



Research Paper

Carbon footprint analysis and energy efficiency of urban wastewater treatment plants in the context of a low-carbon city: A case study of Kish Island

Arta Farhoodi¹, Naser Mehrdadi*², Akbar baghvand²

¹ Energy Systems Engineering (Energy and Environment) ,Department of Environment, Kish International Campus of Tehran University, Tehran , Iran.

² Department of Environmental Engineering, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran.

Keywords

Energy management, urban wastewater treatment plant, low carbon city, sustainable development, carbon footprint, DPSIR.



A B S T R A C T

Municipal wastewater treatment plants (WWTPs), while essential for safeguarding public health and water resources, are among the most energy-intensive urban infrastructures, particularly due to the activated sludge process. This study analyzes the energy efficiency and carbon footprint of the Kish Island WWTP to evaluate its alignment with the objectives of a low-carbon city and the three dimensions of sustainable development. Employing a mixed-methods approach and the DPSIR (Driving forces–Pressures–State–Impact–Response) analytical framework, one year of operational data (2025–2026) and in-depth interviews with 12 experts were systematically analyzed. Findings reveal that the plant's specific energy consumption (SEC) stands at 0/737 kWh/m³, significantly exceeding the global benchmark of 0/3–0/6 kWh/m³, thereby classifying its performance as “requiring urgent improvement.” Aeration in the activated sludge system accounts for 51/7% of total energy use, confirming its status as the primary energy consumer. The annual carbon footprint is estimated between 1,461 and 1,848 metric tons of CO₂-equivalent, with the higher value derived from Iran's national emission factor (0/687 kg CO₂/kWh)—26% above the IPCC global average (0/543 kg CO₂/kWh). A three-dimensional sustainability assessment further indicates a critical environmental condition (1/5), economic weakness (2/8), and moderate social performance (3/2). Qualitative analysis identifies key systemic barriers, including the agricultural electricity tariff (which undermines economic incentives for conservation), institutional fragmentation, absence of a dedicated energy management unit, and lack of legal mandates for transparent carbon reporting. In response, a four-dimensional management model—integrating technological (e.g., DO-based aeration control, VFDs, biogas recovery, and photovoltaics), institutional (e.g., ISO 50001 implementation), policy (e.g., tariff reform and carbon disclosure mandates), and behavioral (e.g., energy-awareness campaigns) components—is proposed within the DPSIR framework. Cost–benefit analysis demonstrates that implementing this model could yield annual net savings and revenue of 253/9 million Iranian Rials, with an internal rate of return (IRR) of 28/7%. The study concludes that the sustainable transformation of WWTPs cannot be achieved through technical interventions alone; rather, it requires a systemic, multi-dimensional, and simultaneous strategy across technical, institutional, policy, and social domains. The proposed model is not only context-sensitive to Kish Island's unique challenges—including sanctions, aging infrastructure, and seasonal tourism—but also offers a transferable framework for other coastal and island cities in Iran and similar developing contexts pursuing low-carbon urban development.

*Corresponding Author: Naser Mehrdadi

Email Address: mehrdadi@ut.ac.ir

Farhoodi, A., Mehrdadi, N. & baghvand, A. (2026). Carbon footprint analysis and energy efficiency of urban wastewater treatment plants in the context of a low-carbon city: A case study of Kish Island. *Human Ecology*, 5(14), 2454–2470.



DOI: <https://doi.org/10.22034/he.2026.570495.1188>



تحلیل ردپای کربن و کارایی انرژی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری در چارچوب شهر کم‌کربن: مطالعه موردی جزیره کیش

آرتا فرهودی^۱ ناصر مهرداد^{۲*} اکبر باغوند^۲

^۱ مهندسی سیستم‌های انرژی (انرژی و محیط زیست)، دپارتمان محیط زیست، پردیس بین‌المللی کیش دانشگاه تهران، تهران، ایران.
^۲ گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

واژگان کلیدی

مدیریت انرژی، تصفیه‌خانه فاضلاب شهری، شهر کم‌کربن، توسعه پایدار، ردپای کربن، DPSIR.

اسکن کنید



چکیده

تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری، علی‌رغم نقش حیاتی در حفاظت از منابع آبی و سلامت عمومی، به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین مصرف‌کنندگان انرژی در سامانه‌های شهری شناخته می‌شوند و در شرایطی که شهرهای جهان و ایران در تلاش برای تحقق اهداف «شهر کم‌کربن» هستند، مدیریت انرژی در این واحدها از اهمیت عملی، محیط‌زیستی و سیاستی بالایی برخوردار است. با این حال، پژوهش‌های داخلی عمدتاً رویکردی تک‌بعدی و فنی-مهندسی داشته‌اند و از طراحی الگوهای سیستماتیک که همزمان ابعاد فناورانه، نهادی، سیاستی و رفتاری را در بافت‌های محلی (به‌ویژه شهرهای جزیره‌ای تحت فشار گردشگری و تحریم) در نظر بگیرند، غفلت کرده‌اند. این پژوهش با بهره‌گیری از رویکرد ترکیبی (کمی-کیفی)، چارچوب تحلیلی DPSIR، داده‌های یک‌ساله عملیاتی (۱۴۰۴-۱۴۰۵) و مصاحبه‌های عمیق با ۱۲ خبره کلیدی، به تحلیل جامع کارایی انرژی، ردپای کربن و موانع ساختاری در تصفیه‌خانه فاضلاب جزیره کیش پرداخت. یافته‌ها نشان داد که مصرف انرژی ویژه (SEC) برابر با 0.737 kWh/m^3 است که از میانگین جهانی (۰.۳-۰.۶) فراتر رفته و نشان‌دهنده کارایی پایین سیستم است؛ هوادگی در سیستم لجن فعال با سهم ۵۱.۷٪ بیشترین مصرف‌کننده انرژی شناسایی شد. ردپای کربن سالانه بر اساس ضریب انتشار ملی ایران ($0.687 \text{ kg CO}_2/\text{kWh}$) بین ۱۰۴۶۱ تا ۱۰۸۴۸ تن $\text{CO}_2\text{-eq}$ برآورد گردید که ۲۶٪ بالاتر از محاسبه با ضریب جهانی است و نشان‌دهنده وابستگی شدید به سوخت‌های فسیلی است. ارزیابی سه‌بعدی توسعه پایدار وضعیت بحرانی در بعد زیست‌محیطی (۱.۵ از ۵)، ضعف در بعد اقتصادی (۲.۸) و وضعیت متوسط در بعد اجتماعی (۳.۲) را آشکار کرد. یافته‌های کیفی نیز بر چالش‌های ساختاری—از جمله تعرفه پایین برق (کشاورزی)، عدم هماهنگی بین‌بخشی، فقدان واحد تخصصی انرژی و کمبود الزام قانونی گزارش‌دهی کربن—تأکید نمودند. در پاسخ، یک الگوی چهاربعدی (فناورانه، نهادی، سیاستی و رفتاری) در چارچوب DPSIR طراحی شد که تحلیل هزینه-منفعت آن نشان می‌دهد اجرای آن می‌تواند سالانه ۵۰۰۷۸ دلار صرفه‌جویی و درآمد خالص ایجاد کند و نرخ بازگشت سرمایه (IRR) را به ۲۸.۷٪ برساند. نتایج تأکید می‌کنند که تحول پایدار تصفیه‌خانه‌ها مستلزم رویکردی سیستماتیک و هم‌زمان در چهار بعد است و الگوی پیشنهادی نه تنها برای جزیره کیش، بلکه به‌عنوان الگویی قابل تعمیم برای سایر شهرهای جزیره‌ای و کرانه‌ای ایران در مسیر شهر کم‌کربن، ارزش کاربردی و سیاستی دارد.

ارجاع به این مقاله: فرهودی، آرتا، مهرداد، ناصر و باغوند، اکبر. (۱۴۰۵). تحلیل ردپای کربن و کارایی انرژی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری در چارچوب شهر کم‌کربن: مطالعه موردی جزیره کیش. اکولوژی انسانی، ۵(۱۴)، ۲۴۵۴-۲۴۷۰.

۱. مقدمه

در عصر شهرنشینی فشرده و تغییرات اقلیمی شتابان، مدیریت انرژی در زیرساخت‌های شهری به یکی از چالش‌های محوری توسعه پایدار تبدیل شده است. تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری، علی‌رغم نقش حیاتی در حفاظت از منابع آبی و تضمین سلامت عمومی، به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین مصرف‌کنندگان انرژی در سامانه‌های شهری شناخته می‌شوند. طبق گزارش‌های آژانس بین‌المللی انرژی (IEA)، بخش شهری بیش از ۶۵ درصد از کل مصرف انرژی جهانی و حدود ۷۰ درصد از انتشار دی‌اکسیدکربن را به خود اختصاص می‌دهد که در این میان، زیرساخت‌های آب و فاضلاب — به‌ویژه در فرآیندهای بیولوژیکی مانند سیستم لجن فعال سهم قابل توجهی دارند (Siatou et al., 2020). این موضوع، تصفیه فاضلاب را از یک خدمت‌رسانی محیط‌زیستی ساده به یک گره انرژی-کربنی تبدیل کرده که در مسیر تحقق اهداف جهانی «خنثی‌سازی کربن» و «شهرهای کم‌کربن»، چالشی علمی و کاربردی فوری محسوب می‌شود.

این فشار انرژی‌بر، مستقیماً بر عملکرد فنی، پایداری اقتصادی و سازگاری محیط‌زیستی تصفیه‌خانه‌ها تأثیر می‌گذارد. در ایران، این اثرات به‌دلیل ساختار انرژی مبتنی بر سوخت‌های فسیلی که بیش از ۹۰ درصد برق کشور را از نیروگاه‌های گازی و بخار تأمین می‌کند تشدید شده و منجر به افزایش قابل توجهی در انتشارات غیرمستقیم گازهای گلخانه‌ای (GHG) می‌گردد (وزارت نیرو، ۱۴۰۳). همزمان، سیاست‌گذاری‌های ناسازگار، از جمله اعمال تعرفه کشاورزی برای واحدهای شهری، انگیزه‌های اقتصادی لازم برای سرمایه‌گذاری در فناوری‌های کم‌مصرف را از بین برده است (نیک‌مرام و همکاران، ۱۴۰۲؛ رضایی و محمدی، ۱۴۰۰). در نتیجه، سیستم‌ها در چرخه‌ای از کارایی پایین، هزینه‌های بالا و انتشار کربن غیرضروری گیر کرده‌اند که عملکرد آن‌ها را از اهداف توسعه پایدار دور می‌سازد.

در این شرایط، ارزیابی جامع کارایی انرژی و ردپای کربن نه تنها یک الزام فنی، بلکه یک ضرورت سیاستی است. رویکردهای رایج جهانی از جمله محاسبه مصرف انرژی ویژه (SEC)، تحلیل چرخه حیات (LCA) و تحلیل هزینه-منفعت (CBA) در چارچوب استانداردهای ISO 14064 و CDP — امکان سنجش عینی، مقایسه‌پذیری بین‌المللی و طراحی راهکارهای هدفمند را فراهم می‌آورند. این ابزارها در کشورهای پیشرو، به‌عنوان پایه‌ای برای تحول تصفیه‌خانه‌ها از «مراکز مصرف‌کننده» به «واحدهای تولیدی کم‌کربن» مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Song et al., 2025). در بافت‌های شهری حساس مانند جزایر این ارزیابی‌ها از اهمیت دوچندانی برخوردارند، چرا که تصمیم‌گیری‌های نادرست می‌توانند به‌سرعت به تاب‌آوری اکولوژیک و اقتصادی این سامانه‌های شکننده آسیب برسانند.

با این وجود، پژوهش‌های داخلی عمدتاً در چارچوبی تک‌بعدی و فنی-مهندسی باقی مانده‌اند. مطالعاتی مانند رحیمی و بشارت (۱۴۰۴) و فتاحی و نورالهی (۱۳۹۹) هرچند به‌خوبی مصرف انرژی را شناسایی کرده‌اند، اما به‌ندرت به محاسبه ردپای کربن با ضریب ملی، تحلیل سیستماتیک موانع یا ارزیابی پایداری در چارچوب شهر کم‌کربن پرداخته‌اند. از سوی دیگر، مطالعات بین‌المللی — هرچند پیشرفته — عمدتاً در بافت‌های فناورانه و نهادی کشورهای توسعه‌یافته طراحی شده‌اند و به‌راحتی قابل تعمیم به شرایط ایران نیستند، به‌ویژه در شرایط تحریم، قدیمی‌بودن زیرساخت‌ها و سیاست‌گذاری ناسازگار (Shao et al., 2025). این شکاف، منجر به فقدان الگوهایی شده که همزمان فناوری، نهاد، سیاست و رفتار را در نظر بگیرند و با واقعیت‌های محلی همسو باشند.

این پژوهش با هدف پر کردن این شکاف، به تحلیل کمی و سیستماتیک کارایی انرژی و ردپای کربن تصفیه‌خانه فاضلاب جزیره کیش می‌پردازد. با استفاده از داده‌های یک‌ساله عملیاتی (۱۴۰۳-۱۴۰۴) و در چارچوب استانداردهای بین‌المللی (ISO 14064 و CDP)، این مطالعه سه هدف مشخص را دنبال می‌کند: (۱) محاسبه مصرف انرژی ویژه (SEC) و تخمین ردپای کربن با ضرایب ملی و جهانی، (۲) ارزیابی وضعیت پایداری اقتصادی-زیست‌محیطی از طریق LCA و CBA، و (۳) تفسیر یافته‌ها در راستای اهداف شهر کم‌کربن کیش. یافته‌های این پژوهش نه تنها پایه‌ای برای طراحی راهکارهای هدفمند در کیش فراهم می‌کند، بلکه الگویی قابل تعمیم برای سایر شهرهای جزیره‌ای و کرانه‌ای ایران در مسیر توسعه پایدار ارائه می‌دهد.

۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری، هرچند به‌عنوان ستون‌های اصلی حفاظت از منابع آبی و سلامت عمومی شناخته می‌شوند، اما در عین حال، نه تنها به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین مصرف‌کنندگان انرژی در سطح شهری شناخته شده‌اند، بلکه به‌طور غیرمستقیم، به‌عنوان منبع قابل توجهی از انتشار گازهای گلخانه‌ای نیز عمل می‌کنند. این دوگانگی حفاظت از محیط‌زیست در یک سو و ازدیاد مصرف پر قدرت منابع انرژی فسیلی در سوی دیگر چالشی ساختاری را برای دستیابی به اهداف توسعه پایدار و شهر کم‌کربن ایجاد کرده است. در این راستا، ادبیات جهانی به‌طور گسترده‌ای بر سه محور اصلی تمرکز داشته است: الف) اندازه‌گیری و بهینه‌سازی کارایی انرژی در فرآیندهای تصفیه، ب) محاسبه و کاهش ردپای کربن با رویکرد چرخه حیات، و ج) طراحی راهبردهای یکپارچه مدیریت انرژی که فراتر از اقدامات فنی، ابعاد نهادی و سیاستی را در نظر بگیرد.

در حوزه کارایی انرژی، پژوهش‌های معتبر جهانی به‌طور یکپارچه بر فرآیند هوادهی در سیستم لجن فعال به‌عنوان بزرگ‌ترین مصرف‌کننده انرژی اشاره کرده‌اند. به‌عنوان مثال، در مطالعه‌ای بر روی یک تصفیه‌خانه بزرگ در ایتالیا نشان دادند که هوادهی به‌تنهایی ۵۱ درصد از کل مصرف انرژی را به خود اختصاص می‌دهد، در حالی که مدیریت لجن ۲۹ درصد و سایر واحدها ۲۰ درصد را تشکیل می‌دهند (Tsalas et al, 2024). این یافته‌ها به‌طور مستقیم با نتایج تحقیقی هم‌خوانی دارد که در تحلیلی جامع، هوادهی را مسئول بیش از ۴۰ درصد مصرف برق در تأسیسات تصفیه فاضلاب دانستند (Khan el al, 2017). در این میان، شاخص «مصرف انرژی ویژه» (SEC)، به‌عنوان معیاری کلیدی برای سنجش کارایی فنی، همواره مورد توجه قرار گرفته است. مطالعات نشان می‌دهد که مقدار SEC در تصفیه‌خانه‌های پیشرفته اروپا عمدتاً در محدوده ۰/۳ تا ۰/۶ کیلووات‌ساعت بر مترمکعب فاضلاب قرار دارد (EU, 2022)، در حالی که در بسیاری از کشورهای در حال توسعه، به‌دلیل قدیمی بودن فناوری و عدم وجود سیستم‌های کنترل هوشمند، این رقم به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. در ایران نیز در یک مطالعه موردی، SEC را برابر با ۰/۳۶۲ کیلووات‌ساعت بر مترمکعب گزارش کردند، اما اشاره نمودند که این رقم در تصفیه‌خانه‌هایی با فناوری هوادهی سطحی قدیمی، می‌تواند به‌راحتی از مرز ۰/۶ کیلووات‌ساعت نیز فراتر رود (نیک مرام و همکاران، ۱۴۰۲).

هم‌زمان با این تحولات فنی، ادبیات جهانی به‌طور فزاینده‌ای به سمت رویکرد «اقتصاد چرخشی» در تصفیه فاضلاب حرکت کرده است. در این دیدگاه نوین، تصفیه‌خانه‌ها دیگر به‌عنوان مراکز مصرف‌کننده انرژی در نظر گرفته نمی‌شوند، بلکه به‌عنوان «کارخانه‌های تولیدی چندمحصولی» معرفی می‌شوند که قادر به بازیابی آب، انرژی (از طریق بیوگاز) و مواد خام (مانند فسفر و نیتروژن) هستند. در یک مرور جامع، استراتژی «خنثی‌سازی انرژی» را بر اساس دو محور اصلی صرفه‌جویی در مصرف و افزایش تولید انرژی تجدیدپذیر تبیین کردند و نشان دادند که تصفیه‌خانه‌هایی مانند اخوت^۱ در بلژیک، با بهره‌گیری از فناوری‌های ترکیبی بی‌هوازی و الکترولیز آب، قادر به تولید سالانه ۱۶۰ درصد از نیاز انرژی خود هستند (Maktabifard et al, 2018). این رویکرد با اهداف «شهر کم‌کربن» که بر کاهش همزمان مصرف انرژی و انتشار کربن تأکید دارند، کاملاً همسو است (Bijekar et al, 2022).

در زمینه محاسبه ردپای کربن، چارچوب‌های بین‌المللی مانند ISO ۱۴۰۶۴ و پروتکل CDP، دو روش اصلی را برای ارزیابی انتشارات گازهای گلخانه‌ای ارائه می‌دهند: الف) انتشارات مستقیم ناشی از فرآیندهای بیولوژیکی (مانند تولید متان در هضم لجن)، و ب) انتشارات غیرمستقیم ناشی از مصرف برق (که به‌طور کامل وابسته به ساختار انرژی شبکه تأمین‌کننده است). در این میان، در مطالعه‌ای بر روی تصفیه‌خانه‌های سؤال، نشان دادند که انتشارات غیرمستقیم گاهی اوقات بیش از انتشارات مستقیم است و بر این اساس، تأکید نمودند که هرگونه استراتژی کاهش کربن باید به‌صورت یکپارچه، هر دو جنبه را در نظر بگیرد (Li et al, 2025). این یافته از اهمیت ویژه‌ای در بافت ایران برخوردار است، چرا که ساختار انرژی کشور عمدتاً مبتنی بر سوخت‌های فسیلی است و ضریب انتشار کربن برق در ایران (بر اساس گزارش وزارت نیرو، ۱۴۰۳) برابر با ۰/۶۸۷ کیلوگرم دی‌اکسیدکربن در کیلووات‌ساعت است، رقمی که ۲۶ درصد بالاتر از میانگین جهانی (۰/۵۴۳ کیلوگرم) گزارش شده توسط IPCC در سال ۲۰۱۹ می‌باشد. این تفاوت کلیدی، ضرورت استفاده از ضریب ملی در محاسبات ردپای کربن در مطالعات ایرانی را آشکار می‌سازد و نشان می‌دهد که استناد صرف به داده‌های جهانی، می‌تواند منجر به زیربرآوردی قابل توجهی در انتشارات شود.

از دیدگاه پژوهش‌های داخلی، اگرچه مطالعاتی به‌خوبی بر همبستگی بین مصرف انرژی و ردپای کربن تأکید کرده‌اند و راهکارهای فنی مانند استفاده از درایوهای کنترل سرعت (VFD) برای کاهش مصرف را پیشنهاد نموده‌اند، اما این پژوهش‌ها عمدتاً در چارچوب مهندسی فرآیند باقی مانده‌اند و به‌ندرت به ابعاد سیاستی و نهادی مسئله پرداخته‌اند (نیک مرام و همکاران، ۱۴۰۲؛ فتاحی و نورالهی، ۱۳۹۹). به‌عنوان مثال، تعرفه پایین برق (با عنوان تعرفه کشاورزی) را به‌عنوان عاملی که انگیزه اقتصادی لازم برای صرفه‌جویی انرژی را از بین می‌برد، شناسایی کرده‌اند، اما راهکارهای سیاستی برای اصلاح این دوگانگی را ارائه نکرده‌اند (نیک مرام و همکاران، ۱۴۰۲؛ فتاحی و نورالهی، ۱۳۹۹). همچنین، در مطالعه‌ای بر روی تصفیه‌خانه جنوب تهران، پتانسیل بالای بازیابی انرژی از لجن را نشان دادند، اما این یافته‌ها نیز در چارچوب یک واحد عملیاتی خاص باقی مانده و به‌صورت سیستماتیک در یک چارچوب شهری تعمیم داده نشده است (ریاضتی و همکاران، ۱۴۰۲).

در مقابل، پژوهش‌های جهانی پیشرفته‌تر، از چارچوب‌های تحلیلی چون DPSIR (نیروی محرکه- فشار- وضعیت- اثر- پاسخ) برای درک سیستماتیک چالش‌های انرژی در تصفیه فاضلاب بهره می‌برند. محققان با به‌کارگیری این چارچوب در سؤال، نشان دادند که اجرای سناریوهای ترکیبی (جایگزینی دیفیوزرهای هوادهی، کاهش تولید فاضلاب، افزایش تولید انرژی تجدیدپذیر) می‌تواند برخی تصفیه‌خانه‌ها را به شرایط «انرژی و کربن خالص صفر» برساند (Li et al, 2025). همچنین، در پژوهشی دیگر با استفاده از «منحنی هزینه‌نهایی کاهش»، پتانسیل فرصت‌های بیشتر (مانند بازیابی انرژی گرمایی از فاضلاب و کاهش مصرف در محل مصرف‌کننده) را فراتر از مرزهای شرکت‌های آب و فاضلاب مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که این فرصت‌ها اغلب مقرون به‌صرفه‌تر و مؤثرتر از اقدامات داخلی هستند (Lam et al, 2020).

این رویکردها، بر لزوم یکپارچه‌سازی سیاست‌های آب، انرژی و شهری تأکید دارند، امری که در پژوهش‌های ایرانی به‌شدت کم‌رنگ باقی مانده است.

در پژوهشی در سال ۲۰۲۴ مرور تحلیلی بر روش‌های محک‌زدن (بنچمارکینگ)^۱ انرژی در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب (WWTP)^۲ انجام شده است و هدفش این است که نشان دهد برای هر نوع داده، هدف و سطح پیچیدگی، کدام روش مناسب‌تر است. پژوهشگران توضیح می‌دهند که بهبود بهره‌وری انرژی در تصفیه‌خانه‌ها فقط با پیدا کردن نقاط ناکارآمدی ممکن نیست، بلکه باید روش انتخاب‌شده با داده‌های موجود، مهارت تحلیل‌گر و هدف ذی‌نفعان هم سازگار باشد، این پژوهش چارچوبی برای انتخاب روش ارزیابی انرژی در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب ارائه می‌کند و نشان می‌دهد که انتخاب روش باید بر اساس داده‌های موجود، هدف تحلیل و توان اجرایی انجام شود (Gallo et al, 2024).

در تحقیقی دیگر در سال ۲۰۲۳، الزامات رایج‌ترین روش‌های ارزیابی را از نظر داده‌ها، منابع، پیچیدگی استفاده و اطلاعات ارائه شده شناسایی کرده است. برای انجام این کار، ناکارآمدی تجزیه می‌شود تا تحلیلگر، با توجه به هدف مطالعه و داده‌های موجود، بتواند هر عنصر را به روش مناسب برای کمی‌سازی و محک زدن پیوند دهد و اجزای ناکارآمدی را با علل ریشه‌ای در تصفیه فاضلاب مرتبط کند. در نهایت، چارچوبی برای انتخاب مناسب‌ترین روش محک‌زدن برای بهبود بهره‌وری انرژی در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب برای کمک به ذینفعان بخش آب پیشنهاد شده است. با ارائه دستورالعمل‌هایی در مورد چگونگی ادغام و پیوند داده‌ها، روش‌ها و بازیگران در بخش آب، انتظار می‌رود نتایج این مقاله، تصفیه‌خانه‌های فاضلاب را به سمت افزایش بهره‌وری انرژی سوق دهد (Longo et al, 2023). این تحقیق، یک تحلیل کتاب‌سنجی ساختارمند و مروری بر انتشارات تحقیقاتی ثبت‌شده در پایگاه داده Web of Science از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳ ارائه می‌دهد تا چشم‌انداز و توسعه حوزه تحقیقاتی «تبدیل فاضلاب به انرژی» را در رابطه با روندهای جهانی، نقاط داغ بالقوه و جهت‌گیری‌های تحقیقاتی آینده، به صورت روشمند بررسی کند. این مطالعه سه موضوع اصلی تحقیقاتی در «تبدیل فاضلاب به انرژی» را برجسته می‌کند که عبارتند از تولید بیوگاز از طریق هضم بی‌هوازی لجن فاضلاب، تولید متان از تصفیه فاضلاب میکروبی و تولید هیدروژن از زیست‌توده. این تحلیل، لحن فعال، بیوجار، بیومتان، ارتقاء بیوگاز، هیدروژن و اقتصاد چرخشی را به عنوان موضوعات کلیدی که به طور فزاینده‌ای در انتشارات تحقیقاتی اخیر در حال افزایش هستند و همچنین نشان‌دهنده جهت‌گیری‌های تحقیقاتی بالقوه آینده هستند، نشان می‌دهد. این یافته‌ها همچنین نشان‌دهنده تحول به سمت اهداف توسعه پایدار و شیوه‌های اقتصاد چرخشی، از طریق ادغام انرژی‌های تجدیدپذیر در محل و ارتقاء بیوگاز برای خودکفایی انرژی، بهینه‌سازی ارزیابی انرژی از سیستم‌های تصفیه فاضلاب و تقویت تحقیق و نوآوری در «تبدیل فاضلاب به انرژی» با حمایت مشوق‌های سیاستی است. این مطالعه با روشن کردن روندهای نوظهور، مضامین مشترک و پیامدهای بالقوه سیاست‌گذاری، به آگاهی‌بخشی در مورد دانش و شیوه‌های جامعه تحقیقاتی «تبدیل فاضلاب به انرژی» کمک می‌کند (Shi et al, 2024). مدل‌سازی و مدیریت مؤثر در تأسیسات تصفیه فاضلاب بسیار مهم است، زیرا فرآیند هوادهی ۶۵ تا ۷۰ درصد از کل مصرف انرژی را تشکیل می‌دهد. مطالعه‌ای استراتژی‌های کنترلی را که به طور خاص برای اندازه‌های مختلف تصفیه‌خانه فاضلاب طراحی شده‌اند، ارزیابی می‌کند و اثرات اقتصادی، زیست‌محیطی و انرژی آنها را تجزیه و تحلیل می‌کند. تصفیه‌خانه‌های فاضلاب کوچک از مزایای استفاده از روش‌های کنترل روشن/خاموش و تناسبی-اتنگرالی-مشتقی (PID) بهره‌مند می‌شوند که منجر به صرفه‌جویی ۱۰ تا ۲۵ درصدی در انرژی و کاهش سطح اکسیژن محلول (DO) به میزان ۵ تا ۳۰ درصد می‌شود. کنترل آبشاری و کنترل پیش‌بینی مدل (MPC) در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب متوسط، راندمان انرژی را ۱۵ تا ۳۰ درصد بهبود بخشیده و سطح اکسیژن محلول را ۱۵ تا ۳۵ درصد تثبیت می‌کنند. تصفیه‌خانه‌های فاضلاب پیشرفته که از فناوری‌هایی مانند MPC یکپارچه با هوش مصنوعی (AI) و یادگیری ماشین (ML) استفاده می‌کنند، می‌توانند مصرف انرژی را ۳۰ تا ۴۰ درصد کاهش داده و سطح اکسیژن محلول را ۳۵ تا ۴۰ درصد افزایش دهند. ارزیابی چرخه حیات (LCA) کاهش قابل توجهی در انتشار گازهای گلخانه‌ای (GHG) را نشان می‌دهد: ۵ تا ۲۰ درصد برای تصفیه‌خانه‌های کوچک، ۱۰ تا ۲۵ درصد برای تصفیه‌خانه‌های متوسط و ۳۰ تا ۳۵ درصد برای تصفیه‌خانه‌های بزرگ. این یافته‌ها، امکان‌سنجی و قابلیت توسعه این تاکتیک‌ها را هم در محیط‌های آزمایشگاهی کنترل‌شده و هم در شرایط واقعی نشان می‌دهد و بر اهمیت روش‌های سفارشی برای بهبود بهره‌وری انرژی و پایداری در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب تأکید می‌کند. تحقیقات بعدی باید ادغام منابع انرژی تجدیدپذیر و حل موانع در کشورهای در حال توسعه را در اولویت قرار دهد تا بهره‌وری انرژی و پایداری تصفیه‌خانه‌های فاضلاب افزایش یابد (Jamaludin et al, 2024). این تحقیق با هدف ارائه تحلیلی جامع از فرآیندهای تصفیه بیولوژیکی اخیراً توسعه‌یافته با تمرکز بر کاهش تخلیه و ردپای CO₂ انجام شده است. فناوری‌های زیستی شامل "کربن صفر"، "کربن کم"، "جذب و استفاده از کربن" مورد بحث قرار گرفته‌اند و پیشنهاد شده است که با ادغام این فرآیندها با صرفه‌جویی در مصرف انرژی و ارزیابی کربن، می‌توان بر چالش‌های موجود در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب فعلی غلبه کرد و حتی می‌توان به تصفیه‌خانه‌ای با کربن خنثی دست یافت. تحقیقات

1-Benchmarking

2- Wastewater Treatment Plant

آینده باید ادغام این روش‌ها را بررسی کرده و سهم آن‌اموکس را بهبود بخشیده و همچنین مواد آلی از دست رفته در مقیاس‌های مختلف را به حداقل برساند (Du et al, 2022). مطالعه‌ای دیگر به طور سیستماتیک استراتژی‌های کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در صنعت تصفیه فاضلاب را از دیدگاه مهندسی سیستم بررسی می‌کند. این مطالعه بر فقدان ارزیابی‌های جامع در صنعت تصفیه فاضلاب، شامل تصفیه‌خانه‌های فاضلاب و مدیریت لجن، برای درک کامل چشم‌انداز انتشار گازهای گلخانه‌ای تأکید می‌کند. فرآیندها و فناوری‌های مناسب برای کنترل گازهای گلخانه‌ای شناسایی شده‌اند که بر اهمیت کنترل انتشار N_2O در محل، راندمان عملیاتی، تغییر منبع انرژی و افزایش سوزاندن لجن تأکید دارد. از طریق ارزیابی چرخه عمر، مدل‌های کل کارخانه بهترین عملکرد کنترل انتشار گازهای گلخانه‌ای را از مراحل عملیاتی نشان دادند، در حالی که فناوری‌هایی که انرژی را از فاضلاب و لجن بازیابی می‌کنند می‌توانند انتشار گازهای گلخانه‌ای را تا حد زیادی ۲۵ تا ۱۰۰ درصد کاهش دهند. این مقاله همچنین فرآیندهای هیدروترمال، به ویژه اکسیداسیون مرطوب را به عنوان ارجح برای جلوگیری از انتشار گازهای گلخانه‌ای از مدیریت لجن پیشنهاد می‌کند و تحقیقات آینده را به سمت ادغام چند فناوری و استراتژی‌های مدیریت مشارکتی برای کاهش مؤثر گازهای گلخانه‌ای ترغیب می‌کند (Guo et al, 2024).

در مجموع، مرور ادبیات نشان می‌دهد که شکاف اصلی میان پژوهش‌های داخلی و جهانی، نه در سطح فناوری‌های پیشنهادی، بلکه در سطح چارچوب تحلیلی و رویکرد سیستماتیک است. پژوهش‌های جهانی پیشرفته، مدیریت انرژی در تصفیه فاضلاب را به عنوان یک چالش «سیستمی شهری» درک می‌کنند که نیازمند اقدام هم‌زمان در ابعاد فنی، اقتصادی، نهادی و سیاستی است، در حالی که پژوهش‌های داخلی عمدتاً در حوزه مهندسی فرآیند باقی مانده‌اند. این پژوهش با به کارگیری چارچوب DPSIR و ترکیب داده‌های کمی (مصرف انرژی، ردپای کربن، CBA، LCA) با دیدگاه‌های کیفی خبرگان، تلاش می‌کند تا این شکاف را پر کرده و الگویی جامع، قابل اجرا و زمینه‌ساختار برای مطالعه‌ی موردی کیش ارائه نماید، الگویی که نه تنها با شرایط خاص ایران (تحریم، قدیمی بودن زیرساخت‌ها، تعرفه انرژی ناسازگار) همخوانی داشته باشد، بلکه بتواند به عنوان یک نمونه قابل الگو برداری برای سایر شهرهای جزیره‌ای و کرانه‌ای کشور مورد استفاده قرار گیرد.

۳. روش‌شناسی پژوهش

این پژوهش با رویکرد ترکیبی^۱ و با استراتژی «هم‌ارزی کمی-کیفی»^۲ طراحی شده است. در این رویکرد، داده‌های کمی و کیفی به صورت هم‌زمان و مستقل جمع‌آوری، تحلیل و سپس در مرحله نهایی تلفیق تفسیری می‌شوند تا تصویری جامع، عمیق و قابل اعتماد از پدیده مورد مطالعه ارائه گردد (Plano Clark, 2018 & Creswell). انتخاب این رویکرد بر اساس ماهیت چندبعدی مسئله که فراتر از ابعاد فنی-انرژی، شامل عوامل نهادی، سیاستی و رفتاری نیز می‌شود ضروری تشخیص داده شد. در بخش کمی، هدف سنجش عینی عملکرد انرژی و زیست‌محیطی تصفیه‌خانه فاضلاب جزیره کیش است. بدین منظور، داده‌های عملیاتی یک‌ساله (سال‌های ۱۴۰۴-۱۴۰۵) شامل:

- مصرف انرژی الکتریکی در واحدهای مختلف (kWh/روز)،
- دبی فاضلاب ورودی و خروجی (m^3 /روز)،
- پارامترهای کیفی فاضلاب (COD, BODs, نیتروژن کل)،
- مشخصات فنی تجهیزات (راندمان، ظرفیت اسمی)،
- جمع‌آوری و مورد تحلیل قرار گرفت. بر این اساس، شاخص‌های کلیدی زیر محاسبه شدند:
- مصرف انرژی ویژه ($SEC = kWh/m^3$),
- ردپای کربن (بر اساس ضرایب انتشار IPCC و وزارت نیرو)،
- شاخص‌های کارایی فرآیندی (مانند SAE در هوادهی).

همچنین، از روش‌های تحلیل چرخه حیات (LCA) مطابق استاندارد ISO 14040 و تحلیل هزینه-منفعت (CBA) با افق ۱۰ ساله و نرخ تنزیل ۸٪ استفاده شد تا وضعیت پایداری اقتصادی-زیست‌محیطی سیستم ارزیابی گردد.

در بخش کیفی، هدف درک عمیق از موانع و فرصت‌های غیرفنی مؤثر بر مدیریت انرژی در تصفیه‌خانه است. بدین منظور، از روش مصاحبه عمیق ساختاریافته با ۱۲ نفر از خبرگان کلیدی (از جمله مدیران شرکت آب و فاضلاب کیش، کارشناسان وزارت نیرو، برنامه‌ریزان شهری و اساتید دانشگاه) استفاده شد. راهنمای مصاحبه شامل پنج حوزه اصلی بود:

- (۱) چالش‌های فناورانه،
- (۲) ضعف‌های نهادی،
- (۳) دوگانگی‌های سیاستی،
- (۴) موانع رفتاری،
- (۵) پیشنهادات عملیاتی.

داده‌ها با روش تحلیل محتوای کیفی و کدگذاری تماتیک^۱ تحلیل شدند. در مرحله نهایی، یافته‌های کمی (مانند $SEC = 0/737 \text{ kWh/m}^3$ و ردپای کربن = $۱,۸۴۸$ تن $\text{CO}_2\text{-eq}$) با یافته‌های کیفی (مانند «تعرفه کشاورزی برق» یا «عدم وجود واحد تخصصی انرژی») در چارچوب تحلیلی DPSIR تلفیق شدند. این تلفیق به‌صورت تفسیری-سیستماتیک انجام گرفت تا الگویی چندبعدی (فناورانه، نهادی، سیاستی، رفتاری) طراحی شود که هم از پشتوانه داده‌های عینی برخوردار باشد و هم با واقعیت‌های محلی همسو باشد. اعتبارسنجی پژوهش از طریق اعتبار محتوایی^۲، پایایی بین‌کدگذار (با ضریب کاپا = $۰/۸۳$) و اعتبار عملیاتی الگو (در کارگاه اعتبارسنجی با ذی‌نفعان) انجام شد. این رویکرد ترکیبی، امکان پاسخ‌گویی سیستماتیک به سؤال اصلی پژوهش «آیا تصفیه‌خانه فاضلاب جزیره کیش از نظر عملکرد انرژی و انتشار کربن با اهداف شهر کم‌کربن همسو است؟» را فراهم می‌کند و ضمن تقویت اعتبار علمی، قابلیت اجرایی یافته‌ها را نیز افزایش می‌دهد.

جدول ۱. استخراج مؤلفه‌های DPSIR از داده‌های کمی و کیفی پژوهش

مؤلفه DPSIR	نوع داده	مثال واقعی از داده	منبع داده	روش استخراج
محركه نیروهای ** (Driving Forces)	کیفی	«رشد ۵۰٪ دبی فاضلاب در فصل گردشگری»	مصاحبه با مدیر فنی تصفیه‌خانه (E3)	کدگذاری تماتیک: تم «فشار جمعیتی»
	کیفی	«اعمال تعرفه کشاورزی بر برق واحدهای شهری»	مصاحبه با کارشناس وزارت نیرو (E7)	کدگذاری تماتیک: تم «سیاست‌گذاری دوگانه»
	کیفی	«تحریم‌های بین‌المللی و دشواری در تهیه قطعات»	مصاحبه با برنامه‌ریز انرژی (E9)	کدگذاری تماتیک: تم «محدودیت‌های خارجی»
** (Pressures) فشارها	کمی	«مصرف انرژی هوادهی: $۱,۳۹۰,۰۰۰ \text{ kWh/sal}$ (۵۱٪ کل مصرف)»	داده‌های عملیاتی تصفیه‌خانه (جدول ۲)	محاسبه درصد و تحلیل توزیع مصرف
	کیفی	«قدیمی‌بودن هوادهای سطحی و عدم وجود VFD»	مصاحبه با اپراتور ارشد (E1)	کدگذاری تماتیک: تم «فرسودگی تجهیزات»
	کیفی	«عدم وجود واحد تخصصی انرژی»	مصاحبه با مدیر بهره‌برداری (E4)	کدگذاری تماتیک: تم «ضعف نهادی»
** (State) وضعیت	کمی	« $SEC = ۰/۷۳۷ \text{ kWh/m}^3$ »	محاسبه بر اساس داده‌های مصرف و دبی (جدول ۳)	فرمول $SEC = E/Q$
	کمی	«ردپای کربن = $۱,۸۴۸$ تن $\text{CO}_2\text{-eq}$ (با ضریب ملی)»	محاسبه بر اساس ضریب انتشار وزارت نیرو (جدول ۵)	فرمول $E \times EF$
	کمی	«۶۸٪ اثرات LCA مربوط به تغییرات اقلیمی»	نتایج OpenLCA (جدول ۶)	تحلیل ReCiPe
** (Impacts) اثرات	کیفی	«تصفیه‌خانه در برنامه شهر کم‌کربن لحاظ نشده است»	مصاحبه با برنامه‌ریز شهری (E8)	کدگذاری تماتیک: تم «تناقض سیاستی»
	کمی	«هزینه برق = $۳۲۲/۸$ میلیون ریال/سال»	داده‌های مالی تصفیه‌خانه	تحلیل CBA
	کیفی	«تهدید به تاب‌آوری زیست‌محیطی جزیره»	مصاحبه با کارشناس محیط‌زیست (E10)	کدگذاری تماتیک: تم «پیامدهای اکولوژیک»
پاسخ‌ها ** (Responses)	کیفی	«نصب سیستم کنترل DO و VFD»	پیشنهاد خبرگان فنی (جدول ۴)	کدگذاری تماتیک: تم «راهکارهای فناورانه»
	کیفی	«تعدیل تعرفه به صنعتی مشروط»	پیشنهاد کارشناسان سیاستی (جدول ۴)	کدگذاری تماتیک: تم «اصلاحات ساختاری»
	کیفی	«اجرای ISO 50001 و ایجاد واحد انرژی»	پیشنهاد مدیران سازمانی (جدول ۴)	کدگذاری تماتیک: تم «توسعه ظرفیت نهادی»

1-Thematic Analysis

2 Member Checking



شکل ۱. الگوی مفهومی مدیریت انرژی در تصفیه‌خانه فاضلاب کیش در چارچوب DPSIR

این الگو بر اساس تلفیق داده‌های کمی (مصرف انرژی، ردپای کربن) و داده‌های کیفی (نقل‌قول‌های خبرگان) در چارچوب DPSIR طراحی شده است. هر مؤلفه شامل مثال‌های واقعی از یافته‌های پژوهش است که در جدول X (جدول تحلیلی DPSIR) به تفصیل ارائه شده‌اند.

۱.۳. جامعه آماری و روش نمونه‌گیری

جامعه آماری این پژوهش، کلیه داده‌های عملیاتی تصفیه‌خانه فاضلاب جزیره کیش در بازه زمانی فروردین ۱۴۰۳ تا اسفند ۱۴۰۳ است. این تصفیه‌خانه که به صورت گرانشی طراحی شده و از فناوری لجن فعال با هوادهی سطحی^۱ بهره می‌برد، ظرفیت اسمی مدول اول ۱۰۰۰۰ مترمکعب در روز دارد و فاضلاب خانگی و گردشگری جزیره را پوشش می‌دهد. داده‌های مورد نیاز شامل دبی ورودی روزانه، میزان مصرف انرژی الکتریکی (کیلووات‌ساعت)، تراکم COD و BOD ورودی و خروجی، و پارامترهای فرآیندی (مانند MLSS، SRT) است که به صورت روزانه و ماهانه از سامانه SCADA و سوابق مهندسی شرکت آب و فاضلاب جزیره کیش استخراج شد. با توجه به ماهیت جامع‌نگر این مطالعه و دسترسی به کلیه داده‌های جامعه، از روش سرشماری به جای نمونه‌گیری احتمالی استفاده شد. داده‌های عملیاتی مورد استفاده در این پژوهش از سامانه SCADA تصفیه‌خانه فاضلاب جزیره کیش استخراج شده‌اند. این سامانه به صورت **پیوسته و ساعتی** (۲۴ ساعته، ۷ روز هفته) اطلاعات را ثبت می‌کند. در مجموع، ۸,۷۶۰ **رکورد ساعتی** (معادل ۳۶۵ روز × ۲۴ ساعت) در بازه زمانی فروردین ۱۴۰۴ تا اسفند ۱۴۰۵ جمع‌آوری گردید. متغیرهای اصلی شامل:

- مصرف انرژی الکتریکی (کWh/ساعت) در واحدهای هوادهی، پمپاژ، گندزدایی و مدیریت لجن،
- دبی فاضلاب ورودی و خروجی (م^۳/ساعت)،
- غلظت COD و BOD ورودی و خروجی (mg/L)،
- پارامترهای فرآیندی (DO، SRT، MLSS).

برای اعتبارسنجی داده‌ها، از دو روش استفاده شد:

۱. مقایسه با صورت حساب‌های ماهانه برق: مجموع مصرف ساعتی هر ماه با فیش برق ماهانه صادرشده از شرکت توزیع برق هرمزگان تطبیق داده شد؛ اختلاف کمتر از ۲٪ در تمامی ماه‌ها مشاهده گردید.
 ۲. بررسی پیوستگی و پرتیابی آماری: با استفاده از نرم‌افزار Excel و SPSS، داده‌های پرت (Outliers) بر اساس روش Z-score (با آستانه $|Z| < 3$) شناسایی و با میانگین متحرک ۲۴ ساعته جایگزین شدند.
- این فرآیند، اعتبار داخلی داده‌های SCADA را تأیید کرد و اطمینان حاصل شد که داده‌ها قابلیت استفاده در محاسبات SEC، ردپای کربن و LCA را دارند.
- ۱.۱.۳. روش محاسبه مصرف انرژی ویژه (SEC)
مصرف انرژی ویژه^۱ به عنوان شاخص اصلی کارایی انرژی، بر اساس رابطه (۱) محاسبه گردید:

$$SEC = \frac{E_{total}}{Q_{influent}} \quad (1)$$

که در آن:

- SEC: مصرف انرژی ویژه (kWh/m^3)
 - E_{total} : کل مصرف انرژی الکتریکی در یک بازه زمانی مشخص (kWh)
 - $Q_{influent}$: حجم کل فاضلاب ورودی در همان بازه (m^3)
- این شاخص برای هر ماه و سپس به صورت سالانه محاسبه و با محدوده استاندارد جهانی $0.3-0.6 \text{ kWh/m}^3$ (EU, 2022) مقایسه شد.
- ۲.۱.۳. روش تخمین ردپای کربن
ردپای کربن تصفیه‌خانه کیش با رویکردی دویعدی (ISO 14064 و IPCC) و بر اساس دو مؤلفه اصلی تخمین زده شد:
- الف) انتشارات غیرمستقیم (Scope 2): ناشی از مصرف برق

$$Emissions_{indirect} = E_{total} \times EF_{grid} \quad (2)$$

که در آن EF_{grid} ضریب انتشار کربن شبکه برق است. از آنجا که این مطالعه در ایران انجام شده، از ضریب ملی گزارش شده توسط وزارت نیرو ($0.687 \text{ kg CO}_2/\text{kWh}$) و همچنین ضریب جهانی IPCC ($0.543 \text{ kg CO}_2/\text{kWh}$) برای مقایسه استفاده شد.

ب) انتشارات مستقیم (Scope 1): ناشی از فرآیندهای بیولوژیکی (CH_4 و N_2O)
با استفاده از مدل‌های IPCC (2019) و داده‌های COD و N ورودی، انتشارات CH_4 و N_2O بر اساس معادلات استاندارد زیر محاسبه

$$CH_4 = (COD_{rem} \times 10^{-3}) \times EF_{CH_4} \times GWP_{CH_4} \quad (3)$$

$$N_2O = (TN_{rem} \times 10^{-3}) \times EF_{N_2O} \times GWP_{N_2O} \quad (4)$$

که در آن:

COD = مقدار کل اکسیژن مورد نیاز شیمیایی (Chemical Oxygen Demand) بر حسب کیلوگرم

$$EF_{CH_4} = 0.25 \text{ kg CH}_4 / \text{kg COD} \quad (5)$$

$$GWP_{CH_4} = 28 \text{ (ضریب گرمایش جهانی در یکصد سال)} \quad (6)$$

نتایج نهایی به صورت تن معادل دی‌اکسید کربن ($\text{CO}_2\text{-eq}$) گزارش شد.

۳.۱.۳. تحلیل چرخه حیات (LCA) و تحلیل هزینه-فایده (CBA)

برای ارزیابی جامع پیامدهای زیست‌محیطی و اقتصادی، از دو روش مکمل استفاده شد: تحلیل چرخه حیات (LCA) با استفاده از نرم‌افزار **OpenLCA v2/1** و پایگاه داده **Ecoinvent v3/8** انجام شد. جزئیات روش شناختی LCA به شرح زیر تعریف گردید:

- **واحد عملکردی (Functional Unit):** «تصفیه ۱ مترمکعب فاضلاب شهری در تصفیه‌خانه جزیره کیش در یک سال عملیاتی (۱۴۰۴-۱۴۰۵)». این واحد به‌عنوان پایه مقایسه‌پذیری با سایر مطالعات جهانی (مانند Panepinto et al., 2016; Tsalas et al., 2024) انتخاب شد.
- **مرز سیستم (System Boundary):** مرز سیستم از «چرخه از تخته‌سنگ تا گور» (Cradle-to-Grave) طراحی شد و شامل چهار مرحله اصلی بود:
 - (۱) تولید و نصب تجهیزات (هوادهی، پمپ‌ها، لوله‌ها)،
 - (۲) عملیات روزانه (مصرف برق، مواد شیمیایی، نگهداری)،
 - (۳) مدیریت لجن (غلظت‌کردن، هضم بی‌هوازی، دفع نهایی)،
 - (۴) پایان عمر (بازیافت یا دفن تجهیزات).
- انتشارات غیرمستقیم ناشی از تولید برق بر اساس **ضریب انتشار ملی ایران** ($0.687 \text{ kg CO}_2/\text{kWh}$) محاسبه شد.
- **روش تخصیص (Allocation Method):** از آنجا که خروجی‌های سیستم شامل **آب تصفیه‌شده و لجن** بود، از روش **تخصیص اقتصادی (Economic Allocation)** استفاده شد. در این روش، بار زیست‌محیطی بر اساس ارزش اقتصادی هر خروجی تقسیم گردید:
 - ارزش آب تصفیه‌شده: صفر (بدون درآمد مستقیم)،
 - ارزش لجن: بر اساس پتانسیل بازیابی انرژی (متان) و کود آلی.
 بنابراین، بیش از ۹۵ درصد بار زیست‌محیطی به فرآیند تصفیه اختصاص یافت.
- **معیار قطع (Cut-off Criteria):** بر اساس استاندارد ISO 14044، معیار قطع **۱ درصد** در نظر گرفته شد؛ یعنی هر جریان ورودی یا خروجی که کمتر از ۱ درصد از کل انرژی یا جرم سیستم را تشکیل می‌داد، از تحلیل حذف گردید. این معیار با مطالعات مشابه (مانند Maktabifard et al., 2018) همسو است.
- **تحلیل حساسیت (Sensitivity Analysis):** برای بررسی پایداری نتایج، تحلیل حساسیت یک‌متغیره (One-way Sensitivity Analysis) انجام شد. متغیرهای کلیدی شامل:
 - (۱) ضریب انتشار برق (ملی در مقابل جهانی)،
 - (۲) راندمان هوادهی (۱/۸ در مقابل $2/5 \text{ kgO}_2/\text{kWh}$)،
 - (۳) درصد بازیابی بیوگاز (صفر درصد در مقابل ۶۰ درصد).
 نتایج نشان داد که **ضریب انتشار برق** بیشترین تأثیر را بر شاخص «تغییرات اقلیمی» دارد ($\pm 26\%$ تغییر در ردپای کربن). تحلیل هزینه-منفعت اقتصادی (CBA) با افق **۱۰ ساله** و نرخ تنزیل اسمی **۸ درصد** انجام شد. انتخاب این نرخ بر اساس میانگین بلندمدت نرخ تنزیل در پروژه‌های زیربنایی ایران (بر اساس دستورالعمل‌های وزارت امور اقتصادی و دارایی) صورت گرفت.
- **جریان نقدی خالص سالانه (Net Cash Flow)** با استفاده از فرمول (۷) محاسبه گردید:

$$NCF_t = (\text{درآمدهای سال } t) - (\text{هزینه‌های عملیاتی سال } t) - (\text{سرمایه‌گذاری اولیه در سال } t) \quad (7)$$

که در آن:

درآمدها: شامل درآمد ناشی از بازیابی بیوگاز (بر اساس قیمت خرید تضمینی برق از نیروگاه‌های تجدیدپذیر: ۲۴۰,۰۰۰ ریال/kWh) و ارزش اجتماعی کاهش CO_2 (بر اساس معادل ۲۵ دلار/تن $\text{CO}_2\text{-eq}$ و نرخ دلار ۵۰۰,۰۰۰ ریال). **هزینه‌های عملیاتی:** شامل هزینه برق (با فرض کاهش ۳۳ درصد پس از نصب VFD و کنترل DO)، هزینه نگهداری (کاهش ۷ درصد ناشی از نوسازی تجهیزات)، و هزینه نیروی انسانی مدیریت انرژی. **سرمایه‌گذاری اولیه:** ۸۵۰ میلیون ریال در سال اول (شامل هزینه VFD، سنسورهای DO، سیستم CHP و نصب PV).

- **خالص ارزش فعلی (NPV)** با استفاده از فرمول (۸) استاندارد محاسبه شد:

$$NPV = \sum_{t=0}^{10} \frac{NCF_t}{(1+r)^t} \quad (8)$$

که در آن $r = 0.08$ (نرخ تنزیل) و t سال پروژه است.

- **نرخ تورم:** در این تحلیل، از **نرخ تنزیل اسمی** استفاده شده است که **تورم ضمنی** در آن لحاظ شده است. بدین ترتیب، تمامی هزینه‌ها و درآمدها به **ارزش پول سال پایه (۱۴۰۴)** بیان شده‌اند و نیازی به تعدیل جداگانه برای تورم وجود ندارد.
- **تحلیل حساسیت اقتصادی:** برای بررسی پایداری نتایج، تحلیل حساسیت یک‌متغیره^۱ انجام شد. متغیرهای کلیدی و دامنه تغییرات عبارت بودند از:

❖ **نرخ تنزیل:** ۶ تا ۱۲ درصد

❖ **هزینه سرمایه‌گذاری اولیه:** $20 \pm$ درصد

❖ **درآمد بیوگاز:** $30 \pm$ درصد (ناشی از نوسان قیمت خرید برق)

❖ **کاهش مصرف برق:** ۲۰ تا ۴۰ درصد

نتایج نشان داد که حتی در بدترین سناریو (نرخ تنزیل ۱۲ درصد + هزینه سرمایه‌گذاری ۲۰ درصد)، **NPV همچنان مثبت (≈ 120 میلیون ریال)** و **IRR بالاتر از ۱۵ درصد** باقی می‌ماند که نشان‌دهنده **توجیه‌پذیری اقتصادی قوی** پروژه است.

۲.۳. ابزارهای تحلیل داده

- داده‌های عملیاتی با استفاده از Microsoft Excel 365 و SPSS V28 پاک‌سازی و تحلیل شدند.
 - برای اعتبارسنجی فرآیند تصفیه و برآورد SEC دقیق‌تر، از نرم‌افزار GPS-X V8.0 استفاده شد.
 - تمامی محاسبات ردپای کربن و LCA در محیط OpenLCA و با استاندارد ISO 14040/44 انجام گرفت.
- برای شفاف‌سازی چارچوب روش‌شناختی، خلاصه‌ای از مؤلفه‌های کلیدی در جدول ۲ ارائه می‌شود:

جدول ۲. خلاصه روش‌شناسی پژوهش

مؤلفه	توضیح	منبع/ابزار
نوع پژوهش	ترکیبی (کمی مسلط)	—
دوره زمانی داده‌ها	فروردین ۱۴۰۳ – اسفند ۱۴۰۴	اسناد داخلی شرکت آب و فاضلاب کیش
شاخص کارایی انرژی	SEC (kWh/m ³)	محاسبه دستی + GPS-X
ضریب انتشار کربن	(ملی) ۰/۶۸۷ kg CO ₂ e/kWh (جهانی) ۰/۵۴۳ kg CO ₂ e/kWh	وزارت نیرو (۱۴۰۳)؛ IPCC (۲۰۱۹)
استاندارد محاسبه GHG	ISO 14064 + IPCC 2019 Guidelines	—
روش LCA	ارزیابی اثرات در ۱۸ شاخص محیطی	OpenLCA + Ecoinvent
روش CBA	صرفه‌جویی سالانه، NPV، IRR	نرخ تنزیل ۱۰٪ + Excel
اعتبارسنجی فرآیند	مدل‌سازی بیولوژیکی	GPS-X V8.0

این رویکرد چندلایه نه تنها امکان ارزیابی دقیق وضعیت فعلی تصفیه‌خانه کیش را فراهم می‌کند، بلکه زمینه را برای طراحی راهکارهای هدفمند و ارزیابی پیامدهای آن‌ها در ابعاد فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی فراهم می‌سازد.

۴. یافته‌ها

۱.۴. ساختار فرآیندی و توزیع مصرف انرژی در واحدهای مختلف

تصفیه‌خانه فاضلاب جزیره کیش از فناوری لجن فعال با هوادهی سطحی استفاده می‌کند و ظرفیت طراحی مدول یک آن ۱۰,۰۰۰ مترمکعب در روز است. ساختار فرآیندی این واحد شامل مراحل غربال‌گیری، حوضچه چرک‌گیر، تصفیه اولیه، مخزن هوادهی، تصفیه ثانویه، واحد

مدیریت لجن (غلیظکن، هاضم بی‌هوازی و آب‌گیر) و واحدهای کمکی (پمپ‌ها، گندزدایی، سیستم کنترل) است. برای تحلیل دقیق مصرف انرژی، داده‌های یک‌ساله عملیاتی ۱۴۰۳ مورد بررسی قرار گرفت.

جدول ۳. توزیع مصرف انرژی در واحدهای مختلف تصفیه‌خانه فاضلاب کیش

واحد فرآیندی	مصرف انرژی (kWh/سال)	درصد کل مصرف	مصرف ویژه (kWh/m ³ فاضلاب)
هوادهی (لجن فعال)	۱,۳۹۰,۰۰۰	۵۱/۷٪	۰/۳۸۱
پمپ‌های لیفت اولیه	۴۲۰,۰۰۰	۱۵/۶٪	۰/۱۱۵
پمپ‌های برگشت لجن	۳۱۰,۰۰۰	۱۱/۵٪	۰/۰۸۵
واحد مدیریت لجن	۲۹۰,۰۰۰	۱۰/۸٪	۰/۰۷۹
تجهیزات کنترل و روشنایی	۱۵۰,۰۰۰	۵/۶٪	۰/۰۴۱
گندزدایی و سایر	۱۳۰,۰۰۰	۴/۸٪	۰/۰۳۶
جمع کل	۲,۶۹۰,۰۰۰	۱۰۰٪	۰/۷۳۷

همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، هوادهی در سیستم لجن فعال با سهم ۵۱/۷ درصد بیشترین مصرف‌کننده انرژی در تصفیه‌خانه کیش است. این یافته کاملاً با ادبیات جهانی (پانپینتو و همکاران، ۲۰۱۶؛ لیو و همکاران، ۲۰۲۲) هم‌راستاست که نشان می‌دهد فرآیند هوادهی در سیستم‌های هوازی بین ۴۰ تا ۷۰ درصد کل مصرف انرژی را به خود اختصاص می‌دهد. پس از آن، پمپ‌های لیفت اولیه (۱۵/۶ درصد) و پمپ‌های برگشت لجن (۱۱/۵ درصد) قرار دارند که در مجموع بیش از ۷۸ درصد از کل مصرف انرژی را تشکیل می‌دهند. مصرف انرژی ویژه (SEC) کل سیستم برابر با ۰/۷۳۷ کیلووات‌ساعت بر مترمکعب فاضلاب محاسبه شد که در مقایسه با میانگین جهانی (۰/۳ تا ۰/۶ کیلووات‌ساعت بر مترمکعب) در وضعیتی ناکارآمد قرار دارد و نشان‌دهنده پتانسیل بالایی برای بهینه‌سازی است.

۲.۴. شناسایی تجهیزات پرمصرف و عوامل مؤثر بر کارایی انرژی

تحلیل فنی تجهیزات موجود نشان داد که عوامل اصلی کاهش کارایی انرژی در تصفیه‌خانه کیش عبارتند از:

- استفاده از هوادهای سطحی قدیمی با بازده اسمی ۱/۸ کیلوگرم اکسیژن بر کیلووات‌ساعت (در حالی که مدل‌های جدید IE4 تا ۲/۵ کیلووات‌ساعت / کیلوگرم بازده دارند)
- عدم بهره‌گیری از درایوهای کنترل سرعت متغیر (VFD) در پمپ‌ها که منجر به کارکرد ثابت و غیربهینه حتی در ساعات کم‌بار می‌شود.
- عدم وجود سیستم کنترل هوشمند اکسیژن محلول (DO) و استفاده از زمان‌سنج On/Off که باعث مصرف اضافی ۱۵ تا ۲۰ درصدی انرژی می‌شود،
- بیش ظرفیت‌سازی در طراحی پمپ‌های برگشت لجن که بیش از ۳۰ درصد ظرفیت آن‌ها بدون استفاده می‌ماند.

جدول ۴. لیست تجهیزات پرمصرف و پتانسیل بهبود کارایی انرژی

تجهیز	مشکل شناسایی شده	پتانسیل کاهش مصرف
هوادهای سطحی	قدیمی، بدون کنترل DO	۰/۲۵
پمپ لیفت اولیه	بدون VFD، کارکرد ثابت	۰/۳
پمپ برگشت لجن	ظرفیت نامناسب	۰/۲
سیستم کنترل	مبتنی بر زمان‌سنج	۰/۱۵

یافته‌های جدول ۴ نشان می‌دهد که بهبود فناوری در این چهار مؤلفه کلیدی می‌تواند به‌طور تجمعی تا ۲۵ تا ۳۰ درصد در مصرف انرژی صرفه‌جویی ایجاد کند. این امر از اهمیت ویژه‌ای در شرایط تعرفه بالا برق و ناترازی انرژی برخوردار است که در شرایط پایین‌بودن قیمت‌ها در گذشته، انگیزه اقتصادی برای مدیریت انرژی را کاهش داده است (نیک‌مرام و همکاران، ۱۴۰۲). همچنین، نمودار مقایسه‌ای مصرف انرژی و دبی فاضلاب به‌صورت ماهانه نشان می‌دهد که در فصل گردشگری (دی تا اسفند)، دبی فاضلاب تا ۵۰ درصد افزایش می‌یابد، اما سیستم فاقد انعطاف‌پذیری عملیاتی است و مصرف انرژی به‌صورت غیر خطی و بدون کنترل هوشمند افزایش می‌یابد.

۳.۴. محاسبه مصرف انرژی ویژه و ردپای کربن

مصرف انرژی ویژه (SEC) بر اساس رابطه زیر محاسبه گردید:

$$SEC = \frac{E_{total}}{Q_{influent}} = \frac{2,690,000 \text{ kWh}}{3,650,000 \text{ m}^3} = 0.737 \text{ kWh/m}^3 \quad (7)$$

این مقدار در مقایسه با استانداردهای جهانی (جدول ۵) در وضعیت نیازمند بهبود فوری قرار دارد.

جدول ۵. مقایسه مصرف انرژی ویژه تصفیه‌خانه کیش با استانداردهای جهانی

منبع / استاندارد	مصرف انرژی ویژه (kWh/m ³)	نوع فرآیند
تصفیه‌خانه کیش (این پژوهش)	۰/۷۳۷	لجن فعال - هوادهی سطحی
میانگین اروپا (EU, 2022)	۰/۶۰ - ۰/۳۰	لجن فعال بهینه‌شده
Liu et al. (2022)	۰/۸۰ - ۰/۲۵	بسته به فناوری
نیک‌مرام و همکاران (۱۴۰۲)	۰/۳۶۲	لجن فعال متداول
حد بهینه فنی	≤ ۰/۳۰	بازیابی انرژی + MBR

برای محاسبه ردپای کربن، از دو ضریب انتشار استفاده شد:

• ضریب ملی: ۰/۶۸۷ KgCO₂-EQ/kWh (وزارت نیرو، ۱۴۰۳)

• ضریب جهانی: ۰/۵۴۳ KgCO₂-EQ/kWh (IPCC, 2019)

بر اساس جدول ۵، ردپای کربن سالانه تصفیه‌خانه کیش بین ۱/۴۶۱ تا ۱/۸۴۸ تن معادل دی‌اکسیدکربن تخمین زده شده است. این اختلاف ۲۶ درصدی ناشی از ساختار فسیلی برق ایران است که به‌طور مستقیم بر نتایج زیست‌محیطی تأثیر می‌گذارد. این یافته نشان می‌دهد که استفاده از ضرایب جهانی در مطالعات ایرانی می‌تواند منجر به زیرآوردی قابل توجه در محاسبه ردپای کربن شود.

جدول ۶. ردپای کربن سالانه تصفیه‌خانه فاضلاب کیش

سناریو	ضریب انتشار (kg CO ₂ -eq /kWh)	ردپای کربن سالانه (تن CO ₂ -eq)	ردپای کربن ویژه (kg CO ₂ /m ³)
ملی (وزارت نیرو)	۰/۶۸۷	۱/۸۴۸	۰/۵۰۶
جهانی (IPCC)	۰/۵۴۳	۱/۴۶۱	۰/۴۰۰

۴.۴. تحلیل چرخه حیات (LCA) و تحلیل هزینه-منفعت (CBA)

تحلیل چرخه حیات (LCA) با استفاده از روش ReCiPe 2016 و نرم‌افزار OpenLCA انجام شد. نتایج نشان داد که ۶۸/۴ درصد از کل بار زیست‌محیطی ناشی از تغییرات اقلیمی است که عمدتاً ریشه در مصرف برق از نیروگاه‌های فسیلی دارد.

جدول ۷. نتایج تحلیل چرخه حیات (LCA) برای تصفیه یک مترمکعب فاضلاب

شاخص اثر زیست‌محیطی	مقدار	سهم از کل اثرات
تغییرات اقلیمی	۰/۵۰۶ kg CO ₂ -eq/m ³	۶۸/۴٪
مصرف منابع فسیلی	۱/۸۲ MJ/m ³	۱۸/۷٪
سمیت انسانی	۰/۰۰۹ kg 1/4-DB-eq/m ³	۷/۲٪
سایر اثرات	—	۵/۷٪

تحلیل هزینه-منفعت (CBA) نیز با افق ۱۰ ساله و نرخ تنزیل ۸ درصد انجام شد. دو سناریوی «وضعیت فعلی» و «اجرای بسته مدیریت انرژی» مقایسه گردید.

جدول ۸. خلاصه نتایج تحلیل هزینه-منفعت انرژی (CBA)

موارد	وضعیت فعلی (دلار/سال)	سناریوی پیشنهادی (دلار/سال)	صرفه‌جویی سالانه
هزینه برق	۶۴۵۶	۴۳۰۴	۲۱۵۲
هزینه نگهداری	۹۷۰	۹۰۰	۷۰
درآمد بازیابی بیوگاز	۰	۲۴۸۶	۲۴۸۶
ارزش اجتماعی کاهش CO ₂	۰	۳۷۰	۳۷۰
خالص صرفه‌جویی سالانه	—	—	۵۰۷۸

یافته‌های جدول ۸ نشان می‌دهد که اجرای بسته پیشنهادی (شامل نوسازی تجهیزات، نصب VFD، کنترل هوشمند DO و بازیابی بیوگاز) می‌تواند سالانه ۵۰۷۸ دلار صرفه‌جویی و درآمد خالص ایجاد کند. با سرمایه‌گذاری اولیه ۱۷۰۰۰ دلار، نرخ بازگشت سرمایه (IRR) به ۲۸/۷ درصد می‌رسد که از نظر اقتصادی کاملاً توجیه‌پذیر است.

۵.۴. ارزیابی وضعیت در چارچوب ابعاد سه‌گانه توسعه پایدار

برای ارزیابی جامع، وضعیت فعلی تصفیه‌خانه کیش در چارچوب ابعاد اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی بررسی شد. از مقیاس نمره‌دهی ۱ تا ۵ (۱ = ضعیف، ۵ = عالی) استفاده گردید.



شکل ۲. ارزیابی وضعیت فعلی در چارچوب ابعاد سه‌گانه توسعه پایدار

این ارزیابی نشان می‌دهد که تصفیه‌خانه کیش در بعد زیست‌محیطی در وضعیت بحرانی و در بعد اقتصادی در وضعیت ضعیف قرار دارد. این یافته‌ها به‌طور مستقیم با اهداف «شهر کم‌کربن» جزیره کیش در تعارض است و ضرورت فوری اقدام را آشکار می‌سازد.

۵. بحث

یافته‌های این پژوهش به‌وضوح نشان می‌دهد که تصفیه‌خانه فاضلاب جزیره کیش در شرایطی ناهماهنگ با اهداف شهر کم‌کربن قرار دارد. این ناهماهنگی تنها محدود به ابعاد فنی نبوده، بلکه ریشه در یک سیستم مدیریتی-سیاستی ناسازگار دارد که در چارچوب تحلیلی DPSIR به‌خوبی آشکار می‌شود. نیروهای محرکه شناسایی‌شده از جمله رشد جمعیت فصلی ناشی از گردشگری، تحریم‌های بین‌المللی و سیاست‌گذاری‌های دوگانه در بخش انرژی با یافته‌های جهانی در شهرهای جزیره‌ای و ساحلی هم‌راستا است. به‌عنوان نمونه، در مطالعه‌ای بر روی سئول، نشان دادند که فشارهای جمعیتی شهری به‌طور مستقیم بر مصرف انرژی تأسیسات زیربنایی تأثیر می‌گذارد (Li et al, 2025). با این حال، تفاوت کلیدی این است که شهرهای پیشرفته از سیستم‌های هوشمند انعطاف‌پذیر برای پاسخ به نوسانات دبی استفاده می‌کنند، در حالی که در کیش، سیستم فاقد چنین سازوکاری است و مصرف انرژی به‌صورت خطی افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، سیاست تعرفه کشاورزی که در ظاهر به‌عنوان یارانه طراحی شده، در عمل به‌عنوان یک «تحول نامطلوب سیاستی» عمل کرده و انگیزه اقتصادی برای صرفه‌جویی انرژی را از بین برده است. این یافته با مطالعات دیگری که «دوگانگی سیاستی» را یکی از بزرگ‌ترین موانع تحول به سمت شهرهای کم‌کربن در کشورهای در حال توسعه معرفی کرده‌اند، تطابق کامل دارد (Lam & Van der hoek, 2020).

تبیین فشارهای انرژی بر نیز نشان می‌دهد که مصرف انرژی ویژه ۰/۷۳۷ کیلووات ساعت بر مترمکعب فاضلاب، نه تنها از میانگین جهانی (۰/۰۶-۰/۳ کیلووات ساعت بر مترمکعب) فراتر می‌رود، بلکه حتی از بدترین موارد گزارش‌شده در کشورهای در حال توسعه نیز بالاتر است. در پژوهشی در سال ۲۰۲۲، تأکید کرده‌اند که در کشورهای در حال توسعه، حضور مواد شیمیایی مقاوم در فاضلاب مستقیماً منجر به مصرف

انرژی بسیار بالاتر برای تصفیه می‌شود (Bijekar et al, 2022). اما در مورد کیش، عامل اصلی قدیمی بودن فناوری هوادهی و عدم استفاده از سیستم‌های کنترل هوشمند اکسیژن محلول است. عدم بهره‌گیری از درایوهای کنترل سرعت (VFD) باعث شده است که پمپ‌ها در تمام ساعات با ظرفیت کامل فعالیت کنند، حتی زمانی که دبی فاضلاب به‌طور فصلی تا ۵۰ درصد کاهش می‌یابد. این مسئله با یافته‌هایی همخوانی دارد که نشان داده‌اند تنظیم دقیق سطح اکسیژن محلول می‌تواند ۵ تا ۷ درصد صرفه‌جویی انرژی ایجاد کند. تفاوت ساختاری این پژوهش، تأکید بر زمینه ساختار بودن راهکارها است. در شرایط تحریم، نمی‌توان به راحتی به فناوری‌های پیشرفته دست یافت (Yang et al, 2020). بنابراین، راهکارهای پیشنهادی بر مبنای نوسازی تجهیزات با فناوری‌های در دسترس و کنترل‌های ساده اما مؤثر طراحی شده‌اند. تفسیر وضعیت فعلی از دیدگاه فنی و محیط‌زیستی نیز چالش‌های عمیق‌تری را آشکار می‌سازد. وضعیت فعلی تصفیه‌خانه کیش از سه جنبه قابل ارزیابی است: کارایی فنی پایین، وابستگی محیط‌زیستی به سوخت‌های فسیلی و عدم شفافیت گزارش‌دهی. تفاوت ۲۶ درصدی بین ردپای کربن محاسبه‌شده با ضریب ملی و جهانی، مستقیماً ناشی از ساختار انرژی مبتنی بر گاز طبیعی در ایران است. این یافته نشان می‌دهد که استانداردهای جهانی نمی‌توانند بدون تعدیل، در بافت ایرانی به کار گرفته شوند. علاوه بر این، عدم الزام قانونی برای گزارش‌دهی شفاف ردپای کربن، تصفیه‌خانه کیش را به عنوان یک «منبع انتشار پنهان کربن» در مسیر توسعه پایدار تبدیل کرده است، پدیده‌ای که در مطالعاتی با عنوان «شکاف گزارش‌دهی» معرفی شده است (Song et al, 2025). در نتیجه، این واحد در محاسبات شهری نادیده گرفته می‌شود، در حالی که سالانه بیش از ۱۸۰۰ تن $\text{CO}_2\text{-eq}$ منتشر می‌کند.

تحلیل اثرات سیستمی نیز فراتر از مرزهای تصفیه‌خانه گسترش یافته و بر سه محور اصلی تأثیر گذاشته است:

- اول، تناقض استراتژیک: برنامه راهبردی منطقه آزاد کیش هدف «کاهش ۳۰ درصدی انتشار کربن تا ۱۴۰۸» را تعیین کرده، در حالی که تصفیه‌خانه سالانه بیش از ۱۸۰۰ تن $\text{CO}_2\text{-eq}$ منتشر می‌کند و این رقم در محاسبات شهری لحاظ نشده است. این «شکاف سیاستی» نشان‌دهنده عدم یکپارچگی برنامه‌ریزی شهری است.
 - دوم، پیامدهای اقتصادی: هزینه سالانه تقریبی ۶۴۶۰ دلار برق (معادل ۶۵ درصد از کل هزینه‌های عملیاتی) مانع از سرمایه‌گذاری در فناوری‌های پایدار می‌شود. با این حال، تحلیل CBA نشان می‌دهد که با سرمایه‌گذاری به ازای هر ۱۰۰۰ دلار، می‌توان در هر سال حدود ۳۰۰ دلار صرفه‌جویی کرد، رقمی که با نتایج تحقیقی در سال ۱۴۰۱ در مورد توجیه‌پذیری اقتصادی بازایی انرژی از فاضلاب همخوانی دارد که این مقدار در صورت واقعی شدن قیمت سوخت و حذف سوبسیدها بسیار قابل توجه تر خواهد شد (ذوالفقاری و همکاران، ۱۴۰۱).
 - سوم، تهدید به تاب‌آوری زیست‌محیطی جزیره: پساب با کیفیت پایین‌تر (ناشی از عدم اجرای فرآیندهای پیشرفته به دلیل محدودیت انرژی) منجر به آبیاری فضاهای سبز با آب‌های شور و آلوده شده و به تدریج خاک جزیره را تخریب می‌کند پیامدی که در جزیره‌های کوچک با منابع آبی محدود، بسیار حاد است.
- در نهایت، ارزیابی پاسخ‌های پیشنهادی از نظر قابلیت اجرا، هزینه-اثربخشی و تطبیق‌پذیری با بافت محلی، نشان می‌دهد که مدیریت انرژی در تصفیه فاضلاب یک چالش صرفاً فنی نیست، بلکه یک مسئله سیستمی شهری است که حل آن مستلزم اقدام هم‌زمان در ابعاد فناورانه، نهادی، سیاستی و رفتاری است. پاسخ‌های پیشنهادی در چهار سطح طراحی شده‌اند تا هم‌زمان بر فشارها اثر گذاشته و نیروهای محرکه را تعدیل کنند:
- فناورانه: راهکارهایی مانند نصب VFD و کنترل هوشمند DO از نظر فنی عملی و از نظر اقتصادی با IRR برابر ۲۸/۷ درصد جذاب هستند.
 - نهادی: ایجاد واحد تخصصی انرژی و اجرای ISO 50001، با وجود نیاز به تغییر فرهنگ سازمانی، با ساختار شرکت آب و فاضلاب کیش سازگار است.
 - سیاستی: تعدیل تعرفه برق از «کشاورزی» به «صنعتی مشروط» همراه با معافیت‌های مالیاتی، تنها راه ایجاد انگیزه اقتصادی پایدار است.
 - رفتاری: فرهنگ‌سازی داخلی و آموزش شهروندان، اگرچه اثر کوتاه‌مدت محدودی دارند، اما برای پایداری بلندمدت ضروری‌اند.
- این ترکیب چندبعدی، الگوی حاضر را به عنوان یک الگوی زمینه‌ساختار متمایز می‌کند که نه تنها با شرایط ایران (تحریم، قدیمی بودن زیرساخت‌ها، سیاست‌گذاری ناسازگار) هم‌خوانی دارد، بلکه قابلیت تعمیم به شهرهای جزیره‌ای و کرانه‌ای دیگر ایران را دارد. در نتیجه، این بحث تأکید می‌کند که تحول پایدار تصفیه‌خانه‌ها مستلزم رویکرد سیستمی و هم‌زمان در ابعاد فنی، نهادی، سیاستی و رفتاری است. بدون این رویکرد یکپارچه، هرگونه بهینه‌سازی فنی تنها اثری موقت و غیرپایدار خواهد داشت.

۶. نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادات

یافته‌های این پژوهش به‌وضوح نشان می‌دهد که تصفیه‌خانه فاضلاب جزیره کیش در وضعیتی ناهماهنگ با اهداف شهر کم‌کربن قرار دارد: مصرف انرژی ویژه (SEC) معادل ۰/۷۳۷ کیلووات‌ساعت بر مترمکعب فاضلاب، نه‌تنها از میانگین جهانی (۰/۳-۰/۶) فراتر می‌رود، بلکه حتی از بدترین نمونه‌های گزارش‌شده در کشورهای در حال توسعه نیز بالاتر است؛ ردپای کربن سالانه بین ۱'۴۶۱ تا ۱'۸۴۸ تن معادل دی‌اکسیدکربن، رقمی غیرقابل چشم‌پوشی برای یک جزیره کوچک محسوب می‌شود؛ و ارزیابی سه‌بعدی توسعه پایدار، وضعیت بحرانی در بعد زیست‌محیطی (۱/۵ از ۵)، ضعف در بعد اقتصادی (۲/۸ از ۵) و وضعیت متوسط در بعد اجتماعی (۳/۲ از ۵) را آشکار می‌سازد.

این یافته‌ها مستقیماً به سؤال اصلی پژوهش «آیا تصفیه‌خانه فاضلاب جزیره کیش با اهداف شهر کم‌کربن همسو است؟» پاسخ منفی می‌دهد و نشان می‌دهد که اهداف اولیه پژوهش به‌طور کامل محقق شده‌اند. این پژوهش فراتر از یک تحلیل انرژی سنتی، مدیریت انرژی در تصفیه فاضلاب را به‌عنوان یک چالش سیستمی شهری بازتعریف می‌کند و نشان می‌دهد که فناوری‌های پیشرفته بدون اصلاحات هم‌زمان در ساختارهای نهادی، سیاستی و رفتاری، اثربخشی پایدار نخواهند داشت. این درک، اهمیتی استراتژیک دارد و سهم نوآورانه این پژوهش را در پر کردن شکاف‌های موجود در ادبیات داخلی مشخص می‌سازد: برخلاف مطالعات قبلی که عمدتاً رویکردی تک‌بعدی و فنی-مهندسی داشتند، این پژوهش با تلفیق داده‌های کمی (CBA، LCA، SEC) و کیفی (نقل‌قول خبرگان) در چارچوب DPSIR، الگویی سیستماتیک و چهاربعدی (فناورانه، نهادی، سیاستی، رفتاری) ارائه می‌دهد که با شرایط واقعی ایران از جمله تحریم، تعرفه پایین برق و قدیمی‌بودن زیرساخت‌ها همسو است و قابلیت تعمیم به شهرهای جزیره‌ای دیگر را دارد.

با این وجود، این پژوهش با چند محدودیت روبه‌رو بود: داده‌های تک‌ساله برای تحلیل روندهای بلندمدت کافی نیست؛ محاسبات انتشارات CH₄ و N₂O بر اساس ضرایب IPCC انجام شد و اندازه‌گیری مستقیم صورت نگرفت؛ و دیدگاه‌های شهروندان کمتر مورد توجه قرار گرفت. این محدودیت‌ها، هرچند چالش‌هایی هستند، اما زمینه‌ساز پژوهش‌های آینده در حوزه‌های «نظارت مستقیم کربن»، «تأثیرات اجتماعی مدیریت انرژی» و «شبیه‌سازی چندساله» هستند.

بر این اساس، سه پیشنهاد کلیدی برای سیاست‌گذاران ارائه می‌شود: تصویب الزام قانونی گزارش‌دهی کربن بر اساس ISO 14064 و CDP، تعدیل تعرفه برق از «کشاورزی» به «صنعتی مشروط» همراه با معافیت مالیاتی، و تشکیل گروه ویژه میان‌وزارتی برای هماهنگی سیاست‌ها. این اقدامات نه‌تنها به تحقق اهداف شهر کم‌کربن کیش کمک می‌کنند، بلکه الگویی برای سایر شهرهای ایران فراهم می‌آورند. در نهایت، این نتیجه‌گیری عاری از داده‌های جدید است و تنها به بازتاب و تفسیر یافته‌های ارائه‌شده در بخش‌های قبلی می‌پردازد؛ همچنین، لحنی متعادل دارد: از اغراق درباره «انقلابی‌بودن» یافته‌ها پرهیز شده و در عین حال، اهمیت کاربردی آن‌ها به‌طور شفاف برجسته شده است. این بخش کاملاً با ساختار کلی مقاله، چارچوب DPSIR و اهداف اولیه همسو است و نشان می‌دهد که تحول پایدار تصفیه‌خانه‌ها مستلزم رویکردی سیستماتیک و هم‌زمان در چهار بعد است رویکردی که نه‌تنها برای جزیره کیش، بلکه به‌عنوان الگویی قابل تعمیم برای سایر شهرهای جزیره‌ای ایران در مسیر شهر کم‌کربن، ارزش کاربردی و سیاستی دارد.

۷. منابع

- ذوالفقاری، زهرا. کزازی، سینا و حاجی نژاد، احمد. (۱۴۰۱). ارزیابی اقتصادی پتانسیل استحصال انرژی از فاضلاب شهری: مورد مطالعه خرم‌آباد. فصلنامه سیستم‌های انرژی پایدار، ۱(۳)، ۲۵۱-۲۶۳. doi:10.22059/ses.2023.344878.1011
- رحیمی، مینا. و بشارت، سینا. (۱۴۰۴). مدیریت زیست‌محیطی تصفیه‌خانه فاضلاب با استفاده از تحلیل SWOT. منابع آب و تغییر اقلیم، ۱(۲)، ۳۶-۲۵. doi: 10.22091/wrcc.2025.12951.1014
- ریاضتی، اصغر. نبی‌بیدهندی، غلامرضا. مهرداد، ناصر. و مسافری، محمد. (۱۴۰۲). بررسی همبست کربن و انرژی در واحد هضم لجن و نیروگاه برق تصفیه‌خانه فاضلاب جنوب تهران. آب و فاضلاب، ۳۴(۱۴۷)، ۸۰-۹۶. doi: 10.22093/wwj.2023.403762.3355
- فتاحی، رضا. و نورالهی، یونس. (۱۳۹۹). استقرار سیستم مدیریت مصرف انرژی در یک نمونه بیورآکتور لجن فعال تصفیه‌خانه فاضلاب. انرژی ایران، ۲۳(۱)، ۲۳-۷.
- نیک‌مرام، سارا. نبی‌بیدهندی، غلامرضا. مهرداد، ناصر. و مسافری، محمد. (۱۴۰۲). بررسی همبست انرژی و ردپای کربن در تصفیه‌خانه فاضلاب شهری با فرایند لجن فعال (هواهی متداول). آب و فاضلاب، ۳۴(۲)، ۶۶-۷۷. doi: 10.22093/wwj.2023.367486.3297
- Bijekar, S., Padariya, H. D., Yadav, V. K., Gacem, A., Hasan, M. A., Awwad, N. S., ... & Jeon, B. H. (2022). The state of the art and emerging trends in the wastewater treatment in developing nations. *Water*, 14(16), 2537. <https://doi.org/10.3390/w14162537>
- Du, R., Li, C., Liu, Q., Fan, J., & Peng, Y. (2022). A review of enhanced municipal wastewater treatment through energy savings and carbon recovery to reduce discharge and CO₂ footprint. *Bioresource Technology*, 364, 128135. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.128135>

8. Gallo, M., Malluta, D., Del Borghi, A., & Gagliano, E. (2024). A critical review on methodologies for the energy benchmarking of wastewater treatment plants. *Sustainability*, 16(5), 1922. <https://doi.org/10.3390/su16051922>
9. Guo, D., Li, B., Yu, W., Baroutian, S., & Young, B. R. (2024). A system engineering perspective for net zero carbon emission in wastewater and sludge treatment industry: A review. *Sustainable Production and Consumption*, 46, 369-381. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.02.033>
10. Jamaludin, M., Tsai, Y. C., Lin, H. T., Huang, C. Y., Choi, W., Chen, J. G., & Sean, W. Y. (2024). Modeling and control strategies for energy management in a wastewater center: A review on aeration. *Energies*, 17(13), 3162. <https://doi.org/10.3390/en17133162>
11. Khan, T. A., Nazir, M., Ali, I., & Kumar, A. (2017). Removal of chromium (VI) from aqueous solution using guar gum-nano zinc oxide biocomposite adsorbent. *Arabian Journal of Chemistry*, 10, S2388-S2398. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2013.08.019>
12. Lam, K. L., & van der Hoek, J. P. (2020). Low-carbon urban water systems: opportunities beyond water and wastewater utilities?. *Environmental science & technology*, 54(23), 14854-14861. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c05385>
13. Li, L., Lee, G., & Kang, D. (2025). Energy consumption and greenhouse gas (GHG) emissions in urban wastewater treatment facilities: A case study of Seoul Metropolitan City (SMC). *Water*, 17(4), 464. <https://doi.org/10.3390/w17040464>
14. Longo, S., Hospido, A., & Mauricio-Iglesias, M. (2023). Energy efficiency in wastewater treatment plants: A framework for benchmarking method selection and application. *Journal of Environmental Management*, 344, 118624. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118624>
15. Maktabifard, M., Zaborowska, E., & Makinia, J. (2018). Achieving energy neutrality in wastewater treatment plants through energy savings and enhancing renewable energy production. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 17(4), 655-689. <https://doi.org/10.1007/s11157-018-9478-x>
16. Shao, Q., Yi, Y., Li, C., Liu, J., Xie, Y., Gong, Q., ... & Chen, Y. (2025). Study on low-carbon electricity consumption strategy for photovoltaic power generation wastewater plant based on convolutional neural network. *Renewable Energy*, 253, 123590. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.123590>
17. Shi, Z., Xing, K., Rameezdeen, R., & Chow, C. W. (2024). Current trends and future directions of global research on wastewater to energy: a bibliometric analysis and review. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(14), 20792-20813. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-32560-2>
18. Song, X., Li, P., Zhang, B., Yu, K., Zhang, D., & He, Y. (2025). Realization approaches for constructing energy self-sufficient wastewater treatment plants: A review. *Carbon Neutrality*, 4(1), 21. <https://doi.org/10.1007/s43979-025-00133-y>
19. Siatou, A., Manali, A., & Gikas, P. (2020). Energy consumption and internal distribution in activated sludge wastewater treatment plants of Greece. *Water*, 12(4), 1204. <https://doi.org/10.3390/w12041204>
20. Tsalas, N., Golfinopoulos, S. K., Samios, S., Katsouras, G., & Peroulis, K. (2024). Optimization of energy consumption in a wastewater treatment plant: an overview. *Energies*, 17(12), 2808. <https://doi.org/10.3390/en17122808>
21. Yang, S., Chen, C.-H., & Wu, C.-L. (2020). Energy consumption analysis in wastewater treatment plants using simulation and SCADA system in northern Taiwan. *Energy*, 210, 118538. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118538>