

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۲/۳۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۲/۴

## تحلیل ترمواکونومیک کاهش تلفات انرژی در گلخانه‌های با سیستم کشت هیدروپونیک از طریق فرایند بازچرخانی زهاب و تشکیل هرم کیفیت آب

احمد حسین نژاد<sup>۱</sup>، یدالله سبوحی<sup>۲\*</sup>، قاسم زارعی<sup>۳</sup>، جلال‌الدین شایگان<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی انرژی، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

hosseinnezhad@energy.sharif.ir

<sup>۲</sup> استاد دانشکده مهندسی انرژی، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

saboohi@sharif.edu

<sup>۳</sup> دانشیار مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران

gh.zarei@areeo.ac.ir

<sup>۴</sup> استاد 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. اگرچه بازچرخانی فاضلاب و زهاب از جنبه‌های مختلف در مقالات بررسی شده، اهمیت به‌کارگیری این فرایند و اثر آن بر سیستم کودآبیاری، با استفاده از تحلیل ترمواکونومیک انجام نشده است. در این مطالعه موردی، در یک گلخانه تولید گل رز، سه حالت سیستم کشت هیدروپونیک باز، سیستم کشت هیدروپونیک باز با در نظر گرفتن هزینه جبران انرژی، و سیستم کشت هیدروپونیک بسته (بازچرخانی مواد غذایی) با توجه به هزینه انرژی گلخانه‌های باز، هزینه تولید محصول مقایسه شدند. نتایج نشان داد که هزینه انرژی گلخانه‌های باز برای تولید ۲۱۲۵۰۰ گل رز شاخه بریده، طی یک دوره شش‌ماهه فصل سرد، با تأمین گرمایش توسط بویلر، در سه حالت مذکور به ترتیب برابر \$ ۱۵۷۶۰، \$ ۱۶۵۲۵، \$ ۱۴۷۱۸ بود. همچنین شاخص ترمواکونومیکی هزینه انرژی گلخانه‌های باز در این شرایط، به ترتیب برابر  $0.74 \text{ GJ}^{-1}$ ،  $0.77 \text{ GJ}^{-1}$ ،  $0.69 \text{ GJ}^{-1}$  محاسبه شدند. بازچرخانی زهاب در سیستم بسته، تلفات انرژی کل سیستم را به مقدار  $4.02 \text{ GJ.y}^{-1}$  کاهش داد که  $1.24 \text{ GJ.y}^{-1}$  آن مربوط به کاهش آب ورودی و  $1.91 \text{ GJ.y}^{-1}$  آن مربوط به کاهش کود بود، در حالی که  $1.12 \text{ GJ.y}^{-1}$  افزایش هم به‌واسطه مصرف الکتریسیته در بازچرخانی سیستم بسته مشاهده شد. در هرم کیفیت آب ارائه‌شده با استفاده از شاخص ترمواکونومیکی هزینه انرژی گلخانه‌های باز، آب تغذیه با  $459/9 \text{ GJ}^{-1}$  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 گلخانه‌های باز، واحد.

## ۱. مقدمه

با پیشرفت فناوری‌های مرتبط با صنعت آب، تصفیه و بازچرخانی منابع آب غیرمتعارف به‌عنوان اصلی‌ترین جایگزین برای تأمین تقاضای آب تازه در آینده مطرح شده است [۱ و 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، به‌عنوان منبع مهمی از مواد اولیه می‌تواند باشد [۳ و ۴]. در سیستم کشت هیدروپونیک گلخانه‌ای نیز، فرایند تصفیه و بازچرخانی<sup>۱</sup> زهاب تولیدی در گلخانه (که دارای انواع عناصر غذایی محلول است)، راه‌حلی برای کاهش مصرف منابع و شکل‌دهی سیستم پایدار تولید در گلخانه‌هاست.

در یک فرایند 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، به‌صورت فاضلاب از سیستم خارج می‌شوند. بازچرخانی امکان تبدیل فاضلاب با کیفیت پایین به آب با کیفیت مطلوب را ایجاد می‌کند [۵]. زهاب خروجی بستر کشت نیز حاوی طیف گسترده‌ای از مواد مختلف است که آلاینده<sup>۲</sup> محیط‌زیست محسوب می‌شوند [۶]. با استفاده از فناوری‌های تصفیه<sup>۳</sup> مختلف در بازچرخانی، مواد حل‌شده در آب نیز قابلیت جداسازی را دارند ولی جداسازی کامل مواد حل‌شده با کیفیت مطلوب، با مصرف انرژی و هزینه بالا همراه است [۷]. در این بین، سؤال اساسی این است که با وجود به‌کارگیری فناوری‌های تصفیه و صرف هزینه در بازچرخانی، منطقی شدن به‌کارگیری این فرایند 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، به‌شکل‌های مختلف انجام شده‌اند. تحلیل چرخه عمر (LCA<sup>۴</sup>) 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 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 و ۹]. به‌واسطه<sup>۵</sup> 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 جریان‌هاست. 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.<sup>۳</sup> آیرس و همکاران [۱۲] در کتاب کیفیت آب برای کشاورزی<sup>۴</sup> اشاره کرده‌اند که به کمیت آب بیشتر توجه می‌شود، درحالی‌که 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 COD، BOD، TOC و... به‌صورت مرسوم برای بیان کیفیت آب و فاضلاب استفاده می‌شوند [۱۳ و ۱۴]. هر یک از این شاخص‌ها، یکی از پارامترهای مربوط به محتوا و کیفیت آب یا فاضلاب را بیان می‌کند. از این رو برای انعکاس کامل‌تر این موضوع، از مفهوم انرژی در بیان کیفیت آب در کارهای مختلف استفاده می‌شود.

کاسترو و همکاران برای تحلیل جامع‌تر چرخه عمر با در نظر گرفتن کیفیت، از تحلیل چرخه عمر انرژی (ELCA<sup>۵</sup>) بهره برده‌اند [۶]. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان می‌دهد که بازده منابع (RI<sup>۶</sup>) زمانی که آلومینیوم خالص (کیفیت بالا) استفاده می‌شود، پایین بوده 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 تأمین آب اشاره کرده‌اند. به این مسئله<sup>۷</sup> 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 انرژی در ارزیابی اکولوژی، حسابداری منابع و ارزیابی زیست‌محیطی استفاده شده است [۱۷ و ۱۸]. مارتینز و همکاران [۱۹] به موضوع محاسبه انرژی جریان آب پرداخته و کیفیت آب را با روش هیدرونومیک

3. Water Changes  
4. Water Quality for Agriculture  
5. Exergy Life Cycle Assessment  
6. Resource Input Ratio  
7. Energy for Water

1. Recycling  
2. Life Cycle Assessment

به ارزش جریان‌های انرژی در تحلیل آگرگواکونومیک در نیروگاه و هزینه آگرگواکونومیک تولید برق بهره بردند. در این تحقیق از شاخص هزینه آگرگواکونومیک برای تبیین شدت هزینه آگرژی مصرفی تبدیل شده به واحد پولی و مقایسه وضعیت جریان‌ها استفاده شده است. فرایا و همکاران [۲۷] نیز با استفاده از تحلیل آگرگواکونومیک، بهینه‌سازی سیستم تأمین انرژی تصفیه لجن فاضلاب و تولید برق با استفاده از زمین گرمایی<sup>۴</sup> را برای کشور ایسلند انجام دادند. چیت‌ساز و همکاران [۲۸] با روش هزینه آگرگواکونومیک و مقایسه بازچرخانی گاز آند و کاتد در فرایند SOFC<sup>۵</sup> و کاهش هزینه آگرگواکونومیک برق تولیدی را نسبت 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 برای تأمین آب، تحلیل کیفی آب با روش‌های مختلف از جمله آگرژی، و همچنین تحلیل جریان با هزینه آگرژی جریان‌های آب بهره برده‌اند. همچنین برای پولی‌سازی هزینه صرف شده برای جریان‌های انرژی، به‌منظور تصمیم‌سازی بهتر و بهینه‌سازی سیستم، روش هزینه آگرگواکونومیک 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 ترمواکونومیک، بررسی کیفیت آب یا بیان تمایز جریان‌های مختلف موضوع مهمی است که باید به آن پرداخته شود. برای بررسی کیفیت نیز شاخص‌های زیست‌محیطی متداول مانند PH، EC، COD و... نیز به‌تنهایی برای ارائه شرایط جامع جریان و امکان تمایز همه جریان‌ها، در سیستم کارایی لازم را ندارند. آگرژی هرچند پارامترهای مختلف کیفیت را منعکس می‌کند، با توجه به هدف سیستم، امکان بررسی جریان‌ها از انواع مختلف را ارائه نمی‌دهد.

از طرفی تحلیل آگرگواکونومیک، به‌صورت جامع برای بررسی اثر بازچرخانی زهاب در گلخانه و پارامترهای مؤثر در منطقی شدن کاربرد آن در کارهای پیشین، ارائه نشده 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 فرایند با روش هزینه آگرگواکونومیک ارائه شده است.

فیزیکی<sup>۱</sup> محاسبه کرده‌اند. هیوانگ و همکاران نیز برای بررسی کیفیت آب رودخانه، از این مفهوم بهره برده‌اند [۱۸]. شاخص‌های کیفیت آب بر مبنای آگرژی، هرچند امکان بررسی یک جریان در نقاط مختلف آن جریان را نشان می‌دهد، مقایسه چند جریان از لحاظ کیفی در یک سیستم را ارائه نمی‌کند. هر سیستم به‌دنبال هدف مختص خود است. کیفیت بالای جریان به‌تنهایی 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 آگرژی جریان‌ها به کار گرفته شده است. از ترمواکونومیک به‌عنوان علم صیانت از منابع نام برده‌اند [۲۰]. محققان مختلف از تحلیل ترمواکونومیک، برای بهینه‌سازی سیستم‌های مختلف انرژی بهره برده و نتایج حاصل از استفاده از این روش را ارائه کرده‌اند [۲۱ و ۲۲]. کاراسکوئر و همکاران بر اساس کارهای انجام‌شده پیشین به توضیح هزینه آگرژی منابع آب پرداخته و کیفیت آب را با استفاده از این روش تحلیل کردند؛ آن‌ها به‌صرف هزینه آگرژی در فناوری‌های مختلف برای برگرداندن جریان مصرف شده به حالت اول اشاره کردند. آن‌ها هزینه آگرژی را معادل مقدار منبع استفاده شده برای تولید محصول بیان کردند و در نتیجه‌گیری تحقیق خود بیان داشتند که روش توسعه داده‌شده توسط آن‌ها، باعث کاهش تخریب آگرژی و در نتیجه سبب کاهش هزینه‌های مالی<sup>۲</sup> می‌شود [۲۳]. پولی‌سازی کردن کیفیت جریان‌ها موجب تسهیل در تصمیم‌سازی برای انتخاب فرایندها می‌شود. علاوه بر صرفه‌جویی مصرف منابع، نقش فناوری و هزینه‌های سرمایه‌گذاری، عملیاتی و نگهداری آن در اقتصاد بازچرخانی و انتخاب آن مؤثر است [۲۲]. لیمیگای و همکاران [۲۴] به بررسی بازچرخانی از لحاظ رقابت هزینه‌های اقتصادی در کنار مصرف آگرژی با معرفی شاخص TCI<sup>۳</sup> پرداختند و نقطه بهینه درصد بازچرخانی بر این اساس را ارائه کردند. در کنار محاسبه هزینه آگرژی و هزینه آگرژی واحد، آگرگواکونومیک برای تخصیص مقادیر عددی به واحد یکسان پولی برای انعکاس مقادیر کیفی جریان‌ها استفاده شده است [۲۵]. ساتسارونیس و همکاران [۲۶] از این امکان برای انعکاس هزینه سرمایه و کمی‌سازی مربوط

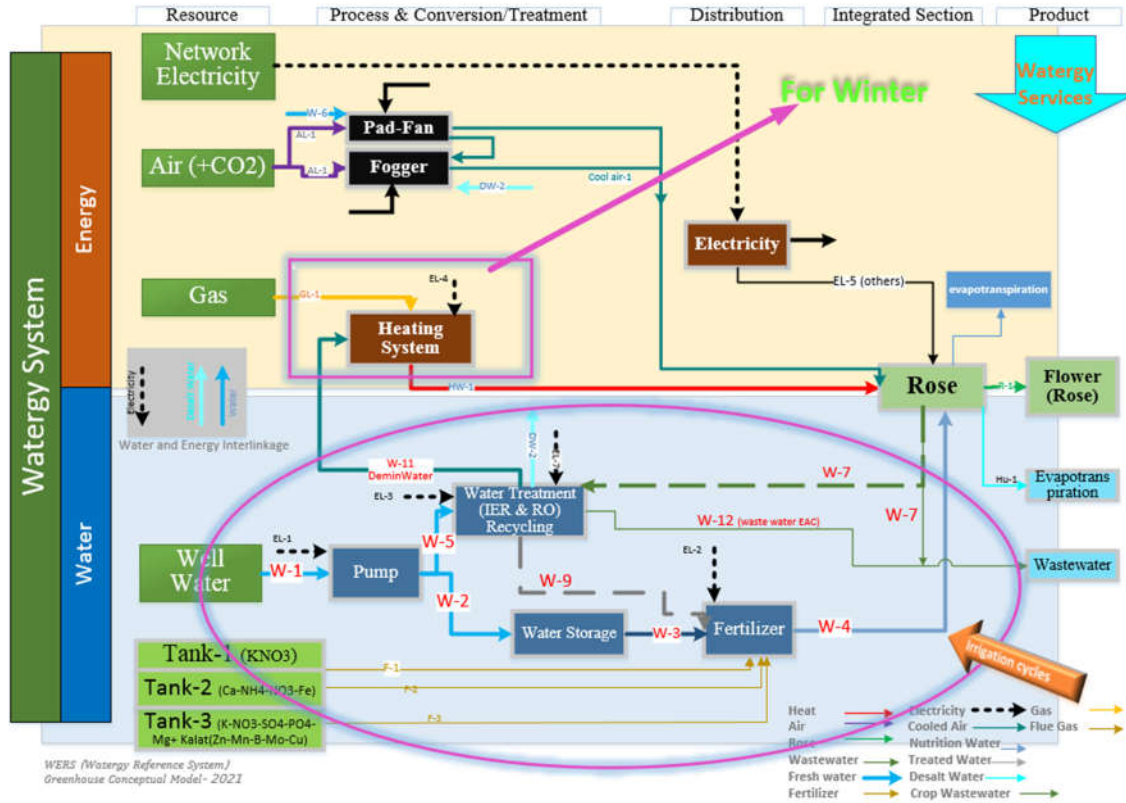
4. Geothermal  
5. Solid Oxide Fuel Cell

1. Physical Hydronomics  
2. Monetary  
3. Total Circularity Index

## ۲. روش پژوهش

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، به‌عنوان نمونه موردی برای تحلیل با روش هزینه‌آگزرگواکونومیک مورد نظر است.

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



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

شامل زیرسیستم‌های آب و انرژی است. این نمودار برای بخش کودآبیاری، به‌صورت جامع هر دو حالت سبک کودآبیاری باز و بسته را در بر گرفته است. در نمودار مرجع انرژی گلخانه در زیرسیستم انرژی، منابع انرژی (گاز، برق شبکه)، سیستم گرمایش در فصل سرد (که در گلخانه پایلوت سیستم بویلر است) و سیستم تأمین‌کننده برق، در لایه‌های مختلف قرار گرفته‌اند. در زیرسیستم آب فناوری‌های مربوط به تأمین، 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)، فرتیلازر<sup>۱</sup> (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 شده است. جریان (W-9) نیز زهاب تصفیه‌شده برای استفاده مجدد در

## ۱.۲. تبیین مدل مفهومی

در گام اولیه برای تحلیل جامع‌تر و برای در نظر گرفتن چرخه عمر تولید گل رز، نمودار مرجع انرژی<sup>۱</sup> (نمودار مرجع مبتنی بر هم‌بست آب-انرژی) برای پایلوت گلخانه با تمرکز بر بخش کودآبیاری و برای یک دوره کشت شش‌ماهه مربوط به فصل سرد (که در گلخانه فناوری گرمایشی بویلر برای تأمین گرمایش در این دوره استفاده می‌گردد)، به‌صورت شکل (۱) ترسیم شده 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 درباره سیستم مرجع انرژی و نحوه ترسیم زیرسیستم‌های انرژی و آب، به مرجع [۱۶] که برای صنعت فولاد تهیه شده است، مراجعه شود).

شکل (۱) نشانگر نمودار کامل سیستم مرجع انرژی گلخانه،

سیستم است. در شکل (۱) جریان (W-5) و (W-11) مقادیر محاسبه شده است. جریان ورودی و خروجی از سیستم تبادل یونی برای تولید جریان آب با کیفیت مناسب برای ورود به بویلر است.

## ۲.۲. معادلات ریاضی و محاسبات

بررسی اثرات بازچرخانی، نیازمند کمی سازی مقادیر و استفاده از معادلات ریاضی برای تحلیل جامع شرایط سیستم در دو حالت سیستم باز و بسته است. در نتیجه پس از نظر گرفتن مقادیر کمی جریانها و محتوای آنها، محاسبه انرژی، هزینه انرژی و هزینه انرژی اگزروگائونومیک جریانها لازم هستند. در ادامه، معادلات مربوط به هر یک در بخشهای مختلف ارائه شده اند.

### 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 انرژی (Open-EAC) مقادیر مختلف جریانها مشخص هستند و از دادههای نمونه مورد بررسی، این مقادیر تعیین شده اند. برای حالت سوم که سیستم بسته کودآبیاری است (Close)، با توجه به وجود جریان بازچرخانی شده در سیستم، بر اساس روابطی که کنران [۲۹] ارائه کرده است، مقادیر جریان بازچرخانی بر اساس رابطه های (۱) و (۲) محاسبه می شوند.

$$WW_{rntt} = \beta_{rntt} \times M_{n0tt} \quad (1)$$

$$F_{ntt} = (1 - \beta_{rntt}) \times M_{n0tt} \quad (2)$$

که  $WW_{rntt}$  مقدار زهاب تولیدی برای یک دوره کشت است که قابلیت بازچرخانی دارد و  $F_{ntt}$  مقدار جریان اصلی خروجی سیستم  $M_{n0tt}$  جریان ورودی به بستر کشت در حجم کنترل یکپارچه سازی برای تولید رز هستند.

### ۲.۲.۲. انرژی اگزروژی، هزینه انرژی و هزینه اگزروگائونومیک جریانها

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

انرژی مکانیکی  $b_{mech}$

$$ex \left( \frac{kg}{kg} \right) = C_{p,H_2O} \left[ T - T_0 - T_0 \ln \left( \frac{T}{T_0} \right) \right] + \left[ \sum_i b_i n_e b_{ch,n_e} \right]_p + RT_0 \sum_i x_i \ln \frac{a_i}{a_0} + \frac{1}{2} \left( \frac{\psi^2 - \psi_0^2}{1000} \right) + g(z - z_0)$$

انرژی اگزروژی واحد  $ex$       انرژی حرارتی  $b_i$       انرژی پتانسیل  $b_p$       انرژی جنبشی  $b_k$       انرژی اختلاط  $b_{ch,c}$

در رابطه فوق،  $ex$  مقدار کل محتوی انرژی اگزروژی واحد است که به ترتیب بر اساس 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،  $y_i$  مقدار درصد جریان ماده  $i$  در محلول،  $\Delta G_{f_i}$  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،  $\psi$  مقدار سرعت جریان شرایط عملیات،  $\psi_0$  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 اگزروژی، نیاز است که هزینه انرژی اگزروژی جریانها به دست آید. رابطه های (۴) و (۵) نحوه محاسبه هزینه انرژی اگزروژی و هزینه انرژی اگزروژی واحد را نشان می دهند.

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

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

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

تولیدی در حالت سیکل باز،  $EAC_{en}$  مقدار هزینه جریان انرژی برای مصرف در سیستم تصفیه و حذف آلاینده و  $EEC_{out}$  هزینه انرژی گلگوانومیک رز تولیدی بدون ایجاد آلاینده‌گی در حالت سیکل باز با هزینه جریان انرژی هستند.  $\dot{Z}$  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 کنترل‌شده‌ای است که به وسیله فناوری‌های مختلف، شرایط رشد مطلوب با بهره‌وری بالا را برای تولید محصول امکان‌پذیر می‌کند. 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 فرایند کودآبیاری، کیفیت‌های مختلف آب جریان دارند. دستگاهی به نام فریتیلایزر برای کودآبیاری در سیستم کشت هیدروپونیک گلخانه‌ها استفاده می‌شود. پس از کودآبیاری کشت‌های هیدروپونیک، حدود ۲۵ تا ۳۰ درصد از جریان ورودی به صورت 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 کشت هیدروپونیک در گلخانه، می‌توان بخشی از آب به‌همراه 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 برای جایگزینی با سیستم باز، در صورت منطقی بودن به‌کارگیری آن، برای کاهش در مصرف نهاده‌های تولید (به‌ویژه آب و کود) هستند.

آن‌ها، از معیار هزینه انرژی گلگوانومیک 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 سرمایه‌بخش‌های گلخانه که  $\dot{Z}$  بر اساس آن‌ها حاصل می‌گردد، ارائه شده است. محاسبات برای جریان‌های مختلف آب در سیستم گلخانه بر اساس سیستم مرجع واترژنی 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، نه به این دلیل که در سیستم باز نمی‌توان از آن استفاده 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 به‌عنوان آلاینده زیست‌محیطی بررسی می‌شود، هزینه انرژی گلگوانومیک آن برابر صفر در نظر گرفته شده است. در نتیجه برای اینکه زهاب خروجی برای محیط آسیب‌رسان نباشد، در سناریوی دوم، محاسبه هزینه جریان انرژی  $EEC_{in}$ ، برای فرایند در نظر گرفته شده است [۳۰]. در این سناریو، مقداری هزینه انرژی گلگوانومیک نیز به سیستم تحمیل می‌شود که در نهایت برای تولید رز برای سناریوی دوم لحاظ می‌گردد. در نتیجه در تحلیل سناریوی دوم (Open  $EEC_{in}$ )، می‌توان هزینه انرژی گلگوانومیک تولید هر واحد گل رز شاخه‌بریده را مجموع هزینه انرژی گلگوانومیک رز به‌همراه هزینه حذف آلاینده‌گی زهاب به‌صورت مجموع و با هم دید. رابطه (۸) هزینه انرژی گلگوانومیک تولید رز  $EEC_{out}$  در کنار نشان دادن اثر هزینه جریان انرژی تولید بدون آلاینده‌گی  $EEC_{en}$  از تصفیه زهاب  $EEC_{in}$  را با هزینه سرمایه  $\dot{Z}$  نشان می‌دهد. زهاب خروجی برای حذف آلاینده‌گی زیست‌محیطی، قبل از آزادسازی در محیط، نیاز به تصفیه دارد.

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

در معادله (۸)،  $EEC_{in}$  مقدار هزینه انرژی گلگوانومیک رز

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

مشخصات	واحد	مقدار
--------	------	-------

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 یکسان‌اند، به بخش هزینه لایه یکپارچه‌سازی تولید گل رز<sup>۱</sup> 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 تراکم‌ناپذیر<sup>۲</sup> در نظر گرفته شده است؛ در نتیجه نسبت ضریب اکتیویته در شرایط جریان به ضریب اکتیویته در 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 آگرگواکونومیک تولید هر شاخه گل رز شاخه‌بریده برای سه سناریوی سیستم آبیاری باز (Open)، آبیاری باز با حذف آلاینده‌گی و در نظر گرفتن هزینه جبران آگرزژی (Open EAC)، و سیستم آبیاری بسته (Close) انجام گرفت. بر اساس محاسبات، نتایج و مقادیر هزینه آگرگواکونومیک جریان‌های مختلف برای تولید رز در جدول (۲) ارائه شده‌اند.

طول، عرض، ارتفاع	m	۷/۱، ۴۰، ۱۲۵
مساحت کف گلخانه	m <sup>2</sup>	۵۰۰۰
مساحت سطح پوشش گلخانه	m <sup>2</sup>	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 <sup>2</sup>	۱۶۰
سیستم گرمایش	-	بویلر
سیستم رطوبت زنی و سرمایش	-	مه‌پاش (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 برای مقایسه اثر بازچرخانی زهاب

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

- تولید گل رز در سیکل کودآبیاری باز با در نظر گرفتن خروج کل زهاب تولیدی کشت هیدروپونیک به بیرون از گلخانه و تخلیه به محیط‌زیست (Open Fertigation System-Open).
- بررسی تولید گل رز برای سیکل کودآبیاری باز با در نظر گرفتن اثرات هزینه زیست‌محیطی و به‌کارگیری فرایند تصفیه زهاب پیش از دورریز به محیط‌زیست با اضافه کردن هزینه جبران آگرزژی (Exergy Abatement Cost-Open EAC).
- 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 می‌شود. 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

1. Integrated Layer  
2. Incompressible Water

جدول (۲): شاخص‌های مختلف ترموکونومیکی و شیمیایی جریان‌های آب در سیستم کودآبیاری باز، با هزینه جریان انرژی و بسته

شاخص‌های کیفیت آب		سیستم بسته کودآبیاری			سیستم باز با در نظر گرفتن هزینه جریان انرژی			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) <sup>3</sup>	Quality Pyramid	c (\$/Gj) <sub>2</sub>	k* (Gj/Gj) <sub>1</sub>		
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 پمپ‌شده
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 فریتلایزر)
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 انرژی واحد

۲. هزینه انرژی ترموکونومیک واحد

۳. هزینه انرژی واحد



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 هزینه‌ی آگزرژی واحد بالاتر بوده و مقدار هزینه‌ی آگزرگواکونومیک آن پس از جریان آب تغذیه قرار گرفته است. این جریان تصفیه‌شده با ارزش بالا، در سناریوی دوم بدون ایجاد آلاینده‌ی به محیط‌زیست وارد می‌شود. در سومین گام، برای جریان‌های مختلف در سیستم کودآبیاری بسته، تحلیل هزینه‌ی آگزرگواکونومیک انجام گرفته و مقادیر برای جریان‌های مختلف ارائه شده‌اند. همان‌طور که در جدول (۲) نشان داده شده، مقدار C زهاب تصفیه‌شده در سناریوی سوم نیز، با مقدار پایین‌تر از آب تغذیه، از لحاظ این شاخص ترمواکونومیک تشخیص داده شده است.

در این جدول، جریان‌های مختلف در سیستم کودآبیاری هیدروپونیک در سه سناریو، به‌همراه مقادیر شاخص‌های ترمواکونومیک شامل هزینه‌ی آگزرژی و هزینه‌ی آگزرگواکونومیک واحد برای این جریان‌های آب ارائه شده‌اند. برای مقایسه‌ی مقادیر شاخص ترمواکونومیک (هزینه‌ی آگزرگواکونومیک 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 کودآبیاری هستند، ارائه شده‌اند. همان‌طور که در این جدول دیده می‌شود، برای جریان‌های مختلف شاخص‌های متداول کیفیت آب مانند EC و PH که به‌ترتیب بیانگر نمک‌های محلول در آب (شوری آب) و اسیدیته‌ی آب هستند، مقادیر تقریباً یکسانی دارند؛ درحالی‌که شاخص ترمواکونومیک هزینه‌ی آگزرگواکونومیک واحد (C) آب برای جریان‌های مختلف، مقادیر مختلفی به خود گرفته است. هزینه‌ی آگزرگواکونومیک واحد هر



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

سهم هزینه‌ی سرمایه در سیستم بازیابی زهاب بیشتر شده است، کاهش تخریب آگزرژی در مجموع سبب گردیده که هزینه‌ی آگزرژی صرف‌شده 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؛ درحالی‌که در سیکل بسته، جریان کمتری از این فناوری‌ها (به‌دلیل برگشت جریان زهاب تصفیه‌شده به چرخه) استفاده شده است. در نتیجه هزینه‌ی سرمایه یکسان ولی آگزرژی خروجی کمتر یا همان استفاده‌ی کمتر از فناوری سبب این اتفاق شده است.

پس از ارائه‌ی جدول شاخص‌های مختلف ترمواکونومیک و کیفی جریان‌های آب برای سه سناریو در شرایط مختلف، در شکل (۲) مقایسه‌ی هزینه‌ی آگزرگواکونومیک 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 فرتیلایزر) در هر دو حالت باز و بسته دارای بیشترین مقدار نسبت به جریان‌های دیگر است. همان‌طور که در این نمودار مشخص شده است، به‌دلیل بازیابی زهاب در سیستم بسته، مقدار C برای این حالت برای جریان W-4 (آب تغذیه) با مقدار  $459.9 \text{ } \$\cdot\text{Gj}^{-1}$  کمتر از حالت باز با مقدار  $501.8 \text{ } \$\cdot\text{Gj}^{-1}$  شده است. هرچند که

## ۵. بحث و بررسی

مقادیر هزینه انرژی واحد و هزینه انرژی واحد برای جریان‌های مختلف در سه حالت، در جدول (۲) ارائه شده‌اند. کاسترو و امینی [۶ و ۹] در کارهای قبل، با LCA به تحلیل بخش‌های مختلف تولید با بازچرخانی و هزینه‌های آن پرداخته‌اند ولی در تحقیق حاضر از تحلیل هزینه انرژی واحد برای بازچرخانی و هزینه‌های آن پرداخته‌اند. بررسی هزینه انرژی واحد برای تولید رز در هر یک از سه حالت، نشان‌دهنده مسیر طی شده همراه با مقدار تخریب انرژی آن مسیر برای تولید گل رز است.

بر اساس 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 را در کنار یکدیگر به نمایش گذاشته است.

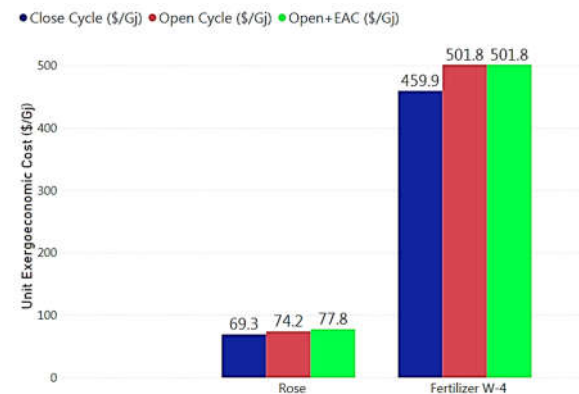
جدول (۳): مقایسه مقادیر هزینه انرژی واحد و هزینه انرژی واحد

واحد برای تولید رز در حالت‌های مختلف

نام جریان	$k^* (Gj/Gj^{-1})^{-1}$	$c (\$/Gj^{-1})^{-2}$	$\hat{C}/Flower^3 (\$/Cut\ flower)$
سیستم باز (Open)	۵۰/۷۸	۷۴/۲	۰/۰۷۴
سیستم باز به همراه هزینه جبران انرژی (Open-EAC)	۵۰/۷۹	۷۷/۸	۰/۰۷۷
سیستم بسته (Close)	۵۰/۷۶	۶۹/۳	۰/۰۷

سیستم بسته کمترین c و سیستم باز با در نظر گرفتن هزینه حذف آلاینده‌ها برای کاهش جرایم زیست‌محیطی و نیز هزینه جبران انرژی، 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.  $k^*$  هرچند که اثر مصرف بیشتر انرژی سیستم در هر حالت را منعکس کرده است، اثر به‌کارگیری فناوری‌ها و هزینه سرمایه آن در سه حالت را نشان نمی‌دهد. هزینه انرژی واحد برای بازچرخانی با انعکاس هزینه سرمایه‌گذاری تجهیزات به صورت 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 وجود دارد، برگشت جریان موجب کاهش مقدار c برای آب تغذیه (متشکل از آب و کودهای تازه و زهاب بازیابی شده) است؛ از این رو تمایز حالات مشخص‌ترند. در شکل (۴) دو سیستم باز و بسته به همراه نمایش طرح‌واره انرژی ورودی و خروجی دو سیستم و تلفات هر دو سیستم نشان داده شده‌اند.

برای تولید محصول مشابه در دو حالت، کل انرژی مربوط به آب، برق و کود ورودی به سیستم در سیکل باز ۷۶/۲ Gj و در سیکل بسته ۷۳/۹ Gj است؛ این در حالی است که در سیکل بسته ۴/۰۲ Gj در دوره کشت، زهاب دارای کود، تصفیه و بازیابی شده است. در نهایت ۱/۲۴ Gj کاهش انرژی مقدار آب ورودی به سیستم، ناشی از این کاهش تلفات با بازچرخانی است که افزایش ۱/۱۲ Gj مصرف انرژی برق را به همراه دارد. هرچند مصرف انرژی بیشتر برای برق در سیستم بسته رخ داده، همراه با کاهش تخریب منابع ورودی به سیستم بوده است. بازچرخانی در نهایت باعث شده است که هزینه انرژی واحد برای تولید محصول، کمتر گردد که بیانگر دلیل منطقی بودن به‌کارگیری فرایند بازچرخانی زهاب خروجی از دیدگاه ترمواکونومیک است. در تحقیق چیت‌ساز و همکاران [۲۸] نیز که گازهای خروجی از آنند و کاتد مربوط به فناوری SOFC<sup>۴</sup> بازچرخانی شده، اشاره گردیده است که هزینه انرژی واحد برای تولید برق در فرایند با سیکل

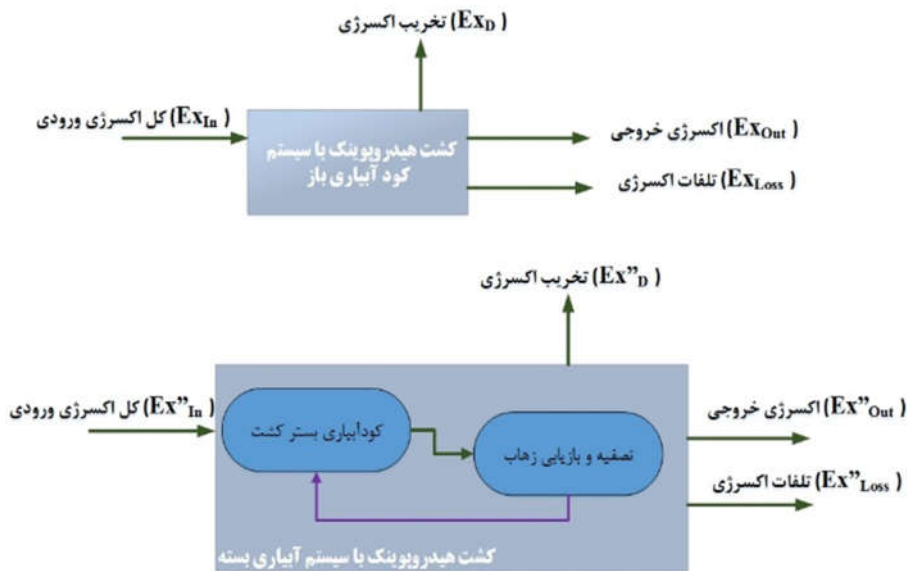


شکل (۳): مقایسه مقادیر c برای جریان‌های آب تغذیه و گل رز تولیدی در سه حالت مختلف

۱. هزینه انرژی واحد.
۲. هزینه انرژی واحد برای بازچرخانی.
۳. هزینه انرژی واحد برای هر شاخه گل رز (این شاخص برای نمایش ملموس‌تر هزینه انرژی واحد ترمواکونومیک صرف شده برای محصول ارائه شده است).

تمایز به شکل هرم کیفیت برای جریان‌های آب داخل گلخانه بر اساس شاخص ترمواکونومیک، برای اولین بار انجام و ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، جریان‌های مختلف سیستم به این وسیله از نظر هزینه‌ی آگرگواکونومیک که برای رسیدن به هدف سیستم برای آن‌ها صرف شده است، دسته‌بندی و متمایز شده‌اند.

بسته کمتر از حالت باز است. به‌شکلی دیگر، مختاری و رستمی [۳۲] نیز در نتیجه‌ی تحقیق خود بیان کرده‌اند که بازیابی حرارتی از گرمای اتلافی موتور احتراق داخلی نسبت به حالت ساده موجب افزایش بازده آگرژی شده است. در کنار نتیجه‌ی فوق با قرار دادن مقادیر هزینه‌ی آگرگواکونومیک واحد جریان‌های آب در کنار هم (مانند جدول ۲)، و مقایسه‌ی آن‌ها، هرم کیفیت جریان‌های مختلف آب نیز شکل می‌گیرد (شکل ۵). در تحقیق حاضر دسته‌بندی این



شکل (۴): طرح‌واره‌ی دو سیستم کودآبیاری باز و سیستم همراه با فرایند بازچرخانی

تغذیه‌ی گیاه و کمترین آن، برای فاضلاب (زهاب خروجی) است. شکل (۵) هرم کیفیت آب را برای سیستم کودآبیاری بسته (با توجه به جامعیت جریان‌ها) ارائه کرده است.

### ۶. نتیجه‌گیری

همان‌طور که در بررسی پیشینه‌ی 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 تمام محتوا و هزینه‌های صرف‌شده برای آن با توجه به هدف سیستم را نداشته و نمی‌توانند بیانگر پارامتر جامعی برای تمایز جریان‌های آب در سیستم باشند. روش‌های آگرژی و هزینه‌ی آگرژی نیز با توجه به محدودیت‌های مطرح‌شده در مقایسه‌ی جریان‌های مختلف و به‌دلیل عدم انعکاس نقش فناوری، کارایی لازم را برای بیان هزینه‌ی انباشته‌شده به مقیاس پولی برای هر جریان، برای رسیدن به هدف سیستم را ندارند؛ به همین دلیل در مقاله‌ی حاضر، از پارامتر ترمواکونومیک مبتنی بر روش هزینه‌ی آگرگواکونومیک واحد برای بیان کمی وضعیت آب و بیان انباشت هزینه‌های صرف‌شده برای جریان‌ها در راستای تحقق هدف



شکل (۵): هرم کیفیت جریان‌های آب بر اساس شاخص هزینه‌ی آگرگواکونومیک واحد (c) جریان

در پایلوت مورد بررسی و بر اساس هزینه‌ی آگرگواکونومیک واحد جریان‌ها (c)، بیشترین مقدار برای آب مورد استفاده در

بررسی گردیده و با نتایج این تحقیق مقایسه شود. همچنین بررسی اثر کاهش تلفات آگرزوی ناشی از بازچرخانی روی کاهش تخریب آگرزوی داخلی سیستم علاوه بر کاهش هزینه آگرزگواکونومیک 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 می‌کنند. داده‌های تجربی این گلخانه امکان بررسی روش توسعه داده شده با عملکرد واقعی کشت گلخانه‌ای را امکان‌پذیر کرده است.

### فهرست علائم

علائم	تعریف
$ex$	مقدار محتوای آگرزوی به واحد جرم
$C_{p,H_2O}$	مقدار ظرفیت گرمایی
$T$	مقدار دمای جریان
$T_0$	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
$\Delta G_{f_i}$	مقدار انرژی آزاد گیبس ماده $f$
$n_e$	مقدار ماده $e$ در محلول
$b_{ch,n_e}$	مقدار آگرزوی شیمیایی ماده $e$
$R$	ثابت گازها
$a_i$	ضریب اکتیویته جریان $i$ در محلول
$a_0$	ضریب اکتیویته در شرایط مرجع
$\psi$	سرعت جریان
$\psi_0$	سرعت اولیه جریان
$g$	شتاب گرانش زمین
$z_0$	ارتفاع مرجع از سطح زمین
$z$	ارتفاع ماده در شرایط عملیات از سطح زمین
$W_{Intt}$	مقدار آب فاضلاب تولیدی از فناوری $\tau$ در مسیر تبدیل جریان $I$ به $n$ که قابلیت بازیابی در زمان $t$ را دارد.
$\beta_{Intt}$	ضریب بازیابی فاضلاب تولیدی در مسیر تبدیل جریان $I$ به جریان $n$ در فناوری $\tau$ و در زمان $t$
$M_{In\tau t}$	جریان ورودی $I$ از فناوری $\theta$ به فناوری $\tau$ در زمان $t$
$F_{n\tau t}$	جریان تولیدی $n$ از جریان $I$ در فناوری $\tau$ در زمان $t$
$E_{i out}^*$	هزینه آگرزوی جریان خروجی
$E_{j in}^*$	مقدار آگرزوی جریان ورودی
$C$	هزینه آگرزگواکونومیک

سیستم استفاده شد. پس از ترسیم نمودار مرجع واترژوی (آب و انرژی) گلخانه و مشخص نمودن فرایند کودآیاری به‌عنوان پایلوت، مقادیر آگرزوی و هزینه آگرزوی و در نهایت هزینه آگرزگواکونومیک جریان‌های مختلف در سیستم واترژوی گلخانه بر اساس ترکیب و شرایط فیزیکی و عملیاتی هریک محاسبه شدند. در ادامه هزینه آگرزوی واحد ( $k^*$ ) و هزینه آگرزگواکونومیک واحد ( $c$ ) هر جریان محاسبه و ارائه شدند. نتایج محاسبات برای پایلوت نشان می‌دهد که کاهش تلفات آگرزوی در سیستم کودآیاری بسته (ناشی از کاهش زهاب دورریز به محیط‌زیست) موجب کاهش کل تخریب آگرزوی منابع آب و کود ورودی و در نهایت کاهش هزینه آگرزگواکونومیک واحد برای تولید هر گل رز شاخه‌بریده شده است.

مقاله حاضر با استفاده از روش ارائه‌شده، علت منطقی شدن فرایند بازیابی زهاب خروجی از سیستم کشت هیدروپونیک گلخانه را از دیدگاه ترموآکونومیک بیان می‌کند، که به‌دلیل کاهش هزینه آگرزگواکونومیک واحد تولید هر شاخه‌گل رز، بر اثر کاهش تلفات سیستم در اثر بازچرخانی است. همچنین در این پژوهش با روش توسعه‌داده‌شده، با محاسبه مقادیر  $c$  (هزینه آگرزگواکونومیک واحد) و دست یافتن به ابزاری برای ارائه تجمیع هزینه انباشت‌شده به مقیاس پولی‌شده برای جریان‌ها در سیستم کشت هیدروپونیک، هرم کیفیت آب ترسیم شده است. این شاخص معیاری برای دسته‌بندی و مقایسه جریان‌ها ارائه داده است. همان‌طور که در هرم کیفیت نشان داده شده، بر اساس این روش، آب تغذیه برای گیاه (W-4) بالاترین هزینه آگرزگواکونومیک واحد با مقدار  $459/9 \text{ \$} \cdot \text{Gj}^{-1}$  در سیکل بسته و  $501/8 \text{ \$} \cdot \text{Gj}^{-1}$  در سیکل باز را داراست، و زهاب خروجی از سیستم (W-7) نیز کمترین هزینه آگرزگواکونومیک واحد ( $c$ ) با مقدار صفر را دارد. بقیه جریان‌ها، به‌تناسب بین این مقادیر قرار گرفته‌اند. با توجه به تعاریف مربوط به ارزش و کیفیت، مفهوم هزینه آگرزگواکونومیک واحد با بیان هزینه آگرزوی انباشت‌یافته برای رسیدن به یک جریان، می‌تواند ابزار خوبی برای بیان سودمندی جریان‌های مختلف آب در یک سیستم در راستای رسیدن به هدف سیستم، برای کمینه کردن هزینه‌ها باشد زیرا این پارامتر با نشان دادن هزینه‌های صرف‌شده 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 آگرزوی ناشی از بازچرخانی، برای دوره یک سال کامل، شامل فصول سرد و گرم و همچنین دوره هفت‌ساله کامل کشت گل رز (از زمان کاشت بوته تا اتمام عمر مفید آن)، می‌تواند تحلیل و

معرفی	بازدهی	فناوری	حجم کنترل
تجهیزی شامل پد سلولزی و تعدادی فن آگراست است. پد یکی از جدارهای سالن گلخانه را تشکیل داده و فن‌ها در جداره مقابل قرار می‌گیرند. آب روی پدهای گلخانه ریخته و با مکش ایجادشده از طریق فن‌ها هوا از روی پد عبور کرده و به‌صورت تبخیری ایجاد سرمایش می‌کند.	۷۵٪	پد-فن	سرمایش و رطوبت‌زنی
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 تولیدشده آب، به روش تبخیری ایجاد سرمایش نیز می‌کند.	۵۰٪	فوگر (Fogger)	
این تجهیز که باتری اقلیمی نیز نام‌گذاری شده است، از طریق خورشید و همچنین دمای زمین، با گذر دادن هوا به تونل‌های زیر گلخانه، سرمایش و گرمایش برای گلخانه تأمین می‌کند.	-	مبدل هوا-زمین	
پرده توری شکل است که برای کاهش دما و شدت نور خورشید در تابستان در گلخانه استفاده می‌شود.	-	سایه‌بان نور	سایه‌بان
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.	۴۰٪	پرده ذخیره انرژی مصرف انرژی	
تجهیزی است که تابش خورشید را به برق تبدیل می‌کند.	۱۷٪	پنل خورشیدی (PV)	تولید برق
در قسمت بالا توضیح داده شد.	۴۰٪	تولید همزمان برق و حرارت (CHP)	
تجهیزی که فشار جریان مایع (آب) را تأمین می‌کند.	۹۰٪	پمپ (Pump)	آبیاری
دستگاهی که کار تنظیم فرمولاسیون غذایی گیاه را از طریق اختلاط کودهای شیمیایی ماکرو و میکرو با آب جهت کودآبیاری گیاهان را دارد.	-	فرتیلایزر (Fertilizer)	
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 تأمین می‌کند.	-	سیستم آبیاری باز	
در سیستم آبیاری باز زهاب خروجی بعد از آبیاری گیاه از گلخانه به‌عنوان 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.	-	سیستم آبیاری بسته (بازچرخاز)	
فرایندی که در آن زهاب یا فاضلاب‌های تولیدی در گلخانه به کیفیت مورد نظر برای استفاده مجدد می‌رسد.	۹۸٪	تصفیه فاضلاب کوچک مقیاس	گرمایش
فناوری که شامل تعدادی لامپ UV است که با تابش اشعه ماورای بنفش باعث ضدعفونی کردن جریان آب می‌شود.	-	UV	

$k_i^*$	هزینه واحد انرژی
$c$	هزینه انرژی‌گواکونومیک واحد
$Z$	هزینه سرمایه‌گذاری
$EEC_{in}$	مقدار هزینه انرژی‌گواکونومیک گل رز تولیدی در حالت باز
$EAC_{en}$	هزینه جریان انرژی در سیستم تصفیه و حذف آلاینده
$EEC_{out}$	هزینه انرژی‌گواکونومیک گل رز تولیدی بدون ایجاد آلاینده

### پیوست ۱: هزینه سرمایه‌گذاری

هزینه‌های سرمایه‌گذاری فناوری‌های اصلی گلخانه و هزینه‌های فناوری‌های تصفیه زهاب، در جدول (پ-۲) ارائه شده است.

جدول (پ-۲): هزینه سرمایه‌گذاری فناوری‌های اصلی مختلف در گلخانه [۹ و ۱۹-۲۴] (\* مترمربع از مساحت زمین گلخانه)

فناوری مورد نظر	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	-	$\$/m^2$	۶/۷
بوئیلر	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

معرفی	بازدهی	فناوری	حجم کنترل
تجهیزی است که با استفاده از مصرف سوخت‌های فسیلی و گرمای حاصل از احتراق، آب گرم تولید می‌کند. آب گرم با گردش درون لوله‌های تعبیه‌شده داخل گلخانه، گرمای مورد نیاز را تأمین می‌کند.	۸۵٪	بوئیلر	گرمایش
تجهیزی است که با استفاده از احتراق سوخت‌های فسیلی، جریان هوای گرم مورد نیاز گلخانه را تولید می‌کند.	۷۵٪	هیتر هوای گرم	
تجهیزی با راندمان بالای انرژی است که برق تولید می‌کند و از حرارت جانبی تولیدشده در فرایند، به‌شکل‌های مختلف مانند تولید آب گرم، برای افزایش راندمان استفاده می‌کند.	۴۰٪	تولید همزمان برق و حرارت (CHP)	
مجموعه‌ای از لوله‌های تعبیه‌شده برای جذب گرمای حاصل از تابش خورشید است. گرمای جذب‌شده به‌وسیله مبدل به آب منتقل شده و آب گرم تولیدی برای تأمین گرمایش گلخانه استفاده می‌شود.	۵۵٪	کلکتور خورشیدی	

نمودار مرجع انرژی نامیده می‌شود [۳۳].

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

سیستم مرجع واترژری (Reference Watergy System- WERS): سیستم مرجعی که شکل جامع برهم‌کنش و هم‌پوشانی دو زیرسیستم آب و انرژی را هم‌زمان دربرمی‌گیرد، سیستم مرجع واترژری نامیده می‌شود.

انرژی (Exergy): کارمایه انرژی و بخشی از انرژی را که قابل تبدیل به کار است، انرژی نامند.

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

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

ترمو اکونومیک (Thermoeconomic): ترمو اکونومیک 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 بستر خنثی 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.

حجم کنترل	فناوری	بازدهی	معرفی
	ضد عفونی کردن با ازن Ozon	-	فرایندی که ضد عفونی 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 به‌کار برده‌شده 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 اعضاست. 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

### 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. and 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. and 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., Cirez, F. and 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. and 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. and Chen, J., "Thermodynamics and LCA analysis of biomass supercritical water gasification system using external recycle of liquid residual", Renewable Energy, Vol. 141, pp. 1117-1126, 2019.
- [9] Amini, SH., Remmerswaal, JAM., Castro, MB. and 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. and Balance, R., "Water quality monitoring - a practical guide to the design and implementation of freshwater", Quality Studies and Monitoring Programmes, pp. 1-348, 1996.
- [12] Ayers, RS., Westcot, DW., "Water Quality for agriculture". FAO UNITED NATIONS, Rome, Italy, 1985.
- [13] Ye, F. and 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. and Martinez-Gracia, A., "Exergy costs analysis of groundwater use and water transfers", Energy Conversion and Management, Vol. 110, pp. 419-427, 2016.
- [16] Hosseinejad, A., Saboohi, Y. and Shayegan, J., "WEMS-1: Watergy integrated modelling for optimal technology assessment in steel Industry- Case study: Esfahan Mobarakeh Steel Company (MSC)", Scientific of Energy Engineering & Management, Vol.10, NO.1, PP, 54-71, 2020 (in persian).
- [17] Stanek, W. and Stanek Editor, W., "Thermodynamics for sustainable management of natural resources (green energy and technology)", Springer; 2017.
- [18] Huang, LQ., Chen, GQ., Zhang, Y., Chen, B. and 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.
- [19] Martinez, A. and Uche, J., "Chemical exergy assessment of organic matter in a water flow", Energy, Vol. 35, No. 1, pp. 77-84, 2010.
- [20] Dincer, I. and Rosen, MA., "Exergy: energy, environment and sustainable development", Newnes, 2012.
- [21] Javaherdeh, K., Naghashzadegan, M. and Saadatmand, Sh., "Optimization and thermoeconomic analysis of solar lithium bromide-absorption chiller", 19<sup>th</sup> Annual Conference on Mechanical Engineering, 2011, (in persian).
- [22] Hanifi, K., Javaherdeh, K. and 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 1, Springer, pp. 1139-60, 2018.
- [23] Carrasquer, B., Uche, J. a Martinez-Gracia, A., "Exergy costs analysis of groundw ater use and water transfers", Energy Conversion and Management, Vol. 110, pp. 419-427, 2016.
- [24] Gai, L., Varbanov, PS., Van Fan, Y., Klemeš, JJ. and Romanenko, SV., "Trade-offs between the recovery, 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. and 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. and 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. and 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. and 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. and 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. and Rostami, M., "*Energy and exergy analysis of two configurations of organic rankine cycle in heat recovery of internal 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.