

تحلیل ترمواکونومیک کاهش تلفات انرژی در گلخانه‌های با سیستم کشت هیدروپونیک از طریق

فرآیند بازچرخانی زهاب و تشکیل هرم کیفیت آب

احمد حسین نژاد^۱، یداله سبوحی^{۲*}، قاسم زارعی^۳، جلال‌الدین شایگان^۴

^۱دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی انرژی، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

hosseinnejhad@energy.sharif.ir

^۲استاد دانشکده مهندسی انرژی، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

saboohi@sharif.edu^۱

^۳دانشیار موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران

gh.zarei@areeo.ac.ir

^۴استاد دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

shayegan@sharif.edu

چکیده: به‌کارگیری منابع نامتعارف آب همراه با تصفیه و بازچرخانی آن راهکار اصلی در مواجهه با بحران کمیابی منابع آب و رفع نیازهای آینده محسوب می‌شوند. اگر چه بازچرخانی فاضلاب و زهاب از جنبه‌های مختلف در مقالات بررسی شده است ولی اهمیت به‌کارگیری این فرآیند و اثر آن بر سیستم کودآبیری، با استفاده از تحلیل ترمواکونومیک انجام نشده است. در این مطالعه موردی، در یک گلخانه تولید گل رز، سه حالت: ۱- سیستم کشت هیدروپونیک باز، ۲- سیستم کشت هیدروپونیک باز با در نظر گرفتن هزینه جبران انرژی و ۳- سیستم کشت هیدروپونیک بسته (بازچرخانی مواد غذایی) با توجه به هزینه انرژی تولید محصول، مقایسه شدند. نتایج نشان داد که هزینه انرژی گواکونومیک برای تولید ۲۱۲۵۰۰ گل رز شاخه بریده، طی یک دوره شش ماهه فصل سرد، با تامین گرمایش توسط بویلر، در سه حالت مذکور به ترتیب برابر \$ ۱۵۷۶۰، \$ ۱۶۵۲۵، \$ ۱۴۷۱۸ بود. همچنین شاخص ترمواکونومیکی هزینه انرژی گواکونومیک واحد در این شرایط، به ترتیب برابر $0.74/2 \text{ } \$ \cdot \text{Gj}^{-1}$ ، $0.77/8 \text{ } \$ \cdot \text{Gj}^{-1}$ و $0.69/3 \text{ } \$ \cdot \text{Gj}^{-1}$ محاسبه شدند. بازچرخانی زهاب در سیستم بسته، تلفات انرژی کل سیستم را به مقدار $0.4/2 \text{ } \text{Gj} \cdot \text{y}^{-1}$ کاهش داد که $0.1/24 \text{ } \text{Gj} \cdot \text{y}^{-1}$ آن مربوط به کاهش آب ورودی و $0.1/91 \text{ } \text{Gj} \cdot \text{y}^{-1}$ آن مربوط به کاهش کود بود، در حالی که $0.1/12 \text{ } \text{Gj} \cdot \text{y}^{-1}$ افزایش هم به واسطه مصرف الکتریسیته در بازچرخانی سیستم بسته مشاهده شد. در هرم کیفیت آب ارائه شده با استفاده از شاخص ترمواکونومیکی هزینه انرژی گواکونومیک واحد، آب تغذیه با $0.459/9 \text{ } \$ \cdot \text{Gj}^{-1}$ در رأس هرم و فاضلاب با صفر، در پایین هرم قرار گرفتند.

واژه‌های کلیدی: بازچرخانی، تحلیل ترمواکونومیک، کشت هیدروپونیک گلخانه‌ای، هرم کیفیت آب، هزینه انرژی گواکونومیک واحد

Thermoeconomic analysis of reducing exergy losses in greenhouses with hydroponic cultivation system through drainage recycling and formation of water quality pyramid

A. Hosseinnejad¹, Y. Saboohi^{2*}, Gh. Zarei³, J. Shayegan⁴

* نویسنده مسئول

Abstract:

Employing non-conventional water resources using treatment and recycling is considered as the main resource in addressing future water scarcity. Although non-conventional water recycling has been investigated in details in the literature, its impacts on irrigation-fertilizing systems have not been discussed using thermo-economic analysis. In this case study, using a hydroponic greenhouse system for rose cultivation, exergoeconomic cost was investigated in a recycling process by comparing three system including: open cycle, open cycle considering exergy abatement cost, and close cycle (nutrition water recycling). Results show that the exergoeconomic cost for producing 212,500 rose cut-flowers in a 6-months cold period, where heat was supplied by boiler for the above mentioned scenarios were about 15,760 \$, 16,525 \$ and 14,718 \$, respectively. Also, the thermo-economic indicator of the unit exergoeconomic costs for above mentioned scenarios were 74.2, 77.8 and 69.3 \$Gj⁻¹, respectively. In the close cycle, drainage water recycling decreased total exergy losses by 4.02 Gj.y⁻¹, of which 1.24 Gj.y⁻¹ reduction was due to the reduced inlet water and 1.91 Gj.y⁻¹ for the inlet fertilizer reduction, while that increased by the system electricity consumption was 1.12 Gj.y⁻¹. Water quality pyramid presented based on the unit exergoeconomic cost indicated 459.9 Gj.y⁻¹ for the nutrition feed as the highest peak value and zero for the wastewater at the base of the pyramid.

Keywords: recycling, thermo-economic analysis, hydroponic cultivation in greenhouse, water quality pyramid, unit exergoeconomic cost

۱. مقدمه

کیفیت مطلوب را ایجاد می‌کند [۵]. زهاب خروجی بستر کشت نیز حاوی طیف گسترده‌ای از مواد مختلف است که آلاینده محیط‌زیست محسوب می‌گردند [۶]. با استفاده از فناوری‌های تصفیه مختلف در بازچرخانی، مواد حل شده در آب نیز قابلیت جداسازی را دارند ولی جداسازی کامل مواد حل شده با کیفیت مطلوب، با مصرف انرژی و هزینه بالا همراه است [۷]. در این بین، سوال اساسی این است که با وجود به‌کارگیری فناوری‌های تصفیه و صرف هزینه در بازچرخانی، منطقی شدن به کارگیری این فرآیند نسبت به سیستم باز از بعد تحلیل ترمواکونومیک، به چه صورت است.

بررسی‌های مربوط به بازچرخانی و اثر آن بر سیستم و کاهش مصرف منابع ورودی، به شکل‌های مختلف انجام شده‌اند. تحلیل چرخه‌عمر (LCA²) یکی از روش‌های جامع در این زمینه است [۸]. کاسترو و همکاران [۶] و امینی و همکاران [۹] از LCA برای نشان دادن اثر بازچرخانی منابع معدنی، با استفاده از به‌کارگیری مواد بازیافتی در چرخه

با پیشرفت فناوری‌های مرتبط با صنعت آب، تصفیه و بازچرخانی منابع آب غیرمتعارف به عنوان اصلی‌ترین جایگزین برای تامین تقاضای آب تازه در آینده مطرح شده است [۱,۲]. بازچرخانی اهمیت زیادی در حفظ منابع طبیعی و محیط‌زیست دارد. علاوه بر آب، بازچرخانی مناسب در بازیافت مواد جامد از جمله آهن، آلومینیوم، و... از زباله‌های حاوی آنها، به عنوان منبع مهمی از مواد اولیه می‌تواند باشد [۳,۴]. در سیستم کشت هیدروپونیک گلخانه‌ای نیز، فرآیند تصفیه و بازچرخانی^۱ زهاب تولیدی در گلخانه (که دارای انواع عناصر غذایی محلول است)، راه‌حلی برای کاهش مصرف منابع و شکل‌دهی سیستم پایدار تولید در گلخانه‌ها است. در یک فرآیند با حل شدن مواد مختلف با هزینه‌های متفاوت در آب، محلول‌های مختلفی ساخته می‌شود که هر یک کاربری مختص خود را برای رسیدن به هدف سیستم، ایجاد می‌کند. در نهایت جریان‌های آب پس از گذر از فناوری‌های مختلف، به صورت فاضلاب از سیستم خارج می‌شوند. بازچرخانی امکان تبدیل فاضلاب با کیفیت پایین به آب با

1. Recycling
2. Life Cycle Assessment

تولید، بهره برده‌اند. آنها اشاره کرده‌اند که با استفاده از LCA، و همچنین به‌کارگیری قانون بقای جرم و قانون اول ترمودینامیک، نمی‌توان آلودگی و کیفیت را نشان داد [۶،۹]. به‌واسطه بازچرخانی، کیفیت مواد از سطح اولیه خود کاهش می‌یابند و ناخالصی همراه خود می‌گیرد. از این رو یکی از موضوعات مهم برای انعکاس بازیابی، موضوع انعکاس کیفیت یا شاخصی برای تمایز بین جریان‌ها است. کیفیت، استاندارد برخی پارامترهای مربوط به جریان است که نسبت به سایرین سنجیده می‌شود [۱۰]. کیفیت آب نیز در منابع مختلف از زوایای مختلفی تعریف شده است. به‌صورت کلی به پارامترهای کیفی آب از لحاظ شیمیایی، فیزیکی، بیولوژیکی و اثرات رادیواکتیویته در کنار هم، با توجه به قابلیت استفاده مناسب از آن برای مصرف مشخص، کیفیت آب گفته می‌شود [۱۱].

کیفیت آب مفهومی است که تعریف آن ساده نیست و مانند بسیاری از موارد در طبیعت، (کیفیت) آب نیز تغییر می‌کند. آیرس و همکاران [۱۲] در کتاب کیفیت آب برای کشاورزی^۲ اشاره کرده‌اند که به کمیت آب بیشتر توجه می‌شود در حالی که کیفیت آب نیز موضوع مهمی است. در تعیین مقدار آب هر دو پارامتر کمیت و کیفیت آب مهم هستند ولی معمولاً کیفیت نادیده گرفته می‌شود. در کارهای پیشین، برای مدل‌سازی کیفیت آب روش‌های مختلفی ارائه شده‌اند. استفاده از شاخص‌های محیط‌زیستی مانند BOD، COD، TOC و ... به‌صورت مرسوم برای بیان کیفیت آب و فاضلاب استفاده می‌شوند [۱۳،۱۴]. هر یک از این شاخص‌ها، یکی از پارامترهای مربوط به محتوا و کیفیت آب یا فاضلاب را بیان می‌کند. از این رو جهت انعکاس کامل‌تر این موضوع، از مفهوم آگرزری در بیان کیفیت آب در کارهای مختلف استفاده می‌شود.

کاسترو و همکاران برای تحلیل جامع‌تر چرخه‌عمر با در نظر گرفتن کیفیت، از تحلیل چرخه‌عمر آگرزری (ELCA^۳) بهره‌برده‌اند [۶]. نتایج تحقیقات آنها نشان می‌دهد که بازده منابع (RI^۴) زمانی که آلومینیوم خالص (کیفیت بالا) استفاده می‌شود، پایین‌بوده و زمانی که از بازچرخانی قراضه (کیفیت پایین) استفاده می‌شود، بازده منابع بیشتر و از نظر زیست‌محیطی تولید پایدارتر است. کاراسکوئر و همکاران [۱۵] به نقش مهم انرژی در تامین آب اشاره کرده‌اند. به این مسئله^۵ در قسمت مدل‌سازی کمی ارتباط آب و انرژی، در ادبیات موضوع هم‌بست آب و انرژی به تفصیل پرداخته شده است [۱۶]. در تحقیقات دیگری از مفهوم آگرزری در ارزیابی اکولوژی، حسابداری منابع و ارزیابی زیست‌محیطی استفاده شده است [۱۷،۱۸]. مارتینز و همکاران [۱۹] به‌موضوع محاسبه

آگرزری جریان آب پرداخته و کیفیت آب را با روش هیدرونومیک- فیزیکی^۶ محاسبه کرده‌اند. هیوانگ و همکاران نیز برای بررسی کیفیت آب رودخانه، از این مفهوم بهره‌برده‌اند [۱۸]. شاخص‌های کیفیت آب بر مبنای آگرزری، هر چند امکان بررسی یک جریان در نقاط مختلف آن جریان را نشان می‌دهد ولی مقایسه چند جریان از لحاظ کیفی در یک سیستم را ارائه نمی‌کند. هر سیستم به دنبال هدف مختص خود است. کیفیت بالای جریان به تنهایی برای یک سیستم کافی نیست. کیفیت جریان در راستای هدف سیستم که بیانگر ارزش جریان برای آن سیستم است، اهمیت جریان برای سیستم را می‌رساند. کیفیت جریان در راستای هدف سیستم از طریق در نظر گرفتن تجمیع هزینه‌های صرف شده برای جریان نیز می‌تواند شاخصی برای تمایز جریان‌ها باشد. ترمواکونومیک روشی است که برای تخصیص جریان هزینه بر اساس آگرزری جریان‌ها به کار گرفته شده‌است. از ترمواکونومیک به عنوان علم صیانت از منابع نام‌برده‌اند [۲۰]. محققین مختلف از تحلیل ترمواکونومیک، برای بهینه‌سازی سیستم‌های مختلف انرژی بهره‌برده و نتایج حاصل از استفاده از این روش را ارائه کرده‌اند [۲۱،۲۲]. کاراسکوئر و همکاران براساس کارهای انجام شده پیشین به توضیح هزینه آگرزری منابع آب پرداخته و کیفیت آب را با استفاده از این روش تحلیل کردند. آنها به صرف هزینه آگرزری در فناوری‌های مختلف برای برگرداندن جریان مصرف شده به حالت اول اشاره کردند. آنها هزینه آگرزری را معادل مقدار منبع استفاده‌شده برای تولید محصول بیان کردند. در نتیجه‌گیری تحقیق خود بیان داشتند که روش توسعه‌داده شده توسط آنها، باعث کاهش تخریب آگرزری و در نتیجه سبب کاهش هزینه‌های مالی^۷ می‌گردد [۲۳]. پولی‌سازی کردن کیفیت جریان‌ها موجب تسهیل در تصمیم‌سازی برای انتخاب فرآیندها می‌شود. علاوه بر صرفه‌جویی مصرف منابع، نقش فناوری و هزینه‌های سرمایه‌گذاری، عملیاتی و نگهداری آن در اقتصاد بازچرخانی و انتخاب آن موثر است [۲۲].

لیمینگای و همکاران [۲۴] به بررسی بازچرخانی از لحاظ رقابت هزینه‌های اقتصادی در کنار مصرف آگرزری با معرفی شاخص TCI^۸ پرداختند و نقطه بهینه درصد بازچرخانی، بر این اساس را ارائه کردند. در کنار محاسبه هزینه آگرزری و هزینه آگرزری واحد، آگرگواکونومیک برای تخصیص مقادیر عددی به واحد یکسان پولی برای انعکاس مقادیر کیفی جریان‌ها، استفاده شده‌است [۲۵]. ساتسارونیس و همکاران [۲۶] از این امکان برای انعکاس هزینه سرمایه و کمی‌سازی مربوط به ارزش

5. Energy for Water
6. Physical hydronomics
7. Monetary
8. Total Circularity Index

1. Water Changes
2. Water Quality for Agriculture
3. Exergy Life Cycle Assessment
4. Resource Input Ratio

جریان‌های انرژی در تحلیل اگزروگوانومیک در نیروگاه و هزینه-اگزروگوانومیک تولید برق بهره‌بردارند. در این تحقیق از شاخص هزینه اگزروگوانومیک برای تبیین شدت هزینه اگزرژی مصرفی تبدیل شده به واحد پولی و مقایسه وضعیت جریان‌ها استفاده شده است. فرایا و همکاران [۲۷] نیز با استفاده از تحلیل اگزروگوانومیک، بهینه‌سازی سیستم تامین انرژی تصفیه لجن فاضلاب و تولید برق با استفاده از زمین‌گرمایی^۱ را برای کشور ایسلند انجام دادند. چیت‌ساز و همکاران [۲۸] با روش هزینه اگزروگوانومیک و مقایسه بازچرخانی گاز آند و کاتد در فرایند SOFC^۲ و کاهش هزینه اگزروگوانومیک برق تولیدی را نسب به حالت بدون بازچرخانی نشان دادند.

تحقیقات پیشین برای بررسی بازچرخانی در سیستم و تحلیل کیفیت جریان‌های مختلف آب، از روش‌های تحلیل چرخه عمر (LCA)، انرژی مصرفی جهت تامین آب، تحلیل کیفی آب با روش‌های مختلف از جمله اگزرژی، و همچنین تحلیل جریان با هزینه اگزرژی جریان‌های آب، بهره‌بردارند. همچنین برای پولی‌سازی هزینه صرف شده برای جریان-های انرژی، جهت تصمیم‌سازی بهتر و بهینه‌سازی سیستم، روش هزینه اگزروگوانومیک به کار گرفته شده است. جمع‌بندی مطالعات مختلف نشان می‌دهد که برای بررسی دلیل منطقی بودن بازچرخانی جریان‌های زهاب یا فاضلاب در سیستم از بعد ترمودینامیک، بررسی کیفیت آب یا بیان تمایز جریان‌های مختلف موضوع مهمی است که نیاز است به آن پرداخته شود. برای بررسی کیفیت نیز شاخص‌های زیست‌محیطی متداول مانند PH، EC، COD و ... نیز به تنهایی برای ارائه شرایط جامع جریان و امکان تمایز کلیه جریان‌ها، در سیستم کارایی لازم را ندارند. اگزرژی هر چند پارامترهای مختلف کیفیت را منعکس می‌کند ولی با توجه به هدف سیستم، امکان بررسی جریان‌ها از انواع مختلف را ارائه نمی‌دهد.

از طرفی تحلیل اگزروگوانومیک، به صورت جامع برای بررسی اثر بازچرخانی زهاب در گلخانه و پارامترهای موثر در منطقی شدن کاربرد

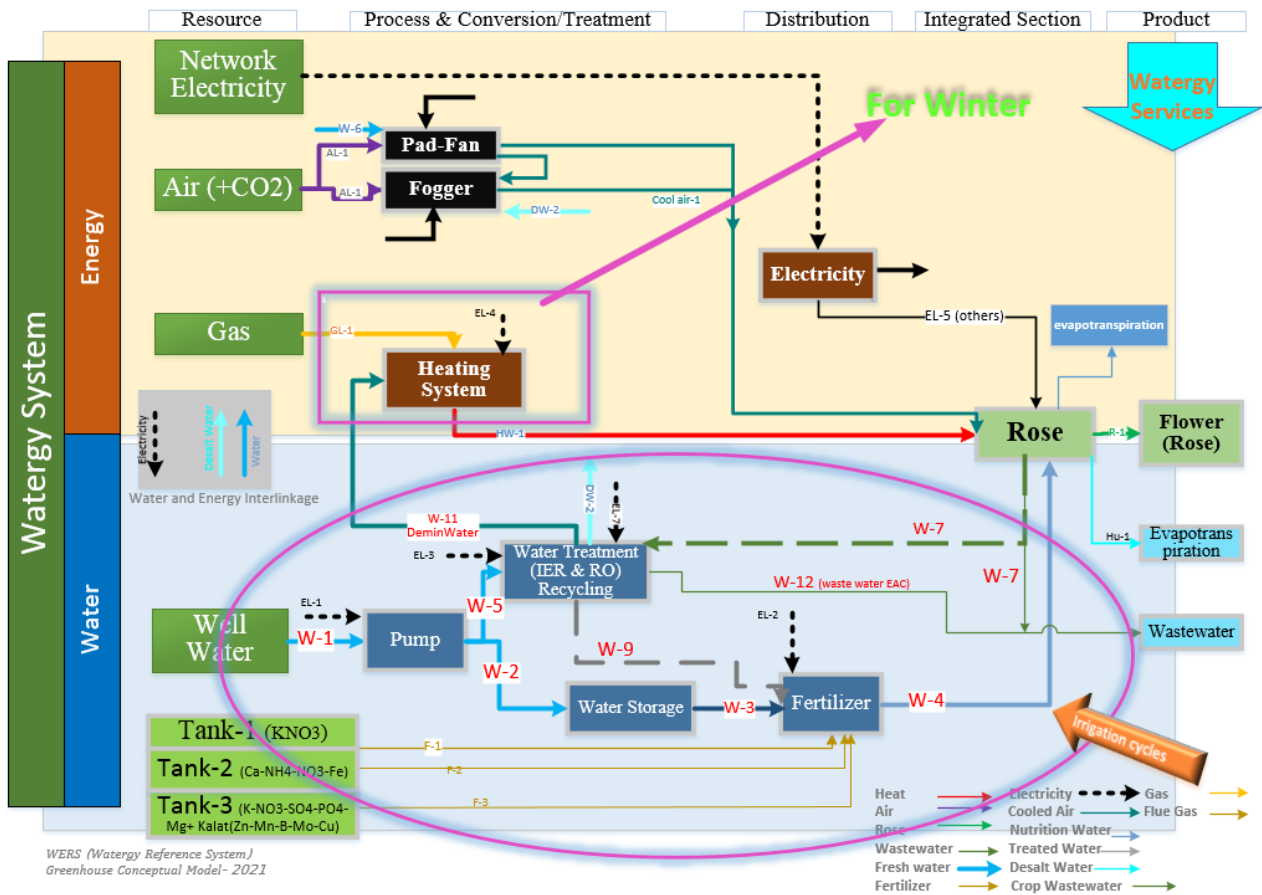
آن در کارهای پیشین، ارائه نگردیده است. به همین دلیل در تحقیق حاضر، برای یافتن علت منطقی بودن بازچرخانی زهاب، با در نظر گرفتن هزینه صرف شده برای جریان‌ها برای رسیدن به هدف سیستم، و ارائه ابزار تصمیم‌سازی مناسب مبتنی بر مقدار پولی‌سازی شده، تحلیل این فرآیند با روش هزینه اگزروگوانومیک ارائه شده است.

۲. روش پژوهش

در سیستم کودآبیاری کشت هیدروپونیک در گلخانه، آب از ابتدای استخراج از چاه تا مرحله تغذیه گیاه، مجموعه‌ای از کیفیت‌های مختلف را شامل می‌شود. در تحقیق حاضر مقایسه به‌کارگیری فناوری بازچرخانی زهاب در سیستم کشت هیدروپونیک بسته در مقایسه با سیستم کشت هیدروپونیک باز که در حالت فعلی گلخانه پایلوت به کار گرفته شده است، به عنوان نمونه موردی برای تحلیل با روش هزینه-اگزروگوانومیک موردنظر است.

۱.۲. تبیین مدل مفهومی

در گام اولیه برای تحلیل جامع‌تر و برای در نظر گرفتن چرخه عمر تولید گل رز، نمودار مرجع و انرژی^۳ (نمودار مرجع مبتنی بر هم‌بست آب-انرژی) برای پایلوت گلخانه با تمرکز بر بخش کود آبیاری و برای یک دوره کشت شش‌ماهه مربوط به فصل سرد (که در گلخانه فناوری گرمایشی بویلر برای تامین گرمایش در این دوره استفاده می‌گردد)، به صورت شکل (۱) ترسیم گردیده است. در این نمودار چرخه کامل کودآبیاری باز در زیرسیستم آب، در کنار سایر جریان‌های مورد نیاز گیاه در کنار زیرسیستم انرژی، ترسیم شده است (برای توضیحات تکمیلی در مورد سیستم مرجع و انرژی و نحوه ترسیم زیرسیستم‌های انرژی و آب، به مرجع [۱۶] که برای صنعت فولاد تهیه شده است، مراجعه شود).



شکل (۱): مدل مفهومی سیستم مرجع واترزی گلخانه (WERS) و سیستم بازچرخانی زهاب در فصل سرد (توسعه توسط نگارندگان مقاله)

تبادل یونی برای تولید جریان آب با کیفیت مناسب برای ورود به بویلر است.

۲.۲. معادلات ریاضی و محاسبات

بررسی اثرات بازچرخانی، نیازمند کمی‌سازی مقادیر و استفاده از معادلات ریاضی برای تحلیل جامع شرایط سیستم در دو حالت سیستم باز و بسته است. در نتیجه پس از در نظر گرفتن مقادیر کمی جریان‌ها و محتوای آنها، محاسبه آگرزژی، هزینه‌آگرزژی و هزینه-آگرزگواکونومیک جریان‌ها لازم هستند. در ادامه معادلات مربوط به هر یک در بخش‌های مختلف ارائه شده‌اند.

۱.۲.۲. معادلات بازچرخانی

اولین گام برای محاسبات، مشخص کردن مقادیر کمی هر یک از جریان‌ها یا مواد ورودی برای یک دوره کشت در فصل سرد در گلخانه است. در حالت سیکل باز کودآبیاری (Open) و سیکل باز به همراه حذف آلاینده با در نظر گرفتن هزینه جبران آگرزژی (Open-EAC) مقادیر

شکل (۱) نشانگر نمودار کامل سیستم مرجع واترزی گلخانه، شامل زیرسیستم‌های آب و انرژی است. این نمودار برای بخش کودآبیاری، به صورت جامع هر دو حالت سیکل کودآبیاری باز و بسته را در بر گرفته است. در نمودار مرجع واترزی گلخانه در زیرسیستم انرژی، منابع انرژی (گاز، برق شبکه)، سیستم گرمایش در فصل سرد (که در گلخانه پایلوت سیستم بویلر است) و سیستم تامین کننده برق، در لایه‌های مختلف قرار گرفته‌اند. در زیرسیستم آب فناوری‌های مربوط به تامین، توزیع و تصفیه و همچنین بازچرخانی جریان‌های مختلف آب، نشان داده شده‌اند. سیستم کودآبیاری شامل بخش‌های اصلی از جمله: منابع آب ورودی از چاه آب (W-1)، پمپ‌ها (W-2, 5)، فرتیلایزر^۱ (دستگاه اختلاط کود و آب و تهیه محلول تغذیه) (W-4) است. در نمودار برای جامعیت بیشتر و نشان دادن همزمان جریان‌ها، فناوری بازچرخانی زهاب و جریان برگشتی از گیاه (W-7) نیز نشان داده شده‌است. جریان (W-9) نیز زهاب تصفیه شده برای استفاده مجدد در سیستم است. در شکل (۱) جریان (W-5) و (W-11) مقادیر جریان ورودی و خروجی از سیستم

1. Fertilizer injection machine

مختلف جریان‌ها مشخص هستند و از داده‌های نمونه مورد بررسی، این مقادیر تعیین شده‌اند. برای حالت سوم که سیستم بسته کودآبیاری است (Close)، با توجه به وجود جریان بازچرخانی شده در سیستم، بر اساس روابطی که کنراد [۲۹] ارائه کرده است، مقادیر جریان بازچرخانی بر اساس رابطه‌های (۱) و (۲)، محاسبه می‌گردند.

$$WW_{rntt} = \beta_{rntt} \times M_{n\theta tt} \quad (1)$$

$$F_{ntt} = (1 - \beta_{rntt}) \times M_{n\theta tt} \quad (2)$$

در معادلات فوق، WW_{rntt} مقدار زهاب تولیدی برای یک دوره کشت است که قابلیت بازچرخانی دارد، و F_{ntt} مقدار جریان اصلی خروجی سیستم و $M_{n\theta tt}$ جریان ورودی به بسترکشت در حجم کنترل یکپارچه‌سازی برای تولید رز هستند.

۲.۲.۲. هزینه‌های انرژی و هزینه‌های آگروکونومیک جریان‌ها

در این تحقیق انرژی‌های جریان‌ها با توجه به رابطه استفاده شده توسط کاراسکوئر و همکاران [۱۵] محاسبه شده است. رابطه (۳) تمامی پارامترهای مربوط به محتوای انرژی یک جریان را ارائه می‌کند. بر اساس این رابطه، مقادیر کمی انرژی هر جریان در سیستم واترژری گلخانه و بخش کودآبیاری در زیر سیستم آب محاسبه گردیده است.

$$ex = \underbrace{C_{p,H_2O} [T - T_0 - T_0 \ln(\frac{T}{T_0})]}_{b_1 \text{ انرژی حرارتی}} + \underbrace{v_{H_2O} (p - p_0)}_{b_{mech} \text{ انرژی مکانیکی}} + \underbrace{[\sum_i \gamma_i (\Delta G_{f_i} + \sum_e n_e b_{ch,n_e})_i]}_{\text{انرژی شیمیایی تشکیل } b_{ch,f} \text{ و اختلاط } b_{ch,c}} + \underbrace{RT_0 \sum_i x_i \ln \frac{a_i}{a_0}}_{\text{انرژی پتانسیل } b_p} + \underbrace{\frac{1}{2} \left(\frac{\psi^2 - \psi_0^2}{1000} \right) + g(z - z_0)}_{\text{انرژی جنبشی } b_k} \quad (3)$$

در رابطه فوق، ex مقدار کل محتوای انرژی واحد است که به ترتیب براساس معادله (۳) شامل ترم‌های: انرژی حرارتی، انرژی مکانیکی، انرژی شیمیایی، تغییر انرژی حاصل از اختلاط، انرژی جنبشی و انرژی پتانسیل، C_{p,H_2O} مقدار ظرفیت گرمایی آب در فشار مورد نظر، T مقدار دمای جریان، T_0 دمای محیط مرجع، v_{H_2O} حجم ویژه آب، P فشار محیط، P_0 فشار محیط مرجع، γ_i مقدار درصد جریان ماده i در محلول، ΔG_{f_i} مقدار انرژی آزاد گیبس ماده f ، n_e مقدار ماده e در محلول، b_{ch,n_e} مقدار انرژی شیمیایی ماده e ، R ثابت گازها، x_i جزء

مولی ماده i در محلول، a_i ضریب اکتیویته جریان i در محلول در شرایط جریان، a_0 ضریب اکتیویته در شرایط مرجع، Ψ مقدار سرعت جریان شرایط عملیات، Ψ_0 سرعت جریان در شرایط مرجع، g شتاب گرانش زمین، z_0 مقدار ارتفاع مرجع از سطح زمین و z ارتفاع ماده در شرایط عملیات از سطح زمین، هستند. پس از محاسبه مقادیر انرژی، نیاز است که هزینه انرژی جریان‌ها به دست‌آید. رابطه‌های (۴) و (۵) نحوه محاسبه هزینه انرژی و هزینه انرژی واحد را نشان می‌دهند.

$$E_{i out}^* = \sum_{j=0}^n E_{j in}^* \quad (4)$$

$$k_i^* = \frac{E_{i out}^*}{E_i} \quad (5)$$

در رابطه فوق $E_{i out}^*$ هزینه انرژی جریان خروجی و $E_{j in}$ مقدار انرژی جریان ورودی j هستند. k_i^* نیز بیانگر هزینه واحد انرژی است. برای تحلیل جامع سیستم گلخانه و هزینه انرژی تولید محصول، جریان‌ها در دو زیرسیستم آب و انرژی با برهم‌کنش بر یکدیگر به صورت هم‌زمان در نظر گرفته شده‌اند. فرمول محاسبه هزینه انرژی آگروکونومیک، C_i ، مطابق مرجع [۲۵] در رابطه (۶) ارائه شده است. با توجه به این‌که مقادیر هزینه آگروکونومیک نیز وابسته به مقدار جریان است، در نتیجه برای مقایسه بهتر جریان‌ها و بیان تمایز آنها، از معیار هزینه آگروکونومیک واحد (رابطه ۷) استفاده شده است.

$$\sum_{i \in IN} c_i \dot{E}_i + \dot{Z} = \sum_{j \in OUT} c_j \dot{E}_j \quad (6)$$

$$c_i = \frac{\dot{C}_i}{\dot{E}_i} \quad (7)$$

در این رابطه برای محاسبه هزینه انرژی واحد (c)، عبارت \dot{Z} یا همان جریان هزینه سرمایه‌گذاری نیز در نظر گرفته شده است. در جدول پیوست-۱ هزینه سرمایه بخش‌های گلخانه که \dot{Z} براساس آنها حاصل می‌گردد، ارائه شده است. محاسبات برای جریان‌های مختلف آب در سیستم گلخانه براساس سیستم مرجع واترژری گلخانه (شکل ۱) انجام گرفته و نتایج محاسبات در بخش نتایج، برای سه سناریو، ارائه شده‌اند. جریان W-7 که زهاب خروجی از کشت هیدروپونیک است، به این دلیل که در سیستم باز نه تنها از این جریان استفاده‌ای نمی‌توان کرد بلکه به دلیل وجود مواد شیمیایی آلاینده موجود در آن، آلاینده زیست‌محیطی به‌ویژه برای آبهای زیرزمینی است. از این رو با توجه به این‌که هدف اصلی گلخانه تولید گل رز است و این جریان به عنوان آلاینده زیست-محیطی بررسی می‌شود، در نتیجه هزینه آگروکونومیک آن برابر صفر در نظر گرفته شده است. در نتیجه برای این‌که زهاب خروجی برای محیط

کشت هیدروپونیک در گلخانه، می‌توان بخشی از آب به همراه کود (انواع عناصر غذایی) را بازیابی و مجدداً وارد چرخه تولید کرد. از این رو فناوری بازچرخانی زهاب کشت هیدروپونیک در گلخانه، به‌عنوان نمونه‌ای مناسب برای تحقیق حاضر در نظر گرفته شده است. پایلوت مورد بررسی سیستم کودآبیاری گلخانه با کشت هیدروپونیک گل رز نیکان واقع در تنکمان، در غرب استان البرز است. مشخصات این گلخانه در جدول (۱) ارائه شده است. کودآبیاری سیستم هیدروپونیک این گلخانه به‌صورت باز، انجام می‌گیرد. مالکان این گلخانه به‌دنبال ارزیابی سیستم هیدروپونیک بسته جهت جایگزینی با سیستم باز، در صورت منطقی بودن به‌کارگیری آن، برای کاهش در مصرف نهاده‌های تولید (به‌ویژه آب و کود) هستند.

جدول (۱): مشخصات فیزیکی، فناوری‌ها و نقاط عملیاتی در پایلوت گلخانه گل رز نیکان (استان البرز - منطقه تنکمان)

مشخصات	واحد	مقدار
طول-عرض-ارتفاع	m	۷/۱ - ۴۰ - ۱۲۵
مساحت کف گلخانه	m ²	۵۰۰۰
مساحت سطح پوشش گلخانه	m ²	۸۰۰۰
تراکم بوته‌ها	تعداد بوته در هر مترمربع	۸/۴
نقاط تنظیم دمای شب/روز	°C	۱۶ - ۲۰
نقطه تنظیم رطوبت	%	۵۰ - ۷۰
مساحت پد سرمایش	m ²	۱۶۰
سیستم گرمایش	-	بویلر
سیستم رطوبت زنی و سرمایش	-	مه پاش (Fogger) و پد - فن
سیستم کودآبیاری	-	سیکل باز
مصرف آب (زمستان)	ml - میلی‌لیتر به ازای هر بوته در روز	۴۰۰
سیستم آبیاری	-	آبیاری قطره‌ای

۱.۳. سناریوهای مختلف جهت مقایسه اثر بازچرخانی

زهاب

برای تحلیل اثر بازچرخانی زهاب کشت هیدروپونیک روی سیستم تولید گلخانه، در این تحقیق سه حالت زیر در نظر گرفته شده‌اند:

- تولید گل رز در سیکل کودآبیاری باز با در نظر گرفتن خروج کل زهاب تولیدی کشت هیدروپونیک به بیرون از گلخانه و تخلیه به محیط - زیست (Open Fertigation System-Open)

آسیب‌رسان نباشد، در سناریو دوم، محاسبه هزینه جبران انرژی (EAC)، برای فرآیند در نظر گرفته شده است [۳۰]. در این سناریو، مقداری هزینه انرژی گوناگون نیز به سیستم تحمیل می‌شود که در نهایت برای تولید رز برای سناریوی دوم لحاظ می‌گردد. در نتیجه در تحلیل سناریوی دوم (Open EAC)، می‌توان هزینه انرژی گوناگون تولید هر واحد گل‌رز شاخه‌بریده را مجموع هزینه انرژی گوناگون رز به همراه هزینه حذف آلاینده‌ها را به صورت مجموع و باهم دید. رابطه (۸) هزینه انرژی گوناگون تولید رز (EEC_{out}) در کنار نشان دادن اثر هزینه جبران انرژی بدون آلاینده‌ها (EAC_{en}) از تصفیه زهاب (EEC_{in}) را با هزینه سرمایه Z نشان می‌دهد. زهاب خروجی برای حذف آلاینده‌ها زیست‌محیطی نیاز به تصفیه و قبل از آزادسازی در محیط دارد.

$$\sum (EEC_{in}) + Z + \sum c_{EAC}(EAC_{en}) = \sum (EEC_{out}) \quad (8)$$

در معادله (۸)، EEC_{in} مقدار هزینه انرژی گوناگون رز تولیدی در حالت سیکل باز، EAC_{en} مقدار هزینه جبران انرژی برای مصرف در سیستم تصفیه و حذف آلاینده و EEC_{out} هزینه انرژی گوناگون رز تولیدی بدون ایجاد آلاینده‌ها در حالت سیکل باز با هزینه جبران انرژی هستند. Z در این رابطه نیز هزینه سرمایه‌گذاری فناوری تصفیه برای حذف آلاینده است.

۳. نمونه مورد مطالعه

تولید در گلخانه‌ها، از بخش‌های انرژی‌بر در کشاورزی است. در مقابل این روش تولید، مصرف آب کمتری نسبت به کشت در فضای باز دارد [۳۱]. گلخانه محیط کنترل شده‌ای است که به‌وسیله فناوری‌های مختلف، شرایط رشد مطلوب با بهره‌وری بالا را برای تولید محصول امکان‌پذیر می‌نماید. فناوری‌های گلخانه شامل سیستم‌های گرمایش، سرمایش، تهویه، روشنایی تکمیلی، پرده‌های سایه‌انداز و ذخیره انرژی، تزریق CO_2 ، بسترهای کشت هیدروپونیک، کودآبیاری و ... هستند. یکی از سیستم‌های گلخانه بخش کودآبیاری است. در فرآیند کودآبیاری، کیفیت‌های مختلف آب جریان دارند. دستگاهی به نام فرتیلایزر^۲ برای کودآبیاری در سیستم کشت هیدروپونیک گلخانه‌ها استفاده می‌گردد. پس از کودآبیاری کشت‌های هیدروپونیک، حدود ۲۵ الی ۳۰ درصد از جریان ورودی به‌صورت زهاب از انتهای بسترهای کشت خارج می‌گردد (در تحقیق حاضر مقدار بازچرخانی ۲۵٪ جریان ورودی به بستر در نظر گرفته شده است). با اعمال تصفیه روی جریان زهاب خروجی

شرایط مرجع $(\frac{a_i}{a_0})$ ، به صورت جزء مولی جریان i به شکل x_i در نظر گرفته شده است.

۴. نتایج

محاسبه هزینه آگزروگواکونومیک تولید هر شاخه گل رز شاخه بریده برای سه سناریوی سیستم آبیاری باز (Open)، آبیاری باز با حذف آلاینده‌گی و در نظر گرفتن هزینه جبران آگزروژی (Open EAC)، و سیستم آبیاری بسته (Close) انجام گرفت. براساس محاسبات، نتایج و مقادیر هزینه آگزروگواکونومیک جریان‌های مختلف برای تولید رز در جدول (۲) ارائه شده‌اند. در این جدول، جریان‌های مختلف در سیستم کود آبیاری هیدروپونیک در سه سناریو، به همراه مقادیر شاخص‌های ترمواکونومیکی شامل هزینه آگزروژی و هزینه آگزروگواکونومیک واحد برای این جریان‌های آب ارائه شده‌اند. برای مقایسه مقادیر شاخص ترمواکونومیکی (هزینه آگزروگواکونومیک واحد c) با شاخص‌های شیمیایی متداول بیانگر کیفیت آب آبیاری، مقادیر دو پارامتر EC و PH که دو پارامتر مهم در تعیین وضعیت کیفی آب در سیستم کود آبیاری هستند، ارائه شده‌اند. همان‌طور که در این جدول دیده می‌شود، برای جریان‌های مختلف شاخص‌های متداول کیفیت آب مانند EC و PH که به ترتیب بیانگر نمک‌های محلول در آب (شوری آب) و اسیدیته آب هستند، مقادیر تقریباً یکسانی دارند. در حالی که شاخص ترمواکونومیکی هزینه آگزروگواکونومیک واحد (c) آب برای جریان‌های مختلف، مقادیر مختلفی به خود گرفته است. هزینه آگزروگواکونومیک واحد هر جریان، بیانگر هزینه صرف شده برای رسیدن به آن جریان است که می‌تواند نشان از اهمیت آن جریان در راستای هدف سیستم باشد. همان‌طور که در جدول (۲) دیده می‌شود، جریان زهاب پس از تصفیه دارای هزینه آگزروژی واحد بالاتر بوده و مقدار هزینه آگزروگواکونومیک آن پس از جریان آب تغذیه، قرار گرفته است. این جریان تصفیه شده با ارزش بالا، در سناریو دوم بدون ایجاد آلاینده‌گی به محیط زیست وارد می‌شود. در سومین گام، برای جریان‌های مختلف در سیستم کودآبیاری بسته، تحلیل هزینه آگزروگواکونومیک انجام گرفته و مقادیر برای جریان‌های مختلف ارائه شده‌اند. همان‌طور که در جدول (۲) نشان داده شده، مقدار c زهاب تصفیه شده در سناریو سوم نیز، با مقدار پایین‌تر از آب تغذیه، از لحاظ این شاخص ترمواکونومیکی تشخیص داده شده است.

۲- بررسی تولید گل رز برای سیکل کودآبیاری باز با در نظر گرفتن اثرات هزینه زیست‌محیطی و به کارگیری فرایند تصفیه زهاب پیش از دورریز به محیط زیست با اضافه کردن هزینه جبران آگزروژی (Exergy Abatement Cost-Open EAC)

۳- تولید گل رز در چرخه کودآبیاری بسته برای مشاهده اثر کامل کاهش تلفات از طریق بازچرخانی زهاب هیدروپونیک (Close fertigation System-Close).

۲.۳. دوره زمانی محاسبات

فرایند تولیدات گلخانه‌ای، هر سال به دو بخش فصول سرد و گرم تقسیم می‌شوند. در فصول سرد فناوری اصلی زیرسیستم انرژی در سیستم مرجع واترژنی (آب و انرژی)، بخش گرمایش است که مصرف عمده آن گاز طبیعی (شهری) است. بخش عمده مصرف آب در فصول سرد در زیرسیستم آب در بخش کودآبیاری است. در حالی که در فصول گرم، سیستم‌های سرمایش تبخیری مانند پد - فن و فوگر مورد استفاده قرار می‌گیرند که مصرف آب زیادی دارند به طوری که تقریباً تا نیمی از مصرف آب گلخانه در تابستان را شامل می‌شوند. برای تمرکز بر موضوع اصلی تحقیق و سیستم کودآبیاری در زیرسیستم آب، مجموع فصول سرد در سال ۲۰۱۹ برای نمونه مورد مطالعه در نظر گرفته شده است. مقادیر نهاده‌های ورودی نیز متناسب با فصول سرد در تحلیل در نظر گرفته شده‌اند.

۳.۳. فرضیات تحقیق

برای تحلیل مناسب سیستم، و رسیدن به نتیجه مطلوب، فرضیات زیر در محاسبات در نظر گرفته شده‌اند:

۱- هزینه سرمایه‌ای ثابت گلخانه شامل هزینه سازه گلخانه، و همچنین هزینه سرمایه مربوط به سیستم سرمایش (که تجهیزات فصل گرم هستند) و بستر کشت و برخی هزینه‌های سرمایه‌ای دیگر، که برای بهره‌برداری گلخانه ضروری هستند ولی در تحلیل جریان‌های آب در فصل سرد در سه سناریو یکسان می‌باشند، به بخش هزینه لایه یکپارچه - سازی تولید گل رز^۱ اضافه شده، و در حجم کنترل گل رز (Rose CV) در نظر گرفته شده‌اند.

۲- محیط مرجع برای انجام محاسبات، هوای محیط بیرون با دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و فشار ۱ بار در نظر گرفته شده است.

۳- جریان آب به صورت سیال تراکم ناپذیر^۲ در نظر گرفته شده است در نتیجه نسبت ضریب اکتیویته در شرایط جریان به ضریب اکتیویته در

جدول (۲): شاخص‌های مختلف ترمواکونومیکی و شیمیایی جریان‌های آب در سیستم کودآبیاری باز، باز همراه با هزینه جبران آگرزژی و بسته

شاخص‌های کیفیت آب		سیستم بسته کودآبیاری			سیستم باز با در نظر گرفتن هزینه جبران آگرزژی			سیستم باز			نماد	نام جریان
PH (Acidity Test)	EC – dS/m (Salt Test)	Quality Pyramid	c (\$/Gj)	k* (Gj/Gj)	Quality Pyramid	c (\$/Gj)	k* (Gj/Gj)	Quality Pyramid	c (\$/Gj)	k* (Gj/Gj)		
۷- ۷/۵	۱/۵- ۲	G	۲/۸	۱	G	۲/۸	۱	F	۲/۸	۱	W-1	آب چاه
۷- ۷/۵	۱/۵- ۲	E	۱۹	۲/۱۷	E	۱۶/۳	۲/۰۷	D	۱۶/۳	۲/۰۷	W-2	آب پمپ شده
۷- ۷/۵	۱/۵- ۲	C	۳۸/۹	۲/۱۷	D	۳۲/۹	۲/۰۷	C	۳۲/۹	۲/۰۷	W-3	آب خروجی از تانک ذخیره
۵/۵ – ۵/۸	۱/۴ – ۱/۸	A	۴۵۹/۹	۱/۷۹	A	۵۰۱/۸	۱/۹۵	A	۵۰۱/۸	۱/۹۵	W-4	آب تغذیه (بعد از فرتیلایزر)
۶- ۶/۵	۱/۵- ۲	F	۶/۳	۱	F	۶/۳	۱	E	۶/۳	۱	W-5	ورودی تصفیه تبادل یونی
۶- ۶/۵	۱- ۱/۵	D	۳۷	۱/۱۴	C	۳۷	۱/۱۴	B	۳۷	۱/۱۴	W-11 (Demin Water)	آب بویلر (دمین)
۸- ۹	۲/۵- ۵/۵	H	۰	۰	H	۰	۰	G	۰	۰	W-7 (Drainage)	زهاب
۷- ۷/۵	۱/۵- ۲				B	۱۳۹	۰/۳۱				W-12 (EAC)	زهاب تصفیه‌شده در سیستم باز (شامل EAC)
۷- ۸	۲- ۵	B	۱۷۶/۵	۰/۳۷							W-9 (Treated water)	زهاب تصفیه‌شده در سیستم بسته
۶- ۶/۵	۱/۵- ۲	H	۰	۰							W-7 Wastewater	فاضلاب نهایی

۱. هزینه آگرزژی واحد

۲. هزینه آگرزگواکونومیک واحد

۳. هزینه آگرزژی واحد



شکل (۲): مقایسه مقادیر c برای جریان‌های مختلف آب در سیستم هیدروپونیک باز و بسته در مقیاس لگاریتمی

۵. بحث و بررسی

مقادیر هزینه‌های انرژی واحد و هزینه‌های انرژی واحد برای جریان‌های مختلف در سه حالت، در جدول (۲) ارائه گردیده‌اند. کاسترو و امینی [۶، ۹] در کارهای قبل، با LCA به تحلیل بخش‌های مختلف تولید با بازچرخانی و هزینه‌های آن پرداخته‌اند ولی در تحقیق حاضر از تحلیل هزینه‌های انرژی واحد بهره‌بردار شده است. بررسی هزینه‌های انرژی واحد تولید رز در هر یک از سه حالت، نشان دهنده مسیر طی شده همراه با مقدار تخریب انرژی واحد آن مسیر برای تولید گل رز است. براساس محاسبات انجام شده برای سه حالت مورد نظر مقادیر c برای تولید گل رز، در جدول (۳) ارائه شده است. شکل (۳) نیز مقایسه مقادیر c را در کنار یکدیگر به نمایش گذاشته است.

جدول (۳): مقایسه مقادیر هزینه انرژی واحد و هزینه‌های انرژی واحد

برای تولید رز در حالت‌های مختلف

نام جریان	k^* (Gj/Gj^{-1})	ϵ_c ($\$/Gj^{-1}$)	$\dot{C}/Flower^3$ ($\$/Cut flower$)
سیستم باز (Open)	۵۰/۷۸	۷۴/۲	۰/۰۷۴
سیستم باز به همراه هزینه‌های انرژی واحد (Open-EAC)	۵۰/۷۹	۷۷/۸	۰/۰۷۷

پس از ارائه جدول شاخص‌های مختلف ترمودینامیکی و کیفی جریان‌های آب برای سه سناریو در شرایط مختلف، در شکل (۲) مقایسه هزینه‌های انرژی واحد (c) برای جریان‌های مختلف آب در دو حالت باز و بسته ارائه شده است. در نمودار (۲)، c برای جریان آب تغذیه (آب خروجی از دستگاه فرتیلائزر) در هر دو حالت باز و بسته دارای بیشترین مقدار نسبت به جریان‌های دیگر است. همان‌طوری که در این نمودار مشخص شده است، به دلیل بازیابی زهاب در سیستم بسته، مقدار c برای این حالت برای جریان W-4 (آب تغذیه) با مقدار $459.9 \$/Gj^{-1}$ کمتر از حالت باز با مقدار $501.8 \$/Gj^{-1}$ شده است. هر چند که سهم هزینه سرمایه در سیستم بازیابی زهاب بیشتر شده است، اما کاهش تخریب انرژی در مجموع سبب گردیده که هزینه انرژی واحد صرف شده در این سیستم، کمتر گردد. برای آب خروجی از پمپ (W-2) و تانک ذخیره (W-3) مقدار c برای حالت باز کمتر شده است. دلیل این اتفاق در نظر گرفتن فناوری موجود در گلخانه با ظرفیت یکسان برای دو حالت است در حالی که در سیکل بسته، جریان کمتری از این فناوری‌ها (به دلیل برگشت جریان زهاب تصفیه شده به چرخه) استفاده شده است. در نتیجه هزینه سرمایه یکسان ولی انرژی واحد خروجی کمتر یا همان استفاده کمتر از فناوری سبب این اتفاق شده است.

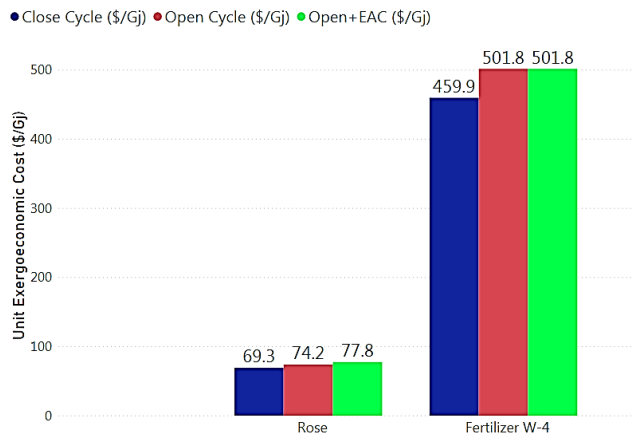
۱. هزینه انرژی واحد

۲. هزینه انرژی واحد

۳. هزینه انرژی واحد برای شاخص گل رز (این شاخص برای نمایش ملموس‌تر هزینه ترمودینامیکی صرف شده برای محصول ارائه شده است).

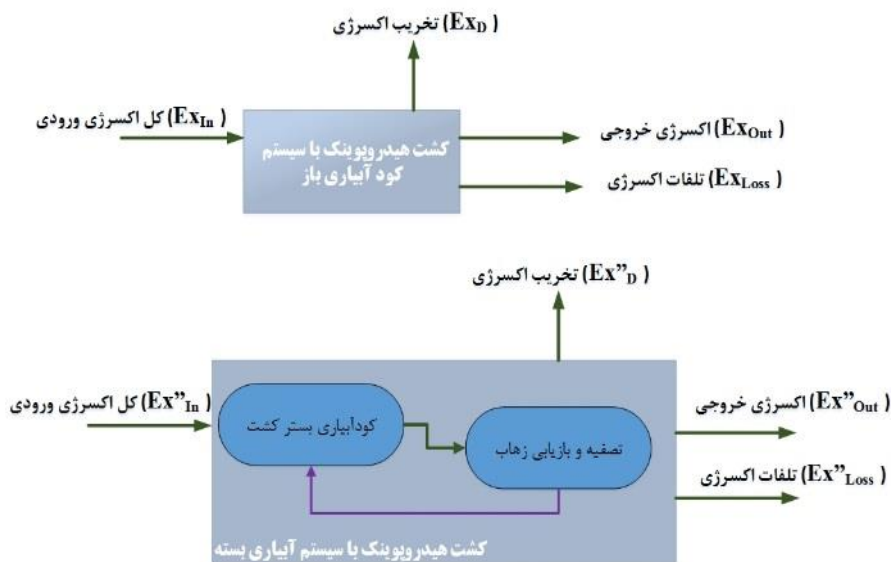
نام جریان	k^* (Gj/Gj ⁻¹)	ρ_c (\$/Gj ⁻¹)	\dot{C}/Flower^3 (\$/Cut flower)
سیستم بسته (Close)	۵۰/۷۶	۶۹/۳	۰/۰۷

بیشترین c را دارند. همچنین سیستم باز، بین این دو مقدار را شامل می‌شود. این در حالی است که هر سه حالت تقریباً دارای هزینه انرژی واحد یکسان هستند (جدول ۳). همان‌طور که دیده می‌شود، شاخص هزینه انرژی واحد (k^*) در هر سه حالت بسیار نزدیک به هم است. در نتیجه این شاخص کارایی لازم برای بیان تمایز بین جریان‌ها را ندارد. k^* هر چند که اثر مصرف بیشتر انرژی سیستم در هر حالت را منعکس کرده است ولی اثر به‌کارگیری فناوری‌ها و هزینه سرمایه آن در سه حالت را نشان نمی‌دهد. هزینه انرژی واحد با انعکاس هزینه سرمایه‌گذاری تجهیزات به‌صورت جامع‌تر، سیستم را بررسی و تحلیل می‌کند. از این رو تمایز حالات با این شاخص، مشخص‌تر است. برای آب تغذیه ورودی به بستر کشت به دلیل یکسان بودن در دو حالت باز و باز با هزینه جبران انرژی، مقادیر یکسان داشته ولی برای حالتی که بازیابی زهاب داریم، برگشت جریان موجب کاهش مقدار c برای آب تغذیه (مشکل از آب و کودهای تازه و زهاب بازیابی شده) است. از این رو تمایز حالات مشخص‌تر هستند. در شکل (۴) دو سیستم باز و بسته به همراه نمایش شماتیک انرژی ورودی و خروجی دو سیستم و تلفات هر دو سیستم، نشان داده شده‌اند.



شکل (۳): مقایسه مقادیر c برای جریان‌های آب تغذیه و گل رز تولیدی در سه حالت مختلف

سیستم بسته کمترین c و سیستم باز با در نظر گرفتن هزینه حذف آلاینده‌ها برای کاهش جرائم زیست‌محیطی و نیز هزینه جبران انرژی،

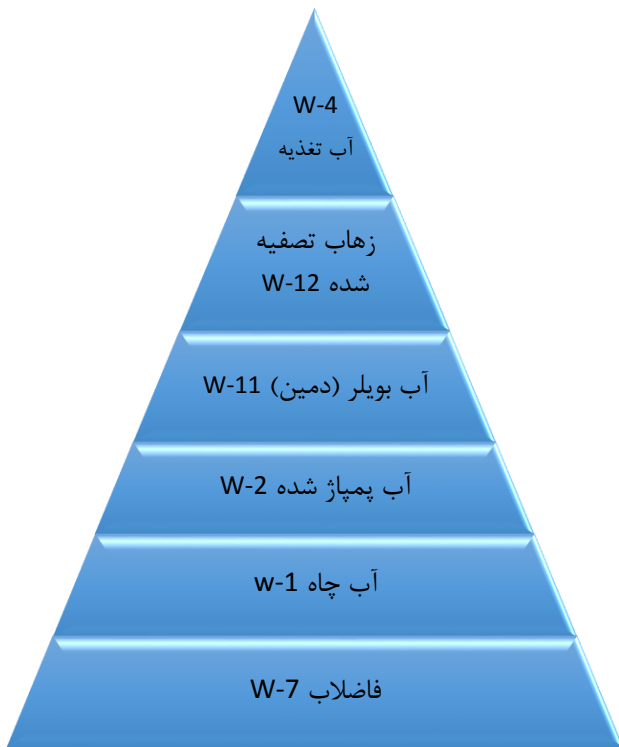


شکل (۴): مدل شماتیک دو سیستم کودآبیاری باز و سیستم همراه با فرآیند بازچرخانی

۱/۲۴ کاهش انرژی مقدار آب ورودی به سیستم، ناشی از این کاهش تلفات با بازچرخانی است که افزایش Gj ۱/۱۲ مصرف انرژی برق را همراه دارد. هر چند مصرف انرژی بیشتر برای برق در سیستم بسته رخ داده است ولی همراه با کاهش تخریب منابع ورودی به سیستم بوده است. بازچرخانی در نهایت باعث شده است که هزینه انرژی واحد

برای تولید محصول مشابه در دو حالت، کل انرژی مربوط به آب، برق و کود ورودی به سیستم در سیکل باز Gj ۷۶/۲ و در سیکل بسته Gj ۷۳/۹ است. این در حالی است که در سیکل بسته Gj ۴/۰۲ در دوره کشت، زهاب دارای کود، تصفیه و بازیابی شده است. در نهایت Gj

تمام شده برای تولید محصول، کمتر گردد که بیانگر دلیل منطقی بودن به کارگیری فرآیند بازچرخانی زهاب خروجی از دیدگاه ترموآکونومیک است. در تحقیق چیت‌ساز و همکاران [۲۸] نیز که گازهای خروجی از آند و کاتد مربوط به فناوری^۱ SOFC بازچرخانی شده، اشاره گردیده است که هزینه اگزروگواکونومیک تولید برق در فرآیند با سیکل بسته کمتر از حالت باز است. به شکلی دیگر، مختاری و رستمی [۳۲] نیز در نتیجه تحقیق خود بیان کرده‌اند که بازیابی حرارتی از گرمای اتلافی موتور احتراق داخلی نسبت به حالت ساده موجب افزایش بازده اگزورژی شده است. در کنار نتیجه فوق با قرار دادن مقادیر هزینه اگزروگواکونومیک واحد جریان‌های آب در کنار هم (مانند جدول ۲)، و مقایسه آنها، هرم کیفیت جریان‌های مختلف آب نیز شکل می‌گیرد (شکل ۵). در تحقیق حاضر دسته‌بندی این تمایز به شکل هرم کیفیت برای جریان‌های آب داخل گلخانه بر اساس شاخص ترموآکونومیکی، برای اولین بار انجام و ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، جریان‌های مختلف سیستم به این وسیله از نظر هزینه اگزروگواکونومیک که برای رسیدن به هدف سیستم برای آنها صرف شده است، دسته‌بندی و متمایز شده‌اند.



شکل (۵): هرم کیفیت جریان‌های آب بر اساس شاخص هزینه اگزروگواکونومیک واحد (c) جریان

در پایلوت مورد بررسی و بر اساس هزینه اگزروگواکونومیک واحد جریان‌ها (c)، بیشترین مقدار برای آب مورد استفاده در تغذیه گیاه و کمترین آن، برای فاضلاب (زهاب خروجی) است. شکل (۵)، هرم کیفیت آب را برای سیستم کودآبیاری بسته (با توجه به جامعیت جریان-ها) ارائه کرده است.

۶. نتیجه‌گیری

همان‌طور که در بررسی پیشینه پژوهش بیان شد، پارامترها و شاخص‌های فیزیکی و شیمیایی بیانگر کیفیت آب مانند BOD و COD و ... توان بیان هزینه‌های مصرفی برای رسیدن به یک جریان، یا ارزش جریان با در نظر گرفتن کلیه محتوی و هزینه‌های صرف شده برای آن با توجه به هدف سیستم، را نداشته و نمی‌توانند بیانگر پارامتر جامعی برای تمایز جریان‌های آب در سیستم باشند. روش‌های اگزورژی و هزینه اگزورژی نیز با توجه به محدودیت‌های مطرح شده در مقایسه جریان‌های مختلف و به دلیل عدم انعکاس نقش فناوری، کارایی لازم را برای بیان هزینه انباشته شده به مقیاس پولی برای هر جریان، جهت رسیدن به هدف سیستم را ندارند. به همین دلیل در مقاله حاضر، از پارامتر ترموآکونومیکی مبتنی بر روش هزینه اگزروگواکونومیک واحد برای بیان کمی وضعیت آب و بیان انباشت هزینه‌های صرف شده برای جریان‌ها در راستای تحقق هدف سیستم، استفاده گردید. پس از ترسیم نمودار مرجع واترژری (آب و انرژی) گلخانه و مشخص نمودن فرآیند کودآبیاری به عنوان پایلوت، مقادیر اگزورژی و هزینه اگزورژی و در نهایت هزینه اگزروگواکونومیک جریان‌های مختلف در سیستم واترژری گلخانه بر اساس ترکیب و شرایط فیزیکی و عملیاتی هر یک محاسبه گردیدند. در ادامه هزینه اگزورژی واحد (k^*) و هزینه اگزروگواکونومیک واحد (c) هر جریان محاسبه و ارائه شدند. نتایج محاسبات برای پایلوت نشان می‌دهد که کاهش تلفات اگزورژی در سیستم کودآبیاری بسته (ناشی از کاهش زهاب دور ریز به محیط‌زیست) موجب کاهش کل تخریب اگزورژی منابع آب و کود ورودی و در نهایت کاهش هزینه اگزروگواکونومیک واحد برای تولید هر گل رز شاخه‌بریده، شده است. مقاله حاضر با استفاده از روش ارائه شده، علت منطقی شدن فرآیند بازیابی زهاب خروجی از سیستم کشت هیدروپونیک گلخانه را از دیدگاه ترموآکونومیک بیان می‌کند، که به دلیل کاهش هزینه اگزروگواکونومیک واحد تولید هر شاخه گل رز، بر اثر کاهش تلفات سیستم در اثر بازچرخانی است. همچنین در این پژوهش با روش توسعه

T_0	دمای محیط مرجع
v_{H_2O}	حجم ویژه آب
P	فشار محیط
P_0	فشار محیط مرجع
y_i	مقدار درصد جریان ماده i در محلول
ΔG_{f_i}	مقدار انرژی آزاد گیبس ماده f
n_e	مقدار ماده e در محلول
b_{ch,n_e}	مقدار انرژی شیمیایی ماده e
R	ثابت گازها
a_i	ضریب اکتیویته جریان i در محلول
a_0	ضریب اکتیویته در شرایط مرجع
ψ	سرعت جریان
ψ_0	سرعت اولیه جریان
g	شتاب گرانش زمین
z_0	ارتفاع مرجع از سطح زمین
z	ارتفاع ماده در شرایط عملیات از سطح زمین
W_{Int}	مقدار آب فاضلاب تولیدی از فناوری τ در مسیر تبدیل جریان l به n که قابلیت بازیابی در زمان t را دارد.
β_{Intt}	ضریب بازیابی فاضلاب تولیدی در مسیر تبدیل جریان l به جریان n در فناوری τ و در زمان t
$M_{In\theta t}$	جریان ورودی از فناوری θ به فناوری τ در زمان t
F_{nlt}	جریان تولیدی n از جریان l در فناوری τ در زمان t
$E_{i out}^*$	هزینه انرژی خروجی
$E_{i in}$	مقدار انرژی ورودی
\dot{C}	هزینه انرژی گواکونومیک
k_i^*	هزینه واحد انرژی
c	هزینه انرژی گواکونومیک واحد
\dot{Z}	هزینه سرمایه گذاری
EEC_{in}	مقدار هزینه انرژی گواکونومیک گل رز تولیدی در حالت باز
EAC_{en}	هزینه جبران انرژی در سیستم تصفیه و حذف آلاینده
EEC_{out}	هزینه انرژی گواکونومیک گل رز تولیدی بدون ایجاد آلاینده

پیوست - ۱: هزینه سرمایه گذاری

هزینه‌های سرمایه‌گذاری فناوری‌های اصلی گلخانه و هزینه‌های در جدول (ب-۲-۱) ارائه شده است.

داده شده، با محاسبه مقادیر c (هزینه انرژی گواکونومیک واحد) و دست-یافتن به ابزاری برای ارائه تجمیع هزینه انباشت شده به مقیاس پولی شده برای جریان‌ها در سیستم کشت هیدروپونیک، هرم کیفیت آب ترسیم شده است. این شاخص معیاری برای دسته‌بندی و مقایسه جریان-ها ارائه داده است. همان‌طور که در هرم کیفیت نشان داده شده است، بر اساس این روش، آب تغذیه برای گیاه (W-4) بالاترین هزینه انرژی گواکونومیک واحد با مقدار $459/9 \text{ \$.Gj}^{-1}$ در سیکل بسته و $501/8 \text{ \$.Gj}^{-1}$ در سیکل باز را دارا است، و زهاب خروجی از سیستم (W-7) نیز کمترین هزینه انرژی گواکونومیک واحد (c) با مقدار صفر را دارد. بقیه جریان‌ها، به تناسب بین این مقادیر قرار گرفته‌اند. با توجه به تعاریف مربوط به ارزش و کیفیت، مفهوم هزینه انرژی گواکونومیک واحد با بیان هزینه انرژی انباشت‌یافته برای رسیدن به یک جریان، می‌تواند ابزار خوبی برای بیان سودمندی جریان‌های مختلف آب در یک سیستم در راستای رسیدن به هدف سیستم، جهت کمینه کردن هزینه‌ها باشد زیرا این پارامتر با نشان دادن هزینه‌های صرف شده برای ایجاد هر جریان، در نهایت نقش آن جریان در شکل‌گیری هزینه‌های یک سیستم را منعکس می‌کند. در کارهای آتی، در ادامه این تحقیق، تحلیل کاهش تلفات انرژی ناشی از بازچرخانی، برای دوره یک سال کامل، شامل فصول سرد و گرم و همچنین دوره ۷ ساله کامل کشت گل رز (از زمان کاشت بوته تا اتمام عمر مفید آن)، می‌تواند تحلیل و بررسی گردیده و با نتایج این تحقیق مقایسه شود. همچنین بررسی اثر کاهش تلفات انرژی ناشی از بازچرخانی روی کاهش تخریب انرژی داخلی سیستم علاوه بر کاهش هزینه انرژی گواکونومیک واحد تولید محصول، نیز در ادامه این تحقیق قابل انجام است.

سپاسگزاری

نویسندگان مقاله از جناب آقای کامران رنجبر کهن و برادران ایشان، مالکان مجموعه گلخانه نیکان واقع در استان البرز، بابت در اختیار قرار دادن داده‌های آب، انرژی و مواد مصرفی گلخانه، تشکر و قدردانی دارند. داده‌های تجربی این گلخانه امکان بررسی روش توسعه داده شده با عملکرد واقعی کشت گلخانه‌ای را امکان‌پذیر کرده است.

فهرست علائم

علامت	تعریف
ex	مقدار محتوی انرژی به واحد جرم
C_{P,H_2O}	مقدار ظرفیت گرمایی
T	مقدار دمای جریان

جدول (ب-۲-۱): هزینه سرمایه‌گذاری فناوری‌های اصلی مختلف در

گلخانه [۹ و ۲۴-۱۹] (*مترمربع از مساحت زمین گلخانه)

فناوری	بازدهی (%)	واحد متعارف	هزینه سرمایه‌گذاری
پد-فن	۷۵	\$/m ² *	۱۳
مه‌پاش (فوگر)	۵۰	\$/m ²	۴/۹
تصفیه اولیه	-	\$/m ³ per day	۱۷
تصفیه ثانویه	-	\$/m ³ per day	۲۸۹
تصفیه پیشرفته	-	\$/m ³ per day	۱۰۹
آب شیرین‌کن	۶۵	\$/m ³ per day	۲۶۰
سیستم آبیاری	-	\$/m ²	۶۷
بویلر	۸۵	\$/m ²	۱۳
سازه و متعلقات	-	\$/m ²	۳۰

پیوست-۲: معرفی تجهیزات گلخانه

در جدول زیر تجهیزات گلخانه معرفی شده است.

جدول پیوست-۲: معرفی تجهیزات گلخانه

حجم کنترل	فناوری	بازدهی	معرفی
	بویلر	۸۵٪	تجهیزی است که با استفاده از مصرف سوخت-های فسیلی و گرمای حاصل از احتراق، آب گرم تولید می‌کند. آب گرم با گردش درون لوله‌های تعبیه شده داخل گلخانه، گرمای مورد نیاز را تامین می‌کند.
	هیتر هوای گرم	۷۵٪	تجهیزی است که با استفاده از احتراق سوخت-های فسیلی، جریان هوای گرم مورد نیاز گلخانه را تولید می‌کند.
گرمایش	تولید همزمان برق و حرارت (CHP)	۴۰٪	تجهیزی با راندمان بالای انرژی است که برق تولید می‌کند و از حرارت جانبی تولید شده در فرآیند، به شکل‌های مختلف مانند تولید آب گرم، برای افزایش راندمان استفاده می‌کند.
	کلکتور خورشیدی	۵۵٪	مجموعه‌ای از لوله‌های تعبیه شده برای جذب گرمای حاصل از تابش خورشید است. گرمای جذب شده به وسیله مبدل به آب منتقل شده و آب گرم تولیدی برای تامین گرمایش گلخانه استفاده می‌شود.
سرمایش و رطوبت‌زنی	پد-فن	۷۵٪	تجهیزی شامل پد سلولزی و تعدادی فن اگزاست است. پد یکی از جدارهای سالن گلخانه را تشکیل داده و فن‌ها در جداره مقابل قرار می‌گیرند. آب پدهای گلخانه ریخته و با مکش ایجاد شده از طریق فن‌ها هوا از روی پد عبور کرده و به صورت تبخیری ایجاد سرمایش می‌کند.
	فوگر (Fogger)	۵۰٪	مجموعه‌ای از نازل‌ها در گلخانه است که با پاشش قطرات بسیار ریز (مه) آب با فشار بالا که پشت آن است، رطوبت مورد نیاز گلخانه و مطلوب برای رشد گیاه را ایجاد می‌کند. قطرات

حجم کنترل	فناوری	بازدهی	معرفی
			تولید شده آب، به روش تبخیری ایجاد سرمایش نیز می‌کند.
	مبدل هوا-زمین	-	این تجهیز که باتری اقلیمی نیز نام گذاری شده است، از طریق خورشید و همچنین دمای زمین، با گذر دادن هوا به تونل‌های زیر گلخانه، سرمایش و گرمایش برای گلخانه تامین می‌کند.
	سایه بان نور	-	پرده توری شکل است که برای کاهش دما و شدت نور خورشید در تابستان در گلخانه استفاده می‌شود.
سایه بان	پرده ذخیره انرژی	۴۰٪ کاهش مصرف انرژی	پرده ذخیره انرژی زمانی که هوای بیرون گلخانه سرد است، باز شده و موجب جلوگیری از تلفات حرارتی گلخانه و کاهش مصرف انرژی برای گرمایش می‌گردد.
	پنل خورشیدی (PV)	۱۷٪	تجهیزی است که تابش خورشید را به برق تبدیل می‌کند.
تولید برق	تولید همزمان برق و حرارت (CHP)	۴۰٪ الکتری سینه	در قسمت بالا توضیح داده شد.
	پمپ (Pump)	۹۰٪	تجهیزی که فشار جریان مایع (آب) را تامین می‌کند.
	فرتیلايزر (Fertili zer)		دستگاهی که کار تنظیم فرمولاسیون غذایی گیاه را از طریق اختلاط کودهای شیمیایی ماکرو و میکرو با آب جهت کودآبیاری گیاهان را دارد.
	سیستم آبیاری باز	-	مجموعه‌ای از لوله و پمپ، تانک‌ها و شیر است که آب و کود گلخانه را به گیاه عرضه کرده و تغذیه گیاه از طریق ریشه را تامین می‌کند.
آبیاری	سیستم آبیاری بسته (بازچرخا نی)	-	در سیستم آبیاری باز زهاب خروجی بعد از آبیاری گیاه از گلخانه به عنوان دورریز خارج می‌شود. در سیستم بسته، زهاب خروجی پس از تصفیه و تنظیم فرمولاسیون به چرخه برگردانده شده و موجب کاهش مصرف آب و کود می‌گردد.
تصفیه	تصفیه فاضلاب کوچک مقیاس	۹۸٪	فرایندی که در آن زهاب یا فاضلاب‌های تولیدی در گلخانه به کیفیت مورد نظر برای استفاده مجدد می‌رسد.
فاضلاب و ضدعفونی و گندزدایی آب	UV	-	فناوری که شامل تعدادی لامپ UV است که با تابش اشعه ماورای بنفش باعث ضدعفونی کردن جریان آب می‌شود.
	ضدعفونی کردن با ازن (Ozon)	-	فرایندی که ضدعفونی کردن با ازن (مولکولی با سه اکسیژن) انجام می‌گیرد.
آب شیرین-کن	RO	۶۵٪	فرایندی که طی آن با گذر آب شور از یک غشای متخلخل از یک سمت آب شیرین خارج می‌شود و از طرف دیگر شورابه بیرون می‌ریزد.

پیوست-۳: تعاریف و مفاهیم

در این قسمت برخی لغات و اصطلاحات به کار برده شده در متن مقاله تشریح و توضیح داده شده‌اند.

سیستم: مجموعه‌ای از اجزا یا تجهیزات که در کنار یکدیگر برای هدف مشترک قرار گرفته‌اند. اثر مجموع و ترکیب آنها بیشتر از جمع جبری تک تک اجزا یا اعضا است. به هم پیوستگی اجزا از طریق جریان مواد و انرژی در سیستم‌های فنی، یا جریان اطلاعات و تأثیر رفتارهای مختلف اعضا یا اجزا بر یکدیگر، در سیستم‌های اجتماعی به وجود می‌آیند.

حجم کنترل: بخش‌های اصلی سیستم توسط یک باکس در نمودار مرجع نمایش داده می‌شود. به این باکسها حجم کنترل گفته می‌شود. هر حجم کنترل می‌تواند بیانگر مجموعه‌ای از فناوری‌های جایگزین برای آن بخش باشد. جریان‌های ورودی و خروجی به فناوری‌ها با مفهوم سیستم باز در حجم کنترل تحلیل شده و در نمودار مرجع هر حجم کنترل با مجموعه‌ای از خطوط جریان به سایر حجم کنترل‌ها متصل می‌گردد.

مدل مفهومی (Conceptual Model): به مدل کیفی که مجموعه‌ای از اشکال و خطوط که اجزای سیستم و ارتباطات بین آنها را نمایش می‌دهد، مدل مفهومی گویند.

سیستم مرجع انرژی (Reference Energy System-RES): انرژی از منابع و از طریق سیستم‌های فرآورش و تبدیل و شبکه انتقال و توزیع جهت تحویل به مصرف‌کننده نهایی، جریان پیدا می‌کند. این جریان‌ها را به کمک مدل مفهومی که به صورت سیستماتیک در لایه‌های مختلف و با نمایش حجم کنترل‌ها، بخش‌های مختلف سیستم را ارائه می‌دهد، نمایش می‌دهند که نمودار مرجع انرژی نامیده می‌شود [۳۳].

واترژی (Watergy): رویکرد واترژی، بیانگر هم‌بست آب و انرژی برای بیان برهمکنش همزمان آب و انرژی جهت استفاده بهینه از منابع است.

سیستم مرجع واترژی (Reference Watergy System- WERS): سیستم مرجعی که که شکل جامع برهمکنش و هم‌پوشانی دو زیر سیستم آب و انرژی را همزمان دربرمیگیرد، سیستم مرجع واترژی نامیده می‌شود. انرژی (Exergy): کارمایه انرژی و بخشی از انرژی که قابل تبدیل به کار است را انرژی نامند.

هزینه انرژی (Exergy Cost): مجموعه هزینه انرژی‌های صرف شده برای تولید یک محصول که بیانگر انباشت انرژی برای تولید آن است را هزینه انرژی نامند.

هزینه انرژی واحد (Unit Exergy Cost): هزینه انرژی یک جریان تقسیم بر مقدار انرژی آن که به شاخصی بدون بعد تبدیل می‌گردد را هزینه انرژی واحد گویند.

ترمواکنومیک (Thermoeconomic): ترمواکنومیک در گسترده‌ترین معنای ممکن، علم صرفه‌جویی در منابع طبیعی است که فیزیک و اقتصاد را با استفاده از قانون دوم ترمودینامیک به هم متصل می‌کند.

کشت هیدروپونیک (Hydroponic Cultivation): کشت بدون خاک که در آن بذر یا نشاء، در یک بسترختی مانند کوکوپیت (پوسته‌های دورریز نارگیل)، پرلیت، پوکه معدنی یا ترکیبی از آنها، از طریق تغذیه با آب و عناصر غذایی ماکرو و میکرو، رشد می‌کند.

گلخانه (Greenhouse): محیط کنترل‌شده که شامل سازه، پوشش و مجموعه از تجهیزاتی برای رشد گیاه در یک محیط محافظت‌شده است. در گلخانه با مصرف بیشتر انرژی نسبت به کشت باز، در مقابل آب کمتر مصرف شده و مقدار محصول بیشتری در واحد سطح تولید می‌گردد.

مراجع

- [1] Panagopoulos, A., "Water-energy nexus: desalination technologies and renewable energy sources". Environmental Science and Pollution Research, Vol. 1, No. 14, 2021.
- [2] Dubreuil, A., Assoumou, E., Bouckaert, S., Selosse, S., Mai, N., "Water modeling in an energy optimization framework-The water-scarce middle east context". Applied energy, Vol. 101, pp. 268-279, 2013.
- [3] Pokhrel, P., Lin, S-L., Tsai, C-T., "Environmental and economic performance analysis of recycling waste printed circuit boards using life cycle assessment", Journal of Environmental Management, Vol. 276, pp. 111-276, 2020.
- [4] Valero, A., Magdalena, R., Calvo, G., Ascaso, S., Círez, F., Ortego, A., "Eco-credit system to incentivise the recycling of waste electric and electronic equipment based on a thermodynamic approach". International Journal of Exergy, Vol. 35, No. 1, pp 132-154, 2021.
- [5] Wang, S., Dai, Y., Ma, Z., Qi, H., Chen, Z., Shen, Y., et al, "Application of energy-saving hybrid distillation-pervaporation process for recycling organics from wastewater based on thermoeconomic and environmental analysis", Journal of Cleaner Production, Vol. 294, pp. 126-297, 2021.
- [6] Castro, MBG., Remmerswaal, JAM., Brezet, JC., Reuter, MA., "Exergy losses during recycling and the resource efficiency of product systems. Resour Conserv Recycl", Vol. 52, pp. 219-233, 2007.
- [7] Trubyanov, MM., Shablykin, DN., Mokhnachev, NA., Sergeeva, MS., Vorotyntsev, A V., Petukhov, AN., et al. "A hybrid batch distillation/membrane process for high purification part 1: Energy efficiency and separation performance study for light impurities removal". Separation and Purification Technology, Vol. 241, 2020.
- [8] Wang, C., Jin, H., Peng, P., Chen, J., "Thermodynamics and LCA analysis of biomass supercritical water gasification system using external recycle of liquid

exergy demand and economy in the recycling of multiple resources", Resources, Conservation and Recycling, Vol. 167, 2021.

- [25] Frangopoulos, C., "Exergy, energy system analysis, and optimization, Volume II", Encyclopedia of Life Support Systems, Vol. 2, 2009.
- [26] Tsatsaronis, G., Pisa, J., "Energy Systems - Application To the Cgam Problem", Energy, Vol. 19, No. 3, pp. 287-321, 1994.
- [27] Di Fraia, S., Macaluso, A., Massarotti, N., Vanoli, L., "Geothermal energy for wastewater and sludge treatment: An exergoeconomic analysis". Energy Conversion and Management, Vol. 224, pp. 113-180, 2020.
- [28] Chitsaz, A., Hosseinpour, J., Assadi, M., "Effect of recycling on the thermodynamic and thermoeconomic performances of SOFC based on trigeneration systems: A comparative study", Energy, Vol. 124, pp. 613-624, 2017.
- [29] Conrad, K., "A Theory of Production with Waste and Recycling". Discussion papers/Institut für Volkswirtschaftslehre und Statistik; Department of Economics, Universität Mannheim, Vol. 550, 1997.
- [30] Valero, A., Botero, E., Valero, A., "Global Exergy Accounting of Natural Resources". Exergy, Energy System Analysis, and Optimization, 1st ed.; Frangopoulos, CA, Ed, pp. 409-420, 2009.
- [31] Vox, G., Teitel, M., Pardossi, A., Minuto, A., Tinivella, F., Schettini, E., "Sustainable greenhouse systems". Sustainable agriculture: technology, planning and management. Nova Science Publishers, Inc., New York, NY, USA, pp. 1-79, 2010.
- [32] Mokhtari, M., Rostami, M., "Energy and exergy analysis of two configurations of organic rankine cycle in heat recovery of intenal combustion engine", Iranian journal of mechanical engineering (ISME), Vol.4, 2021 (in persian).
- [33] Saboohi, Y., "Energy Supply Model: ESM", Sharif Energy Research Institute (SERI), Technical Report, 2005.
- [9] Amini, SH., Remmerswaal, JAM., Castro, MB., Reuter, MA., "Quantifying the quality loss and resource efficiency of recycling by means of exergy analysis", Journal of Cleaner Production, Vol. 15, No. 10, pp. 907-913, 2007.
- [10] Seawright, KW., Young, ST., "A quality definition continuum", Interfaces (Providence), Vol. 26, No. 3, pp. 107-113, 1996.
- [11] Bartram, J., Balance, R., "Water Quality Monitoring - A Practical Guide to the Design and Implementation of Freshwater", Quality Studies and Monitoring Programmes, pp. 1-348, 1996. [https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S1553-4650\(13\)01241-7](https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S1553-4650(13)01241-7).
- [12] Ayers, RS., Westcot, DW., "Water Quality for Agriculture". FAO UNITED NATIONS, Rome, Italy, 1985.
- [13] Ye, F., Kameyama, S., "Long-term spatiotemporal changes of 15 water-quality parameters in Japan: An exploratory analysis of countrywide data during 1982–2016", Chemosphere, Vol. 242, pp. 125-245, 2020.
- [14] ER Rene, MS., "Prediction of water quality indices by regression analysis and artificial neural networks", Vol. 2, No. 2, pp. 547-550, 2008.
- [15] Carrasquer, B., Uche, J., Martínez-Gracia, A., "Exergy costs analysis of groundwater use and water transfers", Energy Conversion and Management, Vol. 110, pp. 419-427, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.12.022>.
- [16] Hosseinejad, A., Saboohi, Y., Shayegan, J., "WEMS-I: Watergy integrated modelling for optimal technology assessment in steel Industry- Case study: Esfahan Mobarakeh Steel Company (MSC)", Scientific of Energy Engineering & Management, Vol.10, Nu.1, P54-71, 2020 (in persian).
- [17] Stanek, W., Stanek Editor, W., "Thermodynamics for Sustainable Management of Natural Resources (Green Energy and Technology)", Springer; 2009.
- [18] Huang, LQ., Chen, GQ., Zhang, Y., Chen, B., Luan, SJ., "Exergy as a unified measure of water quality", Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, Vol. 12, No. 5, pp. 663-672, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2005.04.009>.
- [19] Martínez, A., Uche, J., "Chemical exergy assessment of organic matter in a water flow", Energy, Vol. 35, No. 1, pp. 77-84, 2010.
- [20] Dincer, I., Rosen, MA., "Exergy: energy, environment and sustainable development", Newnes, 2012.
- [21] Javaherdeh, K., Naghashadegan, M., Saadatmand, Sh., "Optimization and thermoeconomic analysis of solar lithium bromide-absorption chiller", 19th Annual Conference on Mechanical Engineering, 2011, (in persian).
- [22] Hanifi, K., Javaherdeh, K., Yari, M., "Exergy and exergoeconomic analysis and optimization of the cogeneration cycle under solar radiation dynamic model using genetic algorithm", Exergy for A Better Environment and Improved Sustainability I, Springer, pp. 1139–60, 2018.
- [23] Carrasquer, B., Uche, J., Martínez-Gracia, A., "Exergy costs analysis of groundwater use and water transfers". Energy Conversion and Management, Vol. 110, pp. 419-427, 2016.
- [24] Gai, L., Varbanov, PS., Van Fan, Y., Klemeš, JJ., Romanenko, SV., "Trade-offs between the recovery,

Extended Abstracted:

Introduction

Agriculture is the largest consumer of water in the world and employing non-conventional water resources using treatment and recycling is considered as the main resource in addressing future water scarcity. In a process by dissolving different materials at different costs in water, different solutions are made, each of which has its own application to achieve the goal of the system. Eventually, water flows out of the system as sewage after passing through various technologies. Recycling makes it possible to convert low quality water (wastewater) into high quality water (Fresh water).

As reviewed, LCA, ELCA, water flow exergy analysis, physical hydronic, and exergy cost analysis are among the methods used in previous research to express the recycling effect and reflect water quality. However, in order to achieve a comprehensive analysis of the recycling system, there are some shortcomings in the mentioned methods as following:

- Lack of reflection of flow quality in analysis (LCA defect)
- Lack of comprehensiveness of water quality indicators such as: BOD, TOC, TDS, etc. to compare all water flows in the system. Although these indicators indicate the differentiation of flows in terms of standards related to the dimensions of one of the mentioned criteria, they don't provide the possibility of comparing different flows considering the system goal (sustainable production), as well as classifying flows in different sectors (shortcoming of water environmental indicators).
- Impossibility of reflecting the cost consumed for the flow and therefore, the impossibility of providing differentiation of several water flows in different parts of the system (shortcoming of exergy analysis)
- Failure to consider the role of technology and the flow of capital expenditure for it (shortcoming of exergy cost analysis)
- Impossibility of monetizing methods to facilitate decision-making for use in policy-making

Previous researches have not studied exergy losses and exergy destruction in the analysis of fertigation recycling system, comprehensive exergoeconomic analysis on fertigation system, and have not compared results for both open and close systems (recycling system). Due to the shortcomings mentioned in previous works, the present study has employed the thermoeconomic method to integrate the cost of resource consumption with other economic cost items and finally, to express the distribution of exergoeconomic cost accumulation of flows in the system and monetize the results. Finally, for the first time, the distinction between different system water flows and their

classification based on exergoeconomic cost accumulation is presented in the form of a water quality pyramid.

Materials and methods

In this case study, using a hydroponic greenhouse system for rose cultivation, exergoeconomic cost was investigated in a recycling process by comparing three scenarios including open cycle, open cycle considering exergy abatement cost, and close cycle (nutrition water recycling).

the conceptual model of the case study is described. Then, after expressing the methodology including the equations of exergy analysis and thermoeconomic analysis, the production exergoeconomic cost from recycling in comprise of open, open cycle considering exergy abatement cost, and close hydroponic irrigation cycle, which is one of the innovations of the present research, is presented.

Next, the water quality pyramid for classification and differentiation of water flows in the greenhouse system, based on the unit exergoeconomic cost index is formed, which is one of the most important achievements of the present study.

Result

Results show that the exergoeconomic cost for producing 212,500 rose cut-flowers in a 6-months cold period, where heat was supplied by boiler for the above mentioned scenarios were about \$15760, \$16,525 and \$14,718, respectively. Also, the thermoeconomic indicator of the unit exercoeconomic costs were 74.2, 77.8 and 69.3 \$.Gj⁻¹, respectively. In the close cycle, drainage water recycling decreased total exergy losses by 4.02 Gj.y⁻¹, of which 1.24 Gj.y⁻¹ reduction was due to the reduced inlet water and 1.91 Gj.y⁻¹ for the inlet fertilizer reduction, while that increased by the system electricity consumption was 1.12 Gj.y⁻¹. Water quality pyramid presented based on the unit exergoeconomic cost indicated 459.9 Gj.y⁻¹ for the nutrition feed as the highest peak value and zero for the wastewater at the base of the pyramid.

Discussion

the results of present study show exergoeconomic cost of production in close cycle is lower than open cycle. In the other case in the last studies, it was noted that the exergoeconomic cost of generating electricity with close cycle is less than open state. At result indicator of decrease total exergoeconomic cost of production could to show rationality of chosen recycling process for system.

On following the value of c , according to the ratio of the cost spent to the amount of exergy of each flow, is an indicator that is not dependent on the mass of the flow and shows the differentiation of

water flows. As a result, based on the unit exergoeconomic cost index (c), the water flow quality pyramid in the greenhouse system is obtained as Fig. 1. The water quality pyramid based on index c is one of the achievements of the present study, which is presented for the first time for the greenhouse system. In the quality pyramid presented in Fig. 1, the classification of flows is presented based on the name of the flow generating technology along with the flow tag number in Fig. 1.

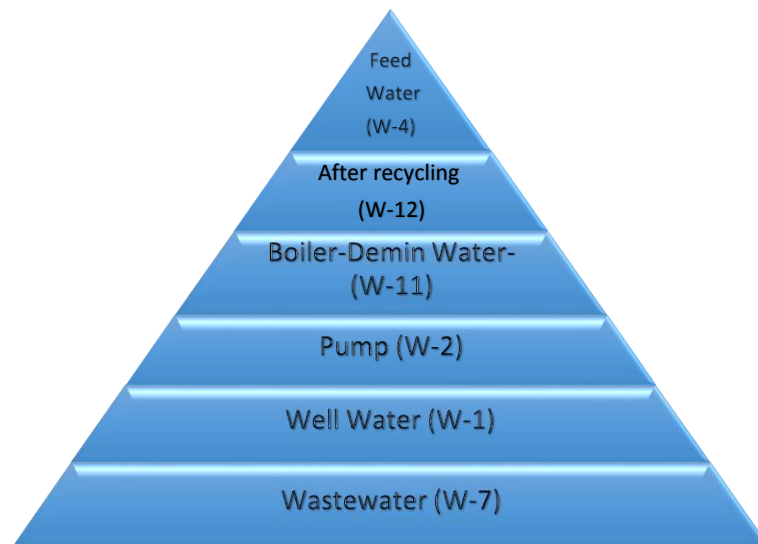


Fig. 1. Quality pyramid of water flows based on unit exergoeconomic cost

Conclusion

In the present study, exergoeconomic analysis of recycling system was performed for the case study of open and close fertigation system in the greenhouse for the first time. ΔExC in open and close cycles has been introduced as an indicator of selecting recycling technology from a thermoeconomic point of view. Using recycled flows is one of the most important solutions to reduce resource consumption.

The results of exergy and exergoeconomic analysis of open, open cycle considering exergy abatement cost, and close systems analysis of ΔExC showed that:

- The system's exergy losses are reduced with recycling. Recycling reduces the exergy destruction of some resources. Although the use of recycling technology is associated with exergy destruction, the positive sign of differentiate exergoeconomic cost of open and close systems has been presented as an indicator for the rationale for the use of recycling technology in the present study.
- Although water quality indicators such as pH, EC, etc. do not allow to differentiate between water in different parts of the system, the unit exergo-economic cost index, a criterion for classifying water flows in the system based on the exergoeconomic cost per exergy, is in line with the purpose of the

system. As a result, the water quality pyramid in the system can be formed to classify the flows based on the unit exergoeconomic cost.

Using exergoeconomic analysis of open and close cycles in the greenhouse system, rose production differentiate open and close exergoeconomic cost was calculated. The unit exergoeconomic cost of rose production in a close cycle was 69.3 \$/Gj (6.93 º/Cut flower), which is 4.9 \$/Gj (0.49 º/Cut flower) less than the open cycle scenario. As a result, differentiate of open and close exergoeconomic has a positive value and the use of wastewater recycling in the newly built Nikan rose greenhouse is thermoeconomically rational.

Finally, by calculating the unit exergoeconomic cost of flow for all water flows of different qualities, a water quality pyramid is formed that differentiates flows based on the accumulation cost spent to achieve the system goal. For the greenhouse pilot studied in the present study, feed water with exergoeconomic cost equal to 501.8 \$.Gj⁻¹ for open cycle and 459.9 \$.Gj⁻¹ for close cycle had the highest value and was at the top of the pyramid. Sewage with zero value had the lowest value and was at the bottom of the pyramid. The rest of the flows are ranked and listed between these two values. This achievement of the present study makes it possible to compare and evaluate flows in a system.

Keywords:

Recycling, thermoeconomic analysis, greenhouse hydroponic cultivation, water quality pyramid, unit exergoeconomic cost.