح و تولید محصول در خارج از فصل فراهم آورده‌اند. علاوه‌بر این، تلفیق کشت‌های گلخانه‌ای با روش‌های جدید نظیر کشت بدون خاک یا هیدروپونیک امکان کنترل هرچه بهتر تغذیه گیاهان و کنترل بیماری در گیاهان حساس را بیش از پیش فراهم آورده و تحول شگرفی در عرصه تولید محصولات گلخانه‌ای ایجاد نموده است (Rahmani & Mohamadi, 2018). این موضوع باعث شده است که اگر چه تا دو دهه گذشته، روش عمده کشت توت‌فرنگی، روش کشت در خاک بوده؛ ولی امروزه کشاورزان دنیا به سوی تولید توت‌فرنگی به روش کشت بدون خاک روی آورند (Khan, 2018). این افزایش تولید با افزایش استفاده از منابع انرژی همراه بوده است. افزایش استفاده از حامل‌های انرژی در تولید محصولات کشاورزی، باعث مشکلات متعدد زیست‌محیطی مانند مصرف بالای منابع تجدیدناپذیر انرژی، از بین رفتن گونه‌های زیستی و عدم تعادل در محیط زیست شده است؛ به‌طوری‌که سهم کشاورزی در انتشار گازهای گلخانه‌ای (GHG[1]) حدود ۱۲-۱۰ درصد کل انتشارات گازها در جهان می‌باشد (Gołasa et al., 2021). در طول ۱۰۰ سال گذشته، میانگین دمای کره‌ی زمین افزایش یافته است. دانشمندان دلیل افزایش دمای زمین را ناشی از افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌دانند. بنابراین کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در سامانه‌های کشاورزی نوین به‌همراه افزایش عملکرد تولید محصول از اهداف مهم در سامانه‌های تولیدی می‌باشد (Sharma et al., 2021). لذا به منظور بررسی شاخص‌های جامع زیست‌محیطی از زمان تولید تا زمان مصرف محصول، از یک روش محوری کاملاً شناخته شده تحت عنوان ارزیابی چرخه زندگی (LCA)[2] استفاده می‌شود. این روش برای ارزیابی پیامدهای زیست‌محیطی و مصرف انرژی حاصل از تولید یک محصول، فرآیند یا ارائه خدمات از استخراج و فرآوری مواد خام، تولید، توزیع، استفاده تا مصرف نهایی و همچنین تعیین تأثیرات ضایعات آن روی محیط و ارزیابی فرصت‌ها برای بهبود شرایط زیست‌محیطی تولید آن محصول کاربرد دارد. از جمله مزایا و کاربردهای این روش، تجزیه و تحلیل منشأ مشکلات مرتبط با تولید یک محصول خاص، مقایسه پیشرفت متغیرهای یک محصول، کمی‌سازی انتشار به هوا، آب و زمین در هر مرحله از چرخه زندگی، ارزیابی اثرات انسانی و اکولوژیکی مصرف مواد و انتشار به محیط زیست در جوامع محلی، منطقه‌ای و جهانی می‌باشد (Kastratović, 2019).

لازم به ذکر است که صرف افزایش تولید، بدون توجه به پایداری نه‌تنها مشکلی را حل نخواهد کرد؛ بلکه مسائل متعدد زیست‌محیطی، اجتماعی و اقتصادی را نیز ایجاد خواهد نمود. از این رو، دستیابی به نظام‌های کشاورزی پایدار ضرورت اجتناب‌ناپذیر آینده بخش کشاورزی است، چرا که امنیت غذایی، زیست‌محیطی و اقتصادی از پایداری کشاورزی بدست می‌آید و تولید توت‌فرنگی نیز از این امر مستثنی نمی‌باشد (Tang et al., 2020). یکی از روش‌های شناخته‌شده ارزیابی پایداری تولید یک محصول، تحلیل امرژی است. تحلیل امرژی یک روش نوین در ارزیابی پایداری بر اساس انرژی و برآورد دقیق کمیت و کیفیت انرژی مصرفی است. امرژی، انرژی در دسترس خورشیدی است که به طور مستقیم یا غیرمستقیم استفاده می‌شود تا به ارائه خدمات و یا محصول منجر شود. به امرژی، انرژی مجسم[3] یا حافظه انرژی می‌گویند و با واحد امژول خورشیدی sej بیان می‌شود (Lyu et al., 2021). علاوه‌بر امرژی، شاخص تقاضای اکسرژی تجمعی به عنوان مجموع اکسرژی تمامی منابع مورد استفاده جهت تولید یک محصول و یا ارائه یک فعالیت خدماتی بیان می‌شود. شاخص دیگری تحت عنوان شاخص تقاضای انرژی نیز وجود دارد که علیرغم رایج‌تر بودن، کیفیت منابع انرژی و غیرانرژی (مواد معدنی و فلزات) را در نظر نمی‌گیرد؛ بنابراین شاخص تقاضای اکسرژی را می‌توان شاخص کامل‌تری دانست (Kaab et al., 2019).

مفاخری و همکاران در مطالعه‌ای به ارزیابی اثرات زیست‌محیطی تولید توت‌فرنگی به دو روش ارگانیک و مرسوم در استان کردستان پرداختند. آن‌ها؛ گرمایش جهانی، اسیدی شدن، سرشارسازی، اکسیداسیون‌های فتوشیمیایی، سمیت آب‌های شیرین، سمیت برای آبزیان دریایی، سمیت برای خشکی‌ها، سمیت برای انسان، استفاده از منابع غیرزنده و کاهش لایه اوزن را براساس روش CML2 baseline2000 V2/ world1995 مورد بررسی قرار دادند. ارزیابی اثرات در دو نظام کشت رایج و ارگانیک نشان داد که در همه بخش‌های

[1] Greenhouse Gases
[2] Life cycle assessment
[3] Embodied energy

اثر، اثرات محیط زیستی کشت رایج توت‌فرنگی بیش‌تر از کشت ارگانیک است و در کشت مرسوم، کودها و الکتریسیته بیش‌ترین اثرات مخرب را به محیط‌زیست وارد می‌نمایند (Mafakheri et al., 2017).

کاظمی و زرداری در سال ۲۰۲۰، تولید توت‌فرنگی را در استان کردستان از منظر زیست‌محیطی به دو روش آبیاری جوی‌پشته‌ای و قطره‌ای مورد بررسی و مقایسه قرار دادند. نتایج مطالعه این پژوهشگران نشان داد که کل انتشار گازهای گلخانه‌ای در دو روش جوی‌پشته‌ای و قطره‌ای به ترتیب برابر ۷۶۴/۲۸ و ۱۲۸۴/۱۹ کیلوگرم دی‌اکسیدکربن معادل در هکتار می‌باشد. در روش آبیاری جوی‌پشته‌ای، کود نیتروژن و سوخت دیزل به ترتیب با ۵۱/۷۶ و ۲۰/۷۲ درصد، بیش‌ترین سهم را در انتشار گازهای گلخانه‌ای داشتند. اما در روش قطره‌ای، به‌کارگیری ماشین با ۵۳/۱۱ درصد، بیش‌ترین سهم را در انتشار گازهای گلخانه‌ای داشت (Kazemi & Zardari, 2020).

لطفی و همکاران وضعیت پایداری زیست‌بوم‌های زراعی کلزا در شهرستان کلاله را مورد بررسی قرار دادند. بر اساس نتایج حاصل، امرژی ورودی سالانه کل برای کشت کلزا، $۱/۶۴\times۱۰^{۱۶}$ امژول خورشیدی در هکتار محاسبه شد و بیان شد که وابستگی به ورودی‌های محیطی و تجدیدناپذیر، بیش‌تر از ورودی‌های خریداری شده و تجدیدپذیر می‌باشد. بیش‌ترین سهم از امرژی ورودی کل در کشت کلزا مربوط به فرسایش خاک با ۴۷/۳۱ درصد بود. در مطالعه ایشان، شاخص ضریب تبدیل برابر $۲/۵۹\times۱۰^{۵}$ امژول خورشیدی بر ژول، امرژی ویژه معادل $۷/۳۳\times۱۰^{۹}$ امژول خورشیدی بر گرم، تجدیدپذیری امرژی برابر ۸/۱۶ درصد، نسبت عملکرد امرژی معادل ۲/۱۷، نسبت سرمایه‌گذاری امرژی برابر ۰/۸۵ و نسبت خودحمایتی امرژی برابر ۰/۵۴ بیان شده است (Lotfi et al., 2021).

مفتح و همکاران در مطالعه‌ای به منظور بررسی تقاضای اکسرژی تجمعی برای تولید هر هکتار گل محمدی، نشان دادند که منابع تجدیدناپذیر فسیلی از بین انرژی‌های تجدیدناپذیر بیش‌ترین تقاضای اکسرژی تجمعی معادل ۱۰۴۳۰/۸۴ مگاژول را به خود اختصاص داده است. همچنین از بین انرژی‌های تجدیدپذیر، آب آبیاری با ۸۷۷۷۷/۳۳ مگاژول، بیش‌ترین تقاضای اکسرژی تجمعی را به خود اختصاص داد (Mofatah, 2018).

با توجه به اینکه توت‌فرنگی یکی از مهم‌ترین محصولات گلخانه‌ای تولیدی در استان البرز و شهرستان ساوجبلاغ است و از سویی شناسایی و ارزیابی اثرات زیست‌محیطی حائز اهمیت است، هدف از انجام پژوهش حاضر ارزیابی چرخه زندگی، بررسی شاخص تقاضای اکسرژی و تحلیل امرژی مربوط به تولید توت‌فرنگی گلخانه‌ای به روش هیدروپونیک در راستای دستیابی به تولید پایدار می‌باشد.

۲- مواد و روش‌ها

داده‌ها و اطلاعات مورد نیاز از طریق پرسشنامه و مصاحبه حضوری با گلخانه‌داران شهرستان ساوجبلاغ در سال ۱۴۰۰ جمع‌آوری شد. با توجه به گستردگی جامعه آماری برابر ۲۳۰ واحد گلخانه تولیدی فعال، حجم نمونه (n) با استفاده از رابطه کوکران (رابطه ۱)، برابر ۱۴۳ واحد گلخانه محاسبه شد (Kaab et al., 2019).

$$n=\frac{\frac{z^2pq}{d^2}}{1+\frac{1}{N}(\frac{z^2pq}{d^2}-1)} \quad (۱)$$

که در آن، p و q نسبت موفقیت و شکست برابر ۰/۵، مقدار Z^2 در سطح خطای ۰/۰۵ معادل ۱/۹۶ (اعداد ذکر شده با استفاده از بدیهیات توزیع نرمال قید شده‌اند)، خطای d برابر ۰/۰۵ و N حجم جامعه موردنظر است (Cochran, 1997).

۲-۱- ارزیابی چرخه زندگی

ارزیابی چرخه زندگی روشی است که برای بررسی تأثیرات زیست‌محیطی مراحل گوناگون چرخه زندگی یک محصول یا فرایند از گهواره تا گور استفاده می‌شود. در این روش، تمام مراحل تولید یک محصول از مرحله استخراج مواد اولیه تا دفع یا مدیریت پسماندهای باقی‌مانده از مصرف آن محصول مورد بررسی قرار گرفته و نتایج حاصل از آن جهت کاهش تأثیرات مخرب زیست‌محیطی مورد استفاده قرار می‌گیرد (Van der Werf et al., 2020). در این پژوهش، تحلیل ارزیابی چرخه زندگی با استفاده از نرم‌افزار Simapro V 9.1.1.1 انجام شد. این نرم‌افزار یکی از پرکاربردترین نرم‌افزارهای ارزیابی چرخه زندگی می‌باشد. روند ارزیابی چرخه زندگی بر اساس استاندارد ISO 2006 از چهار مرحله تشکیل شده است که شامل تعیین هدف و دامنه، تحلیل سیاهه، ارزیابی اثرات و تفسیر نتایج می‌باشد (ISO, 2006).

۲-۱-۱- تعیین هدف و دامنه

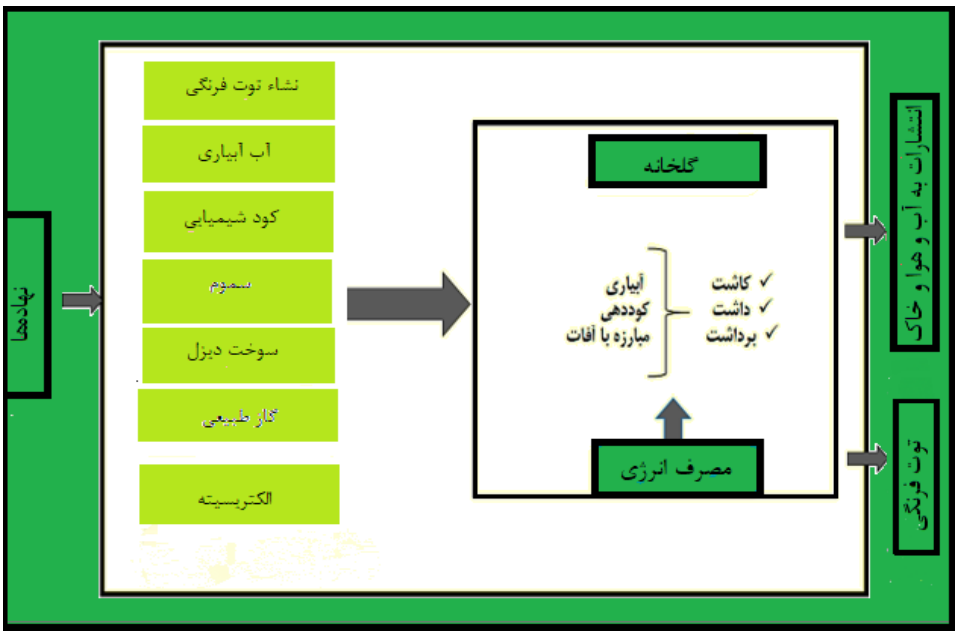
در مطالعه حاضر، تعیین هدف و دامنه در ارزیابی چرخه زندگی و ارزیابی اکسرژی مشترک بوده و اولین قدم در ارزیابی این دو شاخص است. در این مرحله تعریف هدف، مشخص کردن واحد کارکردی و تعیین مرز سامانه مدنظر است، بطوری‌که چارچوب کلی کار که شامل واحدهای کارکردی، مرزهای سامانه، تخصیص منابع و انتخاب بخش‌های اثر[1] است، مشخص می‌شود (Tricase et al., 2018). در این پژوهش، بررسی اثرات زیست‌محیطی بخش‌های مختلف در تولید توت‌فرنگی گلخانه‌ای به روش هیدروپونیک به عنوان هدف در نظر گرفته شد. به طور کلی؛ سه واحد کارکردی متفاوت برای ارزیابی چرخه زندگی محصولات کشاورزی بر اساس سطح زیرکشت، قیمت و جرم ماده تولیدی پیشنهاد شده است (Svanes & Johnsen, 2019). در این پژوهش واحد کارکردی برای ارزیابی چرخه زندگی و اکسرژی به صورت یک تن محصول تولیدی

[1]- Impact categories

توت‌فرنگی در نظر گرفته شد، بدین معنا که تمامی آلاینده‌های انتشار یافته بر پایه نهاده‌های مصرفی برای تولید یک تن محصول محاسبه و گزارش شد. انتخاب مرز سامانه باید با هدف مطالعه سازگار باشد. معیارهای مورد استفاده در برقراری مرز سامانه باید شناسایی و تشریح شود. تصمیم‌گیری باید با یکای فرآیندهایی که در مطالعه وارد شده‌اند، سازگار باشد و زیر بخش‌های یک سامانه را بهتر بیان کند. مرز سامانه تولید محصول در پژوهش حاضر برای دو شاخص ارزیابی چرخه زندگی و ارزیابی اکسرژی از ابتدای تولید تا برداشت محصول نهایی مطابق شکل (۱) در نظر گرفته شد.

۲-۱-۲- تحلیل سیاهه چرخه زندگی

در این مرحله، منابع استفاده شده و انتشار آلاینده‌ها در کل یا بخشی از دوره زندگی محصول با توجه به مرزهای سامانه، ارائه می‌شود (Benis & Ferrao, 2017). اطلاعات مورد نیاز در این مطالعه به دو گروه تقسیم شدند: داده‌های پس زمینه‌ای[1] که شامل اثرات زیست محیطی مربوط به تولید یا تهیه و حمل و نقل نهاده‌های مصرفی است. این اطلاعات با توجه به گستردگی و عدم وجود اطلاعات کافی از فرآیند تولید، از داده‌های موجود در پایگاه اکواینونت نرم افزار سیماپرو استخراج شد. در دسته دوم اطلاعات مربوط به نوع و میزان زیان‌های ورودی و خروجی به سامانه مورد مطالعه تحت عنوان داده‌های پیش زمینه‌ای[2] که از طریق مصاحبه حضوری، پرسشنامه و منابع موجود گردآوری شد. بنابراین کیفیت داده‌های جمع‌آوری شده به منظور تحلیل سیاهه چرخه زندگی در اجرای موفق ارزیابی چرخه زندگی همواره یک عامل پراهمیت محسوب می‌شود. به عبارتی دستیابی به داده‌های معتبر عامل مهمی در پیشرفت و استفاده از ارزیابی چرخه زندگی در مدیریت صحیح زیست‌محیطی است (Rivera et al., 2017). انتشارات مورد مطالعه در دو دسته انتشارات مستقیم و غیرمستقیم قرار گرفت: انتشارات مستقیم شامل انتشارات ناشی از احتراق سوخت دیزل Nemecek et al., (2007) و احتراق گاز طبیعی (نرم افزار سیماپرو) و انتشار ناشی از مصرف کودهای شیمیایی (Yang & Kim., 2020) بود که در محاسبه آن‌ها از منابع موجود استفاده شد. انتشارات غیرمستقیم شامل سایر انتشارات به غیر از انتشارات مستقیم می‌باشد که برای برآورد آن‌ها از پایگاه داده اکواینونت موجود در نرم افزار استفاده شد.



شکل ۱- مرز سامانه تولید محصول مورد مطالعه

Fig 1. The boundary of the studied product production system

در جدول (۱) مقادیر متوسط نهاده‌های ورودی و ستانده خروجی در سطح یک هکتار، در نظر گرفته شده به عنوان بخشی از سیاهه چرخه زندگی ارائه شده است.

[1] Background data

[2] Foreground data

جدول ۱- میانگین نهاده‌ها و ستانده در تولید توت‌فرنگی گلخانه‌ای به روش هیدروپونیک در سطح یک هکتار (مطالعه حاضر)

Table 1. Average inputs and outputs in greenhouse strawberry production by hydroponic method at the level of one hectare (present study)

عنوان	واحد	مقدار
الف) نهاده‌ها		
۱- ماشین‌ها و تجهیزات ثابت	kg	۷۵/۳۵
۲- سوخت دیزل	L	۴۵۰۳/۷
۳- نیروی انسانی	h	۱۴۴۴۱
۴- الکتریسیته	kWh	۳۸۷۷۹/۷
۵- کود (KNO_3)	kg	۶۹۸/۳
۶- کود (P_2O_5)	kg	۱۸۷۲/۸
۷- کود (K_2O)	kg	۹۹۵/۲
۸- کودهای میکرو	kg	۵۲/۶
۹- آبیاری	m^3	۲۵۱۳۴/۴
۱۰- سموم شیمیایی	kg	۳۵/۵
۱۱- گاز شهری	m^3	۱۲۴۷۱/۱
ب) ستانده		
۱- توت‌فرنگی	kg	۹۷۵۹۴/۴

۲-۱-۳- ارزیابی اثرات چرخه زندگی

با توجه به اینکه نتایج حاصل از تحلیل سیاهه حاوی مواد مختلف زیادی بوده که تصمیم‌گیری بر مبنای آن‌ها با توجه به متفاوت بودن بار زیست‌محیطی‌شان کار بسیار دشواری است، از ارزیابی اثرات چرخه زندگی استفاده می‌شود که به تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کند تا محصول یا فرآیندی را با کم‌ترین تأثیر زیست‌محیطی انتخاب کنند (Ahmadbeyki, et al., 2023). در این مرحله، اثرات بالقوه ناشی از مصرف منابع محیطی و تولید آلاینده‌ها بر انسان و طبیعت ارزیابی می‌گردد (Lyu et al., 2021). در واقع هدف از ارزیابی اثرات چرخه زندگی، تفسیر بیش‌تر داده‌های سیاهه چرخه زندگی است (Mohammadi-Kashka et.al., 2023). همچنین در این مرحله به منظور تفسیر نتایج؛ انتشار آلاینده‌های مهم در بخش‌های اثرگذار، خلاصه و ارائه می‌شوند و تمام نتایج به منظور نتیجه‌گیری و ارائه راهکارها مورد تحلیل قرار می‌گیرند (Cohen et al., 2018). در این مطالعه، مدل‌سازی تحلیل سیاهه و ارزیابی اثرات زیست‌محیطی با استفاده از روش IMPACT 2002+ V2.12 انجام شد. این روش ترکیبی از سه روش IMPACT 2002+، Eco-Indicater 99 و CML است که تعداد ۱۵ شاخص اثر نشان داده شده در جدول شماره ۳ را به چهار رده خسارت موجود در جدول شماره ۴ تبدیل کرده و آن‌ها را مورد ارزیابی قرار می‌دهد (Skunca et al., 2018).

۲-۱-۴- تفسیر نتایج

در این مرحله نتایج حاصل از تحلیل سیاهه و ارزیابی اثرات چرخه زندگی مورد بررسی قرار گرفته و در راستای تصمیم‌گیری بهتر از آن‌ها بهره گرفته می‌شود. همچنین پیشنهادهایی در خصوص پژوهش ارائه می‌گردد.

۲-۲- شاخص تقاضای اکسرژی تجمعی

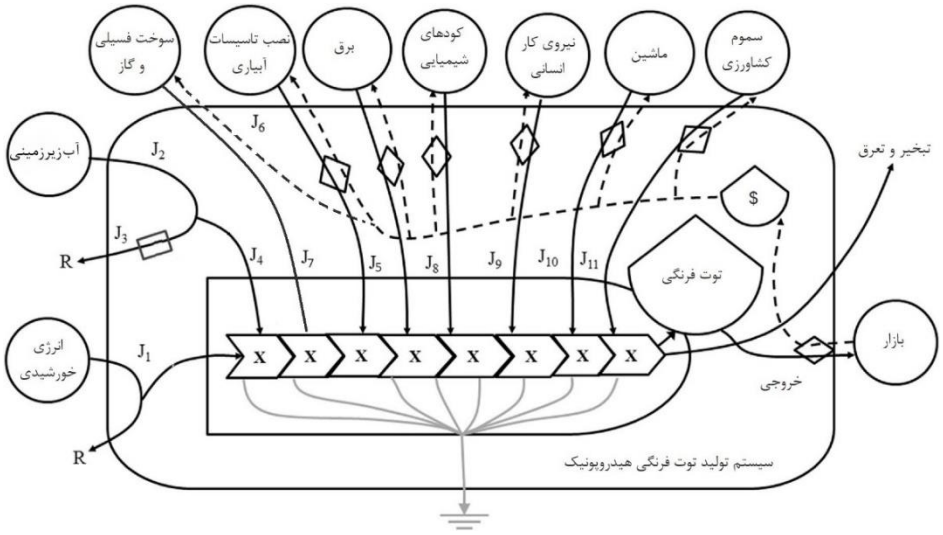
شاخص تقاضای اکسرژی تجمعی به درک بهتر کارایی مصرف انرژی سامانه کمک بسزایی می‌کند، در واقع اکسرژی مفیدترین کار ممکن در طول فرآیندی است که سامانه را با محیط متعادل می‌کند (Asakereh, et al., 2023).

شاخص تقاضای اکسرژی تجمعی به عنوان مجموع اکسرژی حذف شده از طبیعت برای ارائه یک فرآیند و یا محصول تعریف شده است و به صورت مگاژول معادل (MJ eq.) بیان می‌شود. این شاخص به هفت زیرگروه منابع فسیلی، اولیه، آبی، زیست‌توده، سایر انرژی‌های تجدیدپذیر، آب، مواد معدنی و فلزات تقسیم می‌شود که بیان‌گر حذف اکسرژی کل از طبیعت به منظور تولید محصول و یا خدمات در مرز سامانه‌های مورد نظر تعریف شده است (Ahmadbeyki, et al., 2023). در این مطالعه تولید توت‌فرنگی گلخانه‌ای به روش هیدورپونیک از لحاظ شاخص تقاضای اکسرژی تجمعی در رده‌های اثر منابع تجدیدناپذیر-فسیلی، اولیه، مواد معدنی، فلزات، منابع تجدیدپذیر-پتانسیل، آب، زیست توده مورد بررسی قرار گرفت.

اولین گام در روش مطالعه شاخص تقاضای اکسرژی تجمعی، بیان هدف و مشخص کردن واحد کارکردی و تعیین مرز سامانه است. در این مطالعه؛ مرز سامانه و در نهایت تحلیل سیاهه بر اساس ورودی‌ها و خروجی‌های سامانه مشابه با تحلیل ارزیابی چرخه زندگی در نظر گرفته شد. به دلیل نبود اطلاعات کافی در رابطه با تقاضای اکسرژی تجمعی در فرآیندهای تولید از اطلاعات موجود در پایگاه داده اکوایونت موجود در نرم‌افزار سیماپرو استفاده شد.

۲-۳- شاخص امرژی

مرحله نخست در تحلیل امرژی، مشخص کردن مرزهای مکانی و زمانی و ترسیم نمودار امرژی برای طبقه‌بندی نهاده‌های مورد استفاده در نظام کشت مورد بررسی به منابع تجدیدپذیر یا تجدیدناپذیر، محیطی و خریداری شده است (با توجه به شکل (۲) در مطالعه حاضر نهاده‌های محیطی شامل انرژی خورشیدی، تبخیر و تعرق و آب زیرزمینی بود و سایر نهاده‌ها در دسته نهاده‌های خریداری شده قرار گرفت). در واقع نمودار امرژی برای نشان دادن ورودی‌ها و خروجی‌های نظام تولید محصول مورد بررسی استفاده می‌شود. این امر برای مدیریت روابط بین اجزای اصلی و فرآیندهای نظام ضروری است (Wang et al., 2022). نمودار امرژی نظام کشت توت‌فرنگی گلخانه‌ای به روش هیدروپونیک در استان البرز در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲- نمودار امرژی سامانه کشت توت‌فرنگی گلخانه‌ای به روش هیدروپونیک
Fig 2. Emergy diagram of greenhouse strawberry cultivation system by hydroponic method

مرحله دوم در تحلیل امرژی ترسیم جدول‌های ارزیابی امرژی است. از اطلاعات خام هر نهاده بر حسب (ژول، گرم یا دلار) ضرب در ضرایب تبدیل آن‌ها مقدار امرژی هر نهاده به دست می‌آید. در مواردی که نیاز به میزان انرژی نهاده بود از حاصل ضرب مقدار نهاده مصرفی در ضریب هم ارز انرژی آن استفاده شد که در جدول (۲) ذکر شده است.

جدول ۲- هم‌ارز انرژی نهاده‌های مورد استفاده در گلخانه
Table 2. The energy equivalent of the inputs used in the greenhouse

عنوان	هم‌ارز انرژی (Mj/unit)	منبع
الف) نهاده‌ها		
۱- ماشین‌ها (h)	۶۴/۸	(Hatirli et al., 2006)
۲- سوخت دیزل (L)	۴۷/۸	(Kitani, 1999)
۳- نیروی انسانی (h)	۱/۹۶	(Hatirli et al., 2006)
۴- الکتریسیته (kWh)	۱۱/۹۳	(Kitani, 1999)
۵- کود (KNO_3) (kg)	۶۶/۱۴	(Hatirli et al., 2006)
۶- کود (P_2O_5) (kg)	۱۲/۴۴	(Hatirli et al., 2006)
۷- کود (K_2O) (kg)	۱۱/۱۵	(Hatirli et al., 2006)/ (Canakci & Akinci , 2006)
۸- کودهای میکرو (kg)	۱۲۰/۰۰	(Acaroglu, 1999)
۹- آبیاری (m^3)	۱/۰۲	(Nieuwkoop et al., 1998)
۱۰- سموم شیمیایی (kg)	۱۹۹/۰۰	
ب) ستانده		
۱- توت‌فرنگی (kg)	۱/۹	(Singh et al., 1997)

امرژی کل مجموع امرژی از تمام نهاده‌های مستقل است. رابطه (۲) روش تبدیل انرژی به امرژی را نشان می‌دهد.

(۲) ضریب تبدیل(seJ/J) × انرژی (J) = امرژی (seJ)

بعد از بدست آوردن امرژی هر نهاده و امرژی ورودی و ستانده به محاسبه شاخص‌های امرژی که در ادامه آورده شده است، پرداخته شد.

۱-۳-۲- شاخص نسبت عملکرد امرژی

این شاخص حاصل تقسیم امرژی ستانده بر ورودی‌های خریداری شده امرژی بوده و با استفاده از رابطه (۳) ارزیابی شد.

$$EYR = \frac{Y}{NP + RP} \qquad (۳)$$

که در آن EYR نسبت عملکرد امرژی، Y خروجی امرژی، NP نهاده‌های خریداری شده تجدیدناپذیر و RP نهاده‌های خریداری شده تجدیدپذیر است.

هرچه مقدار این شاخص بالاتر باشد نشان دهنده برگشت بیش‌تر امرژی به ازای امرژی سرمایه‌گذاری شده برای تولید است.

۲-۳-۲- شاخص نسبت سرمایه‌گذاری امرژی

این شاخص حاصل تقسیم ورودی‌های خریداری شده به ورودی‌های محیطی است و از طریق رابطه (۴) محاسبه شد.

$$EIR = \frac{NP + RP}{RR + NR} \qquad (۴)$$

که در آن EIR نسبت سرمایه گذاری امرژی، NP و RP به ترتیب نهاده‌های خریداری شده تجدیدناپذیر و نهاده‌های خریداری شده تجدیدپذیر و RR و NR به ترتیب نهاده‌های محیطی تجدیدپذیر و نهاده‌های محیطی تجدیدناپذیر است. هرچه این شاخص کم‌تر باشد هزینه اقتصادی نظام تولیدی کم‌تر بوده است.

۳-۳-۲- شاخص نسبت بار زیست‌محیطی

این شاخص نسبت کل ورودی‌های تجدیدناپذیر (محیطی و خریداری شده) بر ورودی‌های تجدیدپذیر (محیطی و خریداری شده) بوده و از رابطه (۵) بدست می‌آید.

$$ELR = \frac{NP + NR}{RR + RP} \quad (۵)$$

که در آن ELR نسبت بار زیست‌محیطی، NP و NR به ترتیب نهاده‌های تجدیدناپذیر خریداری شده و محیطی؛ RR و RP به ترتیب نهاده‌های تجدیدپذیر خریداری شده و محیطی می‌باشد.

۴-۳-۲- شاخص نسبت خود حمایتی امرژی

این شاخص از تقسیم امرژی کل ورودی‌های محیطی به امرژی ستانده با استفاده از رابطه‌ی (۶) بدست آمد.

$$ESR = \frac{RR + NR}{Y} \quad (۶)$$

که در آن RR وNR به ترتیب نهاده‌های محیطی تجدیدپذیر و نهاده‌های محیطی تجدیدناپذیر، Y امرژی عملکرد و ESR نسبت خود حمایتی امرژی است.

شاخص پایداری زیست‌محیطی حاصل تقسیم نسبت عملکرد امرژی به نسبت بار زیست‌محیطی می‌باشد و از رابطه (۷) محاسبه می‌شود.

$$ESI = \frac{EYR}{ELR} \quad (۷)$$

که در آن ESI شاخص پایداری زیست‌محیطی، EYR نسبت عملکرد امرژی و ELR نسبت بار زیست‌محیطی است (Asgharipour et al. 2020).

۳- نتایج و بحث

۱-۳- ارزیابی اثرات زیست‌محیطی

بر اساس نتایج گزارش شده در جدول (۳) و با توجه به روش مورد استفاده در تجزیه و تحلیل، تولید هر تن توت‌فرنگی گلخانه‌ای منجر به ایجاد ۱۵ گروه اثر با مقادیر و واحدهای مختلف شده است. با توجه به شکل (۳) در بخش اثر مواد سرطان‌زا، عمده‌ی آلایندگی با حدود ۵۹٪ مربوط به انتشارات گاز طبیعی بود و بعد از آن الکتریسیته با ۳۶٪ سهم قابل توجهی از اثر را به خود اختصاص داد. در بررسی اثر مواد غیر سرطان‌زا، بیش‌ترین سهم با ۴۹٪ مربوط به کود پتاس و پس از آن به ترتیب انتشارات گاز طبیعی و الکتریسیته با ۲۶٪ و ۱۲٪ بود. در گروه اثر تنفس مواد آلی، به ترتیب انتشارات ناشی از احتراق سوخت دیزل و الکتریسیته با ۴۸٪ و ۲۷٪ بیش‌ترین تأثیر را نشان دادند. همچنین عمده اثر تابش یونیزه مربوط به الکتریسیته و سوخت دیزل با ۴۵٪ و ۳۸٪ گزارش شد. در گروه اثر تخریب لایه اوزن الکتریسیته و انتشارات سوخت دیزل به ترتیب با ۳۶٪ و ۲۷٪ بیش‌ترین سهم را به خود اختصاص دادند. در گروه اثر تنفس مواد معدنی الکتریسیته و گاز طبیعی با ۴۰٪ و ۳۹٪ نقش بسزایی ایفا کردند. گروه اثر دیگر مسمومیت آبزیان بود که در آن کود فسفاته، انتشارات گاز طبیعی و الکتریسیته به ترتیب با مقادیر ۳۵٪ و ۳۲٪ و ۲۵٪ اثرگذارترین نهاده‌های مصرفی بودند. در گروه اثر مسمومیت منابع خاکی الکتریسیته و کود فسفاته با ۳۲٪ و ۳۰٪ عوامل اصلی عنوان شدند. در بخش اسیدی شدن خاک، انتشارات ناشی از احتراق سوخت دیزل و الکتریسیته به ترتیب با ۵۴٪ و ۲۶٪، نهاده‌های قابل توجه بودند. در گروه اثر اشغال اراضی؛ اثربخش‌ترین نهاده‌ها، کود پتاس و کود فسفاته گزارش شدند که با ۵۰٪ و ۴۸٪ چیزی در حدود کل اثر را بر جای گذاشتند. در گروه اثر اسیدی شدن محیط آبی، الکتریسیته و انتشارات ناشی از احتراق سوخت دیزل با ٪۳۸ و ۲۹٪ اثر قابل توجهی داشتند. در گروه اثر گرمایش جهانی؛ الکتریسیته و انتشارات ناشی از احتراق گاز طبیعی به ترتیب با ۴۱٪ و ۳۰٪ بیش‌ترین سهم را به خود اختصاص دادند. در گروه اثر انرژی تجدیدناپذیر، باز هم الکتریسیته و گاز طبیعی با ۴۱٪ و ۳۸٪ مؤثرترین نهاده‌ها بودند. آخرین گروه اثر، استخراج معادن بود که کود فسفاته با ۸۹٪ عمده این اثر را در بر گرفت. با توجه به اینکه الکتریسیته، سوخت دیزل و گاز طبیعی در اکثر گروه‌های اثر نقش برجسته‌ای داشتند. لذا مدیریت و مصرف بهینه این نهاده‌ها در درجه اول و جایگزین‌سازی آن‌ها با استفاده از منابع تجدیدپذیر در درجه دوم بسیار حائز اهمیت است. یکی از روش‌های نوین در مدیریت همزمان مصرف الکتریسیته و گاز طبیعی در گلخانه‌ها استفاده از سامانه‌های تولید همزمان حرارت و برق، CHP[1] می‌باشد. در این سامانه‌ها، همزمان با مصرف گاز طبیعی؛ علاوه بر گرمایش، الکتریسیته نیز تولید می‌شود. همچنین کربن دی اکسید تولید شده بر اثر سوختن گاز طبیعی به مصرف گیاه می‌رسد و به این طریق یک مدیریت سه جانبه توأم با کاهش مصرف انرژی و افزایش بهره‌وری و کاهش هزینه‌ها را در پی خواهد داشت (Tan et al., 2023).

جدول ۳- شاخص‌های ارزیابی چرخه زندگی در تولید یک تن توت‌فرنگی گلخانه‌ای به روش هیدروپونیک

Table 3. Life cycle evaluation indicators in the production of one ton of greenhouse strawberry by hydroponic method

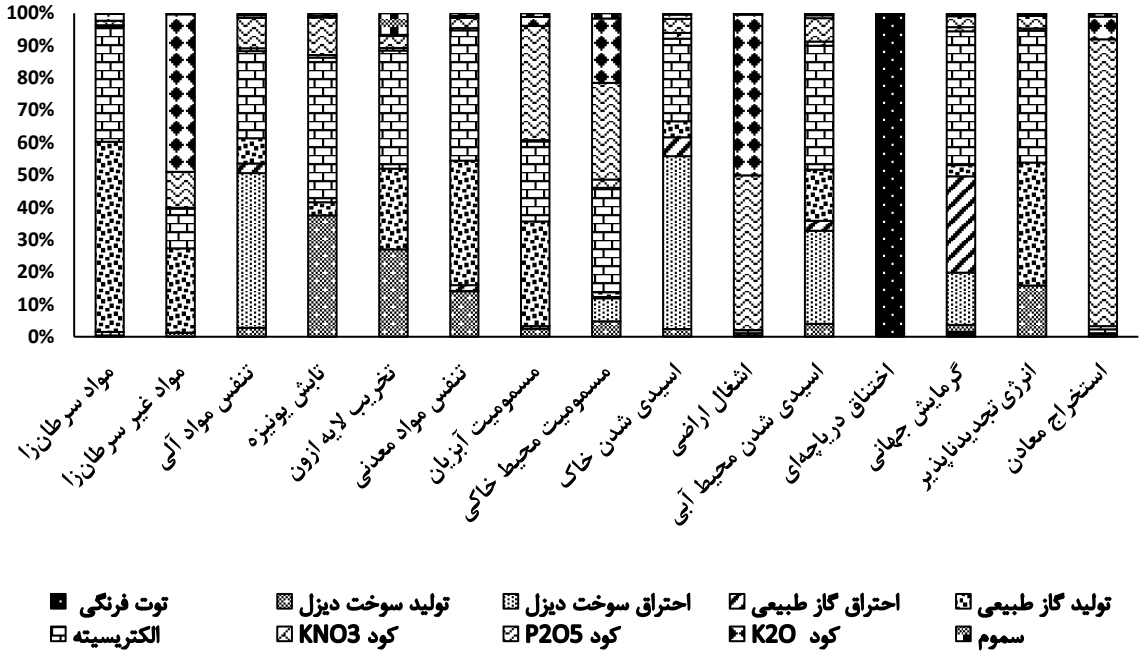
بخش‌های اثر	واحد	مقدار
مواد سرطان‌زا	kg C2H3Cl eq.	۵۰/۲۸
مواد غیرسرطان‌زا	kg C2H3Cl eq.	۱۳/۵۹
تنفس مواد آلی	kg PM2/5 eq.	۰/۹۲
تابش یونیزه	Bq C-14 eq.	۲۴۸۷/۴۶

[1] Combined Heat and Power

تخریب لایه ازون	kg CFC-11 eq.	۰/۰۰۰۱
تنفس مواد معدنی	kg C2H4 eq.	۰/۲۰
مسمومیت آبزیان	kg TEG water	۳۰۰۹۴/۰۴
مسمومیت محیط خاکی	kg TEG soil	۱۸۶۹/۳۵
اسیدی شدن خاک	kg SO2 eq.	۱۹/۷۴
اشغال اراضی	m2org/arable	۶/۷۴
اسیدی شدن محیط آبی	kg SO2 eq.	۴/۸۱
اختناق دریاچه‌ای	kg PO4 P-lim	۲۱/۶۵
گرمایش جهانی	kg CO2 eq.	۸۴۱/۶۲
انرژی تجدیدناپذیر	MJ primary	۱۴۰۵۲/۸۲
استخراج معادن	MJ surplus	۱/۸۲

تکنولوژی گازی‌سازی پلاسما برای تولید انرژی از پسماندهای جامد نیز روشی دیگر برای تولید انرژی است که می‌تواند از زیست توده و بقایای موجود در گلخانه نیز استفاده کند (Sanjaya & Abbas, 2023). همچنین روش استفاده از پیل سوختی در تصفیه فاضلاب همزمان با تولید انرژی علاوه بر اینکه روشی دوستدار محیط زیست است یک راه‌حل ملموس و پیشتاز برای بحران انرژی آینده می‌باشد (Imanthi et al., 2023). در مطالعه مفاخری و همکاران (۲۰۱۷)، گرمایش جهانی به ازای تولید یک تن توت‌فرنگی برای کشت رایج در زمین، معادل ۶۱۱ و برای کشت ارگانیک در زمین ۳۲۰ کیلوگرم کربن دی اکسید معادل بود (Mafakheri et al., 2017). بالاتر بودن این دسته اثر در مطالعه حاضر به دلیل هیدروپونیک بودن روش کشت و استفاده بیش‌تر از کودها برای برطرف کردن نیاز غذایی توت‌فرنگی بود به‌طوری‌که همین دسته اثر در مطالعه‌ای در ایتالیا برای کشت هیدروپونیک در گلخانه مقدار ۷۸۵ کیلوگرم کربن‌دی‌اکسید معادل بدست آمد که به مقدار بدست آمده در مطالعه حاضر نزدیک است (Ilari et al., 2021).

انتشارات تخریب لایه ازون در مطالعه حاضر 1×10^{-4} kg CFC-11 eq از مقادیر تخریب لایه ازون تولید توت‌فرنگی در آمریکا $1/4\times 10^{-6}$ kg CFC-11 eq در تحقیق طباطبایی و مورتی بیش‌تر بود چرا که در تحقیق ایشان از جایگزین‌های طبیعی برای سولفات پتاسیم همچون خاکستر چوب و کمپوست‌های خاص استفاده شده بود (Tabatabaie & Murthy, 2016).



شکل۳- مشارکت نهاده‌های مختلف در ایجاد اثرات زیست‌محیطی تولید یک تن توت‌فرنگی براساس رویکرد نقطه میانی

Fig 3. The contribution of different inputs in creating the environmental effects of producing one ton of strawberry based on the midpoint approach

با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۳ تولید توت‌فرنگی گلخانه‌ای در مطالعه حاضر باعث خسارت ۸/۲۴×۱۰-۴ دالی به سلامت انسان شد. دالی طول عمر تعدیل شده برای ناتوانی بوده و دالی برابر ۱ بدین معناست که فردی یک سال از عمر خود را از دست بدهد یا اینکه فردی ۴ سال با معلولیت ۲۵٪ زندگی کند (Abed et al., 2023) همچنین تولید محصول مورد مطالعه منجر به خسارت ۴/۴۲×۱۰ گونه منقرض‌شده در متر مربع در سال به کیفیت زیست‌بوم شده است. باید توجه داشت خسارت ۱ برابر است با ناپدید شدن همه گونه‌ها از ۱ متر مربع در طول ۱ سال یا ناپدید شدن ۱۰٪ از همه گونه‌ها از ۱۰ متر مربع در طول یک سال یا ناپدید شدن ۱۰٪ از همه گونه‌ها از ۱ متر مربع در طول ۱۰ سال (Pierrat et al., 2023). همچنین در جدول ۳ برای تولید یک تن محصول مورد بررسی $۸/۴۲\times۱۰^{۲}$ کیلوگرم کربن دی‌اکسید معادل برای تغییر اقلیم و $۱/۴۱\times۱۰^{۴}$ مگاژول انرژی اولیه برای کاهش منابع گزارش شد. در مطالعه‌ای مشابه، حسینی فشمی و همکاران مقدار خسارت سلامت انسان را در تولید توت‌فرنگی گلخانه‌ای $۹/۷\times۱۰^{-۴}$ دالی برآورد کردند که به مطالعه حاضر بسیار نزدیک بود. در خسارت کیفیت زیست بوم مقدار $۲/۵۴\times۱۰^{۳}$ گونه منقرض‌شده در مترمربع در سال گزارش کردند که از مقدار بدست آمده در مطالعه حاضر بالاتر بود و عمده علت آن انتشارات مستقیم ناشی از تولید توت‌فرنگی بوده که بخش قابل توجهی از آن‌ها را احتراق سوخت دیزل بر عهده داشته است، چراکه در مطالعه ایشان برای گرمایش گلخانه صرفاً از سوخت دیزل استفاده شده بود. مقادیر مربوط به خسارت‌های تغییر اقلیم و کاهش منابع به ترتیب با $۱/۱۶\times۱۰^{۳}$ کیلوگرم کربن دی‌اکسید معادل^{۴} $۲/۴۸\times۱۰^{۴}$ مگاژول انرژی اولیه به برآورد مطالعه حاضر نزدیک بودند (Hosseini-Fashami et al., 2019).

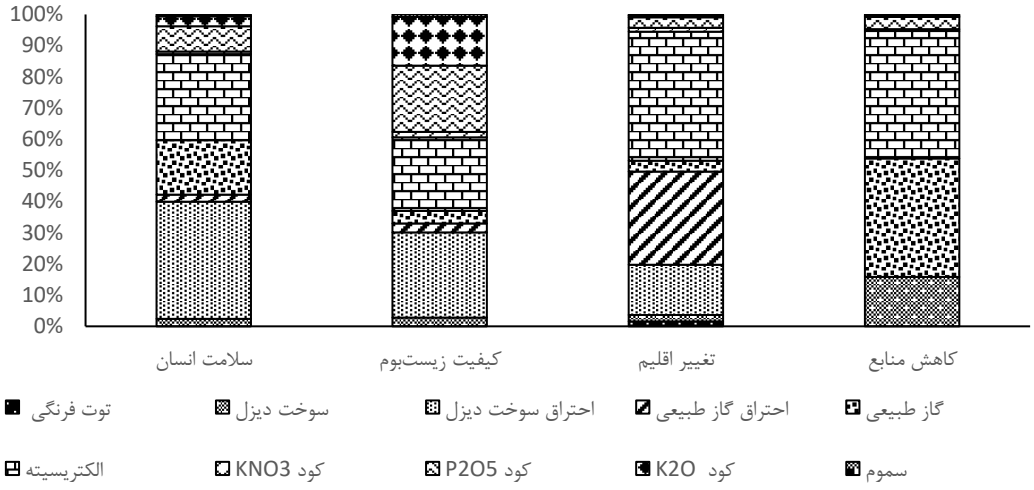
با توجه به جدول ۴ و مقادیر حاصل از وزن‌دهی تولید توت‌فرنگی گلخانه‌ای در مطالعه حاضر، بیش‌ترین خسارت را به ترتیب برای سلامت انسان، کاهش منابع، تغییر اقلیم و کیفیت زیست بوم داشت. در شکل ۴ قابل مشاهده است که در دسته خسارت سلامت انسان، عمده خسارت ناشی از احتراق سوخت دیزل و الکتریسیته به ترتیب با ۳۸٪ و ۲۸٪ بود. در دسته کیفیت زیست بوم، علاوه بر احتراق سوخت دیزل و الکتریسیته با ۲۷٪ و ۲۴٪، خسارت ناشی از کود فسفات و پتاس با ۲۱٪ و ۱۵٪ مقادیر قابل توجهی داشتند. در دسته تغییر اقلیم، عمده خسارت به الکتریسیته با ۴۱٪ تعلق داشت و پس از آن احتراق گاز طبیعی و احتراق سوخت دیزل با ۳۰٪ و ۱۶٪ در رده‌های بعد قرار داشتند. در دسته خسارت کاهش منابع، عمده خسارت ناشی از الکتریسیته، گاز طبیعی و سوخت دیزل با ۴۱٪، ۳۸٪ و ۱۶٪ بود. بنابراین بکارگیری راهکارهای صرفه‌جویی در مصرف انرژی در کنار جایگزینی منابع انرژی متعارف با انرژی‌های تجدیدپذیر، از عملی‌ترین راهکارها هستند و در چند سال گذشته، انرژی خورشیدی پتانسیل زیادی برای ادغام با گلخانه‌های کشاورزی نشان داده است. یکی از این راهکارها استفاده از سامانه‌های فتوولتائیک بوده است (Gorjian et al., 2021). فاطمی و همکاران در مطالعه‌ای استفاده از پمپ بادی برای تأمین آب، نیروگاه بادی، سوخت جامد زیستی، سامانه‌های تولید بیوگاز و بیودیزل، سامانه‌های گرمایش گلخانه با منابع آب زمین‌گرمایی و پمپ حرارتی زمین‌گرمایی را در بخش کشاورزی پیشنهاد داده و بیان کردند نتیجه استفاده از این سامانه‌ها، کاهش قابل‌توجه در مصرف انرژی‌های فسیلی، کاهش آلاینده‌های هوا و نیز تأمین امنیت انرژی و کاهش هزینه‌های اجتماعی و خسارات ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی می‌باشد (Fatemi et al., 2022).

جدول ۴- نتایج ارزیابی خسارت یک تن توت‌فرنگی

Table 4. The results of the damage assessment of one ton of strawberry

دسته خسارت	واحد	مقدار	واحد	مقدار
سلامت انسان	دالی[1]	$۸/۲۴\times۱۰^{-۴}$	mPt^{2}	۱۱۶/۲۵
کیفیت زیست‌بوم	گونه منقرض‌شده در مترمربع در سال[3]	$۴/۴۲\times۱۰$	mPt	۳/۲۲
تغییر اقلیم	کیلوگرم کربن دی‌اکسید معادل	$۸/۴۲\times۱۰^{۲}$	mPt	۸۵/۰۰
کاهش منابع	مگاژول انرژی اولیه	$۱/۴۱\times۱۰^{۴}$	mPt	۹۲/۴۸

[1] Disability adjusted life year (DALY)
[2] millipoints
[3] Potentially disappeared fraction of species over a certain area over a certain time (PDF*m2*yr)



شکل ۴- مشارکت نهاده‌های مختلف در ایجاد دسته‌های خسارت تولید یک تن توت‌فرنگی براساس رویکرد نقطه پایانی
Fig 4. The participation of different inputs in creating damage categories for the production of one ton of strawberry based on the end point approach

۲-۳- ارزیابی شاخص‌های اکسرژی

در جدول ۵ تقاضای اکسرژی تجمعی برای رده‌های اثر مورد بررسی نمایش داده شده است. بر این اساس منابع تجدیدناپذیر-فسیلی بیش‌ترین تقاضای اکسرژی تجمعی (۱/۰۹E+۴) مگاژول در تن را به خود اختصاص داده‌اند. این میزان در حدود ۹۹ درصد از کل تقاضای اکسرژی را که معادل (۱/۱۷E+۴) مگاژول بر تن است شامل می‌شود؛ که این مطلب تأکیدی بر استفاده از منابع تجدیذیر انرژی برای جایگزینی با منابع فسیلی می‌باشد. دلیل اصلی در تقاضای اکسرژی برای تولید توت‌فرنگی، در منابع تجدیدپذیر-آب، تولید الکتریسیته است و در منابع تجدیدناپذیر-فلزات؛ ساخت سموم شیمیایی و همچنین تجهیزات و ادوات کشاورزی به دلیل استفاده از فلز در ساخت، عوامل اصلی در تقاضای اکسرژی هستند. صالح پور و همکاران در مطالعه‌ای پیرامون تولید گل پامچال گلخانه‌ای میزان کل تقاضای اکسرژی تجمعی برای تولید هر بوته گل را ۸/۲۴ مگاژول برآورد کرده و عنوان کردند که از این مقدار، بیش‌ترین میزان تقاضای اکسرژِی تجمعی مربوط به منابع تجدیدناپذیر-فسیلی می‌باشد که ناشی از به کارگیری سوخت دیزل و گاز طبیعی جهت گرمایش و پمپاژ آب مورد نیاز برای گیاهان داخل گلخانه است (Salehpour et al., 2020). همچنین در مطالعه‌ای در نیجریه برای تولید سویا، منابع تجدیدناپذیر-فسیلی بیش‌ترین تقاضای اکسرژی تجمعی را به خود اختصاص داده و این مقدار برابر ۸۸/۵۳ درصد گزارش شد (Jekayinfa et al., 2022).

جدول ۵- بررسی انواع انرژی بر اساس روش تقاضای اکسرژی تجمعی در تولید توت‌فرنگی
Table 5. Investigating the types of energy based on the cumulative exergy demand method in strawberry production

انواع انرژی	واحد	مقدار
۱- تجدیدناپذیر - فسیلی	مگاژول بر تن	۱۰۸۹۳/۱۳
۲- تجدیدپذیر - پتانسیل	مگاژول بر تن	۴۶/۰۸
۳- تجدیدناپذیر - اولیه	مگاژول بر تن	۲۹/۱۶
۴- تجدیدپذیر – زیست توده	مگاژول بر تن	۳۷۹/۹۵
۵- تجدیدپذیر - آب	مگاژول بر تن	۱۹۰/۰۵

۶- تجدیدناپذیر - فلزات	مگاژول بر تن	۵۱/۷۱
۷- تجدیدناپذیر - مواد معدنی	مگاژول بر تن	۸۸/۳۵

۳-۳- ارزیابی شاخص‌های امرژی

نتایج حاصل از تحلیل امرژی تولید توت‌فرنگی گلخانه‌ای به روش هیدروپونیک در جدول ۶ ارائه شده است. در این محاسبات طول عمر پلاستیک گلخانه به طور میانگین یک سال و طول عمر ساختمان گلخانه به طور میانگین ۴۰ سال در نظر گرفته شد (Asgharipour et al., 2020). در این جدول میزان تجدیدپذیری امرژی هر نهاده به صورت درصد نشان داده شده است به طوری که در دسته‌بندی امرژی همانطور که در جدول ۷ آورده شده است مجموع امرژی منابع تجدیدپذیر محیطی (sej/ha) ۱/۶۷E+۱۶، و امرژی منابع خریداری شده تجدیدناپذیر و امرژی منابع خریداری شده تجدیدپذیر به ترتیب (sej/ha) ۲/۴۰E+۱۶ و (sej/ha) ۳/۲۰E+۱۵ برآورد شد. بر اساس نتایج جدول ۶ بیش‌ترین مقدار امرژی تولید توت‌فرنگی مربوط به نیروی کار انسانی با مقدار (sej/ha) ۱/۷۳E+۱۶ و پس از آن بیش‌ترین مقدار امرژی به ترتیب مربوط به آب آبیاری با مقدار (sej/ha) ۱/۳۶E+۱۶ و گاز شهری با مقدار (sej/ha) ۵/۳۶E+۱۵ بود. بالا بودن امرژی نیروی کار انسانی نتیجه‌ی پایین بودن میزان مکانیزاسیون کشت گلخانه‌ای می‌باشد. به طوری که مراحل کاشت، داشت و برداشت به صورت دستی توسط نیروی کار انجام می‌شود. همچنین امرژی بالای آب آبیاری به دلیل باز بودن نظام هیدروپونیک مورد بررسی جهت کشت این محصول بود به طوری که پس از آبیاری، آب به چرخه مصرف بازگشت نداشت. از سوی دیگر امرژی بالای گاز شهری به دلیل مصرف بالای گاز طبیعی جهت ثابت نگه داشتن دمای گلخانه در محدوده دمایی مناسب رشد و نمو توت‌فرنگی بود. لازم به ذکر است توت‌فرنگی گیاهی حساس به سرما بوده و بهترین دما برای رشد آن ۲۰ الی ۲۶ درجه سلسیوس است و در سرمای زیاد محصول‌دهی آن با اختلال مواجه می‌شود.

اصغری‌پور و همکاران در مطالعه‌ای در شهرستان جیرفت، چهار محصول گلخانه‌ای خیار، گوجه فرنگی، فلفل دلمه و بادمجان را مورد بررسی قرار دادند که در نتایج حاصل با توجه به پایین بودن میزان استفاده از ماشین‌ها در گلخانه، بیش‌ترین امرژی مورد استفاده مربوط به نیروی کار انسانی بود. به طوری که نیروی کار انسانی در تولید خیار، گوجه، فلفل دلمه و بادمجان به ترتیب ۳۱/۶۳٪، ۳۵/۲۸٪، ۳۱/۸۴٪ و ۴۰/۴۵۶ ٪ از امرژی کل را به خود اختصاص داد (Asgharipour et al., 2020)

جدول ۶- ارزیابی امرژی کشت توت‌فرنگی هیدروپونیک

Table 6. Emergy evaluation of hydroponic strawberry cultivation

عنوان	واحد	مقدار (J/ha)	ضریب تبدیل امرژی (sej/J)	امرژی(sej)	قابلیت تجدیدپذیری ٪	علامت اختصاری	منابع
انرژی خورشیدی	J	۵/۲۷E+۱۳	۱/۰۰E+۰۰	۵/۲۷E+۱۳	۱۰۰	J_1	Campbell et al. (2005)
تبخیر و تعرق	J	۱/۰۵E+۱۱	۲/۸۸E+۰۴	۳/۰۲E+۱۵	۱۰۰		Campbell et al. (2005)
آب آبیاری	J	۲/۵۱E+۰۴	۵/۴۳E+۱۱	۱/۳۶E+۱۶	۱۰۰	J_2	Campbell et al. (2005)
آهن	g	۳/۱۳E+۰۵	۳/۵۶E+۰۹	۱/۱۱E+۱۵	۷۹/۹		Odum, (2002)
پلاستیک	g	۱/۵۵E+۰۵	۴/۱۹E+۰۹	۶/۴۹E+۱۴	۰		Odum, (2000)
سیمان	g	۳/۲۵E+۰۳	۱/۹۳E+۰۹	۶/۲۷E+۱۲	۹/۹۶		Pulselli et al., 2009)
ماسه	g	۲/۱۳E+۰۴	۱/۷۰E+۰۹	۳/۶۱E+۱۳	۷۰/۴۹		Campbell et al. (2005)
فولاد	g	۲/۲۵E+۰۴	۱/۳۶E+۱۰	۳/۰۶E+۱۴	۷۹/۹		Odum (2002)
رنگ	g	۱/۰۰E+۰۲	۱/۹۳E+۱۳	۱/۹۳E+۱۵	۰		Pulselli et al. (2007)
سیم مفتول	g	۲/۵۰E+۰۴	۱/۴۷E+۱۰	۳/۶۸E+۱۴	۷۹/۹		Pulselli et al. (2009)
نیروی کار انسانی (برای تولید توت‌فرنگی)	J	۵/۴۳E+۰۹	۲/۲۲E+۰۶	۱/۲۱E+۱۶	۱۰	J_9	Lu et al. (2009)
نیروی کار انسانی (برای ساخت گلخانه)	J	۲/۳۶E+۰۹	۲/۲۲E+۰۶	۵/۲۳E+۱۵	۱۰		Lu et al. (2009)
الکتریسیته	J	۱/۴۰E+۰۵	۲/۳۱E+۰۵	۳/۲۲E+۱۰	۰	J_5	Asgharipour et al. (2020)

ماشین	J	۱/۶۱E+۰۳	۱/۰۱E+۱۰	۱/۶۲E+۱۳	۰	J_{10}	Asgharipour et al. (2020)
سوخت فسیلی	J	۲/۳۲E+۰۴	۸/۶۰E+۰۶	۲/۰۰E+۰۹	۰	J_7	Odum (1996)
کود نیتروژن	g	۶/۹۸E+۰۲	۳/۰۹E+۱۰	۲/۱۶E+۱۳	۰	J_8	Brandt-Williams, 2002
کود فسفر	g	۱/۸۷E+۰۳	۲/۸۲E+۱۰	۵/۲۷E+۱۳	۰	J_8	Brandt-Williams, 2002
کود پتاس	g	۹/۹۵E+۰۲	۲/۲۳E+۰۹	۲/۲۲E+۱۲	۰	J_8	Brandt-Williams, 2002
کود میکرو	g	۵/۳۰E+۰۱	۳/۹۱E+۰۹	۲/۰۷E+۱۱	۰	J_8	Lan et al., 2002
گاز شهری	J	۴/۸۳E+۱۰	۱/۱۱E+۰۵	۵/۳۶E+۱۵	۰	J_7	Asgharipour et al. 2019
سموم	J	۳/۶۰E+۰۱	۱/۸۹E+۱۰	۶/۸۰E+۱۱	۰	J_{11}	Asgharipour et al. 2020
نشاء	$	۹/۷۶E+۰۷	۴/۵۰E+۰۸	۴/۳۶E+۱۶	۴۳		مطالعه حاضر
ستانده	g	۱/۰۸E+۱۱	۸/۷۶E+۱۰	۹/۴۶E+۱۹			مطالعه حاضر

جدول ۷- امرژی منابع مختلف در تولید توت‌فرنگی

Table 7. Emergy of different sources in strawberry production

منابع	امرژی
تجدیدپذیر محیطی (RR)	۱/۶۷E+۱۶
تجدیدناپذیر محیطی (NR)	۰
تجدیدپذیر خریداری شده (RP)	۳/۲۰E+۱۵
تجدیدناپذیر خریداری شده (NP)	۲/۴۰E+۱۶
ستانده (Y)	۴/۳۹E+۱۶

نتایج امرژی حاصل از تفکیک منابع مورد استفاده در تولید توت‌فرنگی (جدول ۷) نشان داد که ۵۴/۶۳٪ از کل امرژی مربوط به منابع خریداری شده تجدیدناپذیر بوده است و پس از آن منابع تجدیدپذیر محیطی و منابع تجدیدپذیر خریداری شده به ترتیب مقادیر ۳۸/۰۸ ٪ و ۷/۲۹ ٪ را به خود اختصاص دادند. در این مطالعه کل عملکرد امرژی (sej/ha) ۴/۳۹E+۱۶ بود و ضریب تبدیل امرژی تولید توت‌فرنگی گلخانه‌ای هیدروپونیک (sej/g) ۴/۵۰E+۰۸ محاسبه شد.

شاخص‌های امرژی مربوط به تولید توت‌فرنگی گلخانه‌ای در جدول ۸ آورده شده است. شاخص نسبت عملکرد امرژی برای تولید این

جدول ۸- شاخص‌های امرژی تولید توت‌فرنگی هیدروپونیک

Table 8. Emergy indicators of hydroponic strawberry production

شاخص	مقدار
نسبت عملکرد امرژی (EYR)	۱/۶۲
نسبت سرمایه‌گذاری امرژی (EIR)	۱/۶۳
نسبت بار زیست‌محیطی (ELR)	۱/۲۰
نسبت خود حمایتی امرژی (ESR)	۰/۳۸
پایداری زیست‌محیطی (ESI)	۱/۳۴

محصول برابر ۱/۶۲ بود، بیش‌تر بودن میزان این شاخص بیانگر این است که به ازای امرژی‌های خریداری شده چه مقدار امرژی برداشت شده است. لذا بالا بودن آن نشان از مطلوبیت نظام تولید دارد. در مطالعه‌ای در کشور ایتالیا میزان این شاخص برای تولید پرتقال ۱/۵ بدست آمد (Rosa et al., 2018). اصغری پور و همکاران نیز در مطالعه‌ای در سال ۲۰۲۰ این شاخص را برای چهار محصول خیار، گوجه، فلفل دلمه و بادمجان گلخانه‌ای به ترتیب ۱/۰۱۷، ۱/۰۰۸، ۱/۰۰۹ و ۱/۰۱۶ تعیین نمودند.

شاخص نسبت سرمایه‌گذاری امرژی در مطالعه حاضر ۱/۶۳ بود که این مقدار نشان‌دهنده بالاتر بودن امرژی خریداری شده نسبت به امرژی‌های محیطی است. یکی از دلایل این امر عدم استفاده از خاک به عنوان یک نهاده محیطی در نظام مورد نظر (هیدروپونیک) بود. کوهکن و همکاران در مطالعه‌ای بر انگور یاقوتی سیستان مقدار این شاخص را ۳/۲۵ گزارش کرده و بیان کردند که این مقدار نشان دهنده اتکاء بیش‌تر نظام به منابع خریداری شده در مقایسه با منابع محیطی است (Kohkan et al., 2017).

شاخص نسب بار زیست‌محیطی در نظام کشت مورد بررسی ۱/۲ بود که این مقدار بیانگر استفاده بیش‌تر از منابع تجدیدناپذیر نسبت به منابع تجدیدپذیر در تولید توت‌فرنگی به روش هیدروپونیک است. اصغری پور و همکاران نیز در مطالعه‌ای در سال ۲۰۲۰ این شاخص را برای چهار محصول خیار، گوجه، فلفل دلمه و بادمجان گلخانه‌ای به ترتیب ۴/۱۸، ۴/۳۵، ۴/۴۶ و ۴/۶۴ بدست آوردند (Asgharipour et al., 2020). همچنین در مطالعه‌ای در چین این شاخص برای برنج ۰/۶۲ بدست آمده است (Zhang et al., 2012).

شاخص خود حمایتی امرژی در مطالعه حاضر ۰/۳۸ محاسبه شد. این شاخص میزان استفاده از امرژی محیطی به ازای امرژی تولیدی را نشان می‌دهد که با توجه به عدم استفاده از خاک، پایین بودن آن قابل توجیه است. همچنین کوهکن و همکاران مقدار این شاخص را ۰/۲۳ برای تولید انگور یاقوتی سیستان گزارش کردند (Kohkan et al., 2017).

شاخص پایداری زیست‌محیطی بیانگر نسبت عملکرد به نسبت بار زیست‌محیطی بوده و در مطالعه حاضر ۱/۳۴ بدست آمد که نشان دهنده نسبت عملکرد بالاتر و بار زیست‌محیطی کم‌تر در این نظام کشت است. در مطالعه‌ای در چین این شاخص برای برنج ۱/۸۳ بدست آمده است (Zhang et al., 2012).

۴- نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر به بررسی سه شاخص مهم خسارات (ارزیابی چرخه زندگی)، اکسرژی و امرژی در تولید توت‌فرنگی گلخانه‌ای به روش هیدروپونیک پرداخته شد. نتایج حاصل در هر سه بخش حاکی از مصرف بالای منابع تجدیدناپذیر بود؛ به طوری که بیش‌ترین انتشارات آلایندگی، تقاضای اکسرژی تجمعی و امرژی مصرفی در فرآیند تولید را به خود اختصاص دادند. بر اساس نتایج از میان تمام نهاده‌های دخیل در تولید توت‌فرنگی گلخانه‌ای، سه نهاده نیروی کار انسانی، آب آبیاری و گاز شهری به ترتیب با ۳۹/۳۷٪، ۳۱/۰۸٪ و ۱۲/۲٪ از امرژی کل، بیش‌ترین مقدار امرژی را به خود اختصاص دادند. لذا چنانچه بهینه‌سازی مصرف نهاده‌ها در نظر باشد بهتر است الویت اصلی این سه منبع باشند. البته در بررسی حاضر شاخص پایداری با عدد ۱/۳۴ به میزان نسبتاً قابل قبولی به دست آمد که برای بالا بردن آن پیشنهاد می‌شود از منابع محیطی تجدیدپذیر استفاده بیش‌تری گردد. برای مثال با جایگزین کردن انرژی‌های تجدیدپذیر همچون انرژی خورشیدی که البته در دسته نهاده‌های محیطی نیز قرار می‌گیرد همزمان با کاهش بار زیست‌محیطی می‌توان افزایش پایداری و کاهش اکسرژی تجمعی را به‌همراه داشت. از جمله روش‌های کاربرد این انرژی، استفاده از پنل‌های خورشدی و جایگزین کردن این انرژی با الکتریسیته است. چرا که در مطاله حاضر دلیل اصلی در تقاضای اکسرژی برای تولید توت‌فرنگی، در منابع تجدیدپذیر-آب، تولید الکتریسیته بود.

با توجه به اینکه ارزیابی تأثیرات زیست‌محیطی در این مطالعه فقط در مرحله ورود نهاده‌ها تا تولید محصول انجام شده است؛ پیشنهاد می‌شود این ارزیابی برای مراحل دیگر نیز صورت پذیرد. همچنین پیشنهاد می‌گردد که با به کارگیری روش‌های مختلف مدیریت گلخانه بر مبنای مصرف بهینه نهاده‌های کشاورزی به کاهش اثرات زیست‌محیطی ناشی از تولید این محصول بر گروه‌های مختلف زیست‌محیطی کمک گردد. از سوی دیگر پیشنهاد می‌شود با روش‌های مختلف همچون منطق فازی و استفاده از نمودارهای فازی ارتباط بین شاخص‌های مورد بررسی بیش‌تر و بهتر مورد تحلیل قرار گیرد.

منابع

Abed, R., Ashley, P., Duane, B., Crotty, J. and Lyne, A. (2023). An environmental impact study of inter-dental cleaning aids. Journal of Clinical Periodontology, 50(1), pp.2-10.

Acaroglu, M. (1998). Energy from biomass, & applications. University of Seluck, Graduate School of Natural & Applied Sciences. Textbook.

Ahmadbeyki, A., Ghahderijani, M., Borghaee, A. and Bakhoda, H. (2023). Energy use and environmental impacts analysis of greenhouse crops production using life cycle assessment approach: A case study of cucumber and tomato from Tehran province, Iran. Energy Reports, 9, pp.988-999.

An, X., Li, Z., Zude-Sasse, M., Tchuenbou-Magaia, F. and Yang, Y. (2020). Characterization of textural failure mechanics of strawberry fruit. Journal of Food Engineering, 10016.

Anton, A., Torrellas, M., Nunez, M., Sevigne, E., Amores, M. J., Munoz, P., J. Montero, I. (2014). Improvement of Agricultural Life Cycle Assessment Studies through Spatial Differentiation and New Impact Categories: Case Study on Greenhouse Tomato Production. Environ. Sci. Technol., 48, 9454-9462.

Asakereh, A., Kiani, M.K.D. and Soleymani, M. (2023). Sustainability assessment of sugarcane and sugar beet production systems by energy and exergy approaches: a case study. International Journal of Exergy, 40(1), pp.74-90.

Asgharipour, M. R., Shahgholi, H., Campbell, D. E., Khamari, I., & Ghadiri, A. (2019). Comparison of the sustainability of bean production systems based on emergy and economic analyses. Environmental Monitoring and Assessment, 191, 1–21.

Asgharipour, M.R., Amiri, Z. and Campbell, D.E. (2020). Evaluation of the sustainability of four greenhouse vegetable production ecosystems based on an analysis of emergy and social characteristics". Ecological Modelling, 424, p.109021.

Bekchanov, M. and Mirzabaev, A. (2018). Circular economy of composting in Sri Lanka: Opportunities and challenges for reducing waste related pollution and improving soil health. Journal of Cleaner Production, 202, pp.1107-1119.

Benis, K. and Ferrão, P. (2017). Potential mitigation of the environmental impacts of food systems through urban and peri-urban agriculture (UPA)–a life cycle assessment approach. Journal of Cleaner Production, 140, pp.784-795.

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

Campbell, D.E., Brandt-Williams, S.L., and Meisch, M.E.A. (2005). Environmental Accounting Using Emergy: Evaluation of the State of West Virginia. EPA/600/R-02/011. USEPA. Office of Research and Development, Washington, DC, pp. 116.

Canakci, M. and Akinci, I. (2006). Energy use pattern analyses of greenhouse vegetable production. Energy, 31, 1243–1256.

Cochran, W.G. (1977). Sampling techniques (3rd ed.). New York: John Wiley & Sons

Cohen, A., Malone, S., Morris, Z., Weissburg, M. and Bras, B. (2018). Combined fish and lettuce cultivation: an aquaponics life cycle assessment. Procedia Cirp, 69, pp.551-556.

FAO, (2020). Food and Agricultural Organization. www.fao.org.

Fatemi, S. H., Babapour, A., Nowrozi Sarmi, D., Heydarzadeh S., Sharifi M. (2022). A new look at the use

risk of lung cancer in Xuanwei, China. Journal of the National Cancer Institute, 94(11), 826-835.
Lotfi, B., Maleki, A., Mirzaei Heydari, M., Rostaminiya, M., and Babaei, F. (2021). The Effect of Different Tillage Systems, Nitrogen Fertilizer and Mycorrhiza on Mung Bean (Vigna radiata) Production and Energy Indices. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 52(4), 416-428.
Lu, G., Ocola, L. E., and Chen, J. (2009). Reduced graphene oxide for room-temperature gas sensors. Nanotechnology, 20(44), 445502.
Lyu, Y., Raugei, M., Zhang, X., Mellino, S. and Ulgiati, S. (2021). Environmental cost and impacts of chemicals used in agriculture: An integration of emergy and Life Cycle Assessment. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 151, p.111604.
Mafakheri, S., Veisi, H., Noori, O. and Mahdavi Damghani, A. (2017). Environmental Impact Assessment of Strawberry Production in Two Conventional and 0rganic Production Systems: (Case Study: Kurdistan Province). Journal of Agricultural Science and Sustainable Production, 27(2), pp.197-208.
Ministry of Jihad-e-Agriculture of Iran. (2020). Annual Agricultural Statistics. www.maj.ir (in Persian).
Mofatah, S. (2018). Studying the energy, economic and environmental indicators of Mohammadi flower production with a life cycle assessment approach. Master's thesis in the field of Agricultur Mechanization-Energy Engineering, University of Tehran.
Mohammadi-Kashka, F., Pirdashti, H., Tahmasebi-Sarvestani, Z., Motevali, A., Nadi, M. and Aghaeipour, N. (2023). Integrating life cycle assessment (LCA) with boundary line analysis (BLA) to reduce agro-environmental risk of crop production: a case study of soybean production in Northern Iran. Clean Technologies and Environmental Policy, pp.1-20.
Nemecek, T., Kägi, T., and Blaser, S. (2007). Life cycle inventories of agricultural production systems. Final report ecoinvent v2. 0 No, 15.
Nieuwkoop, P., van, N., van der Velden, A. Verhaegh, P., and van Nieuwkoop. P. (1998) Energy consumption in greenhouses. Mededeling Landbouw Economisch Instituut, No. 624, pp 41.
Odum, H. T. (1996). Environmental accounting: emergy and environmental decision making. (No Title).
Odum, H. T., Brown, M. T., & Brandt-Williams, S. (2000). Handbook of emergy evaluation Folio 1: Introduction and global budget. Center for Environmental Policy, University of Florida, Gainesville, 16.
Pierrat, E., Barbarossa, V., Núñez, M., Scherer, L., Link, A., Damiani, M., Verones, F. and Dorber, M. (2023). Global water consumption impacts on riverine fish species richness in Life Cycle Assessment. Science of the Total Environment, 854, p.158702.
Pulselli, R.M., Simoncini, E., and Marchettini, N. (2009). Energy and emergy based cost–benefit evaluation of building envelopes relative to geographical location and climate. Build. Environ. 44 (5), 920–928.
of renewable energy in agricultural industries. Two quarterly renewable and new energies, 9(1), pp.29-39
Gołasa, P., Wysokiński, M., Bieńkowska-Gołasa, W., Gradziuk, P., Golonko, M., Gradziuk, B., Siedlecka, A. and Gromada, A. (2021). Sources of greenhouse gas emissions in agriculture, with particular emphasis on emissions from energy used. Energies, 14(13), p.3784.
Gorjian, S., Calise, F., Kant, K., Ahamed, M.S., Copertaro, B., Najafi, G., Zhang, X., Aghaei, M. and Shamshiri, R.R. (2021). A review on opportunities for implementation of solar energy technologies in agricultural greenhouses. Journal of Cleaner Production, 285, p.124807.
Hatirli, S.A., Ozkan, B., and Fert. C. (2006). Energy inputs & crop yield relationship in greenhouse tomato production. Renewable Energy, 31, 427– 438.
Ilari, A., Toscano, G., Boakye-Yiadom, K.A., Duca, D. and Foppa Pedretti, E. (2021). Life cycle assessment of protected strawberry productions in central Italy. Sustainability, 13(9), p.4879.
Imanthi, K.P.A., Madusanka, D.A.T., Pathmalal, M.M. and Idroos, F.S. (2023). Emerging trends of cyanobacteria-based microbial fuel cells as an alternative energy source. Development in Wastewater Treatment Research and Processes, pp.99-119.
ISO. (2006) 14040 International standards. Environmental Management–Life Cycle Assessment–Principles and Framework, International Organisation for Standardization, Geneva, Switzerland.
Jekayinfa, S.O., Adeleke, K.M., Ogunlade, C.A., Sasanya, B.F. and Azeez, N.A. (2022). Energy and exergy analysis of Soybean production and processing system. Cleaner Engineering and Technology, 10, p.100540.
Kaab A, Sharifi M, Mobli H, Nabavi-Pelesaraei A, Chau K. (2019). Combined life cycle assessment and artificial intelligence for prediction of output energy and environmental impacts of sugarcane production. Sci Total Environ. 664,1005–19.
Kastratović, R. (2019). Impact of foreign direct investment on greenhouse gas emissions in agriculture of developing countries. Australian Journal of Agricultural and Resource Economics, 63(3), pp.620-642.
Kazemi, H.and Zardari, S. (2020). Energy Analysis and Greenhouse Gas Emission from Strawberry Production under Two Irrigation Systems. Walailak Journal of Science and Technology (WJST), 17(1), pp.1-10.
Khan, F.A.A. (2018). A review on hydroponic greenhouse cultivation for sustainable agriculture. International Journal of Agriculture Environment and Food Sciences, 2(2), 59-66.
Kitani, O. (1999). Energy & Biomass Engineering. CIGR Handbook of Agricultural Engineering. Vol. (V), St Joseph, MI: ASAE.
Kohkan, S., Ghanbari, A., Asgharipour, M., Fakheri, B. (2017). Emergy analysis of Yaquti grape cultivation system in Sistan. Arid Biome Scientific and Research Journal. 7 (2), 29-37.
Lan, Q., Chapman, R. S., Schreinemachers, D. M., Tian, L., and He, X. (2002). Household stove improvement and

Tricase, C., Lamonaca, E., Ingrao, C., Bacenetti, J. and Giudice, A.L. (2018). A comparative Life Cycle Assessment between organic and conventional barley cultivation for sustainable agriculture pathways. Journal of Cleaner Production, 172, pp.3747-3759.

Van der Werf, H.M., Knudsen, M.T. and Cederberg, C. (2020). Towards better representation of organic agriculture in life cycle assessment. Nature Sustainability, 3(6), pp.419-425.

Wang, J., Hou, D., Liu, Z., Tao, J., Yan, B., Liu, Z., Yang, T., Su, H., Tahir, M.H. and Chen, G. (2022). Emergy analysis of agricultural waste biomass for energy-oriented utilization in China: Current situation and perspectives. Science of The Total Environment, p.157798.

Yang, T. and Kim, H.J. (2020). Comparisons of nitrogen and phosphorus mass balance for tomato-, basil-, and lettuce-based aquaponic and hydroponic systems. Journal of Cleaner Production, 274, p.122619.

Zhang, L.X., Song, B., and Chen, B. (2012). Emergy-based analysis of four farming systems: insight into agricultural diversification in rural China. Journal of Cleaner Production, 28: 33-44.

Khammayom, N., Maruyama, N., Chaichana, C. and Hirota, M., (2022). Impact of environmental factors on energy balance of greenhouse for strawberry cultivation. Case Studies in Thermal Engineering, 33, p.101945.

Pulselli, R.M., Simoncini, E., Ridolfi, R., and Bastianoni, S. (2007). Specific emergy of cement and concrete: an energy-based appraisal of building materials and their transport. Ecol. Indic. 8, 647–856.

Rahmani, H. and Mohamadi, G.E. (2018). Effect of Endophytic Fungi Pirifomospora indica on Flowering and Root Growth Parameters of Strawberry in Hydroponic Culture. Journal of horticulture science (Agriculture sciences and tecnology),32(2), 39-49.

Rivera, X.C.S., Bacenetti, J., Fusi, A. and Niero, M. (2017). The influence of fertiliser and pesticide emissions model on life cycle assessment of agricultural products: the case of Danish and Italian barley. Science of the Total Environment, 592, pp.745-757.

Rosa, A.D., Siracusa, G., and Cavallaro, R. (2018). Emergy evaluation of Sicilian red orange production. A comparisonbetween organic and conventional farming. Journal of Cleaner Production, 16: 1907-1914.

Salehpour, T, Khanali, M, and Rajabipour, A. (2020). Investigating environmental effects and evaluating energy flow in greenhouse primrose production with the approach of cumulative energy demand and cumulative exergy demand. Biosystem Engineering Journal of Iran. 50(4): 771-785 (In Persian with English Summary)

Sanjaya, E. and Abbas, A. (2023). Plasma gasification as an alternative energy-from-waste (EFW) technology for the circular economy: An environmental review. Resources, Conservation and Recycling, 189, p.106730.

Sharma, G.D., Shah, M.I., Shahzad, U., Jain, M. and Chopra, R. (2021). Exploring the nexus between agriculture and greenhouse gas emissions in BIMSTEC region: The role of renewable energy and human capital as moderators. Journal of Environmental Management, 297, p.113316.

Singh, S., Verma, S.R., and Mittal, J.P. (1997) Energy requirements for production of major crops in India. Agric mechanization Asia, Africa & Latin America 28(4), 13–17.

Skunca, D., Tomasevic, I., Nastasijevic, I., Tomovic, V. and Djekic, I. (2018). Life cycle assessment of the chicken meat chain. Journal of Cleaner Production, 184, pp.440-450.

Svanes, E. and Johnsen, F.M. (2019). Environmental life cycle assessment of production, processing, distribution and consumption of apples, sweet cherries and plums from conventional agriculture in Norway. Journal of Cleaner Production, 238, p.117773.

Tabatabaie S.M.H. and Murthy G.S. (2016). Cradle to farm gate life cycle assessment of strawberry production in the United States. Journal of Cleaner Production, 1-7.

Tan, H., Li, Z., Wang, Q. and Mohamed, M.A. (2023). A novel forecast scenario-based robust energy management method for integrated rural energy systems with greenhouses. Applied Energy, 330, p.120343.

Tang, Y., Dong, J., Li, G., Zheng, Y., Chi, Y., Nzihou, A., Weiss-Hortala, E. and Ye, C. (2020). Environmental and exergetic life cycle assessment of incineration-and gasification-based waste to energy systems in China. Energy, 205, p.118002.