Water and Wastewater, Vol. 34, No. 2, pp: 66-77

Investigating the Nexus of Energy and Carbon Footprint in a Municipal Wastewater Treatment Plant with Activated Sludge Process (Conventional)

S. Nikmaram[1*], Gh. R. Nabi Bidhendi[2], N. Mehrdadi[2], M. Mosaferi[3]

1. PhD. Student in Water and Wastewater Engineering, Aras International Campus, University of Tehran, Tehran, Iran
(Corresponding Author) sara.nikmaram@icloud.com
2. Prof., Dept. of Environmental Engineering, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran
3. Prof., Health and Environment Research Center, Tabriz University of Medical Sciences, Tabriz, Iran

(Received Oct. 30, 2022 Accepted Jan. 9, 2022)

To cite this article:
Nikmaram, S., Nabi Bidhendi, Gh. R., Mehrdadi, N., Mosaferi, M. 2023. "Investigating the nexus of energy and carbon footprint in a municipal wastewater treatment plant with activated sludge process (conventional)" *Water and Wastewater*, 34(2), 66-77. Doi: 10.22093/wwj.2023.367486.3297. (In Persian)

Abstract

In Iran, little attention has been paied to the nexus of energy and carbon footprint in wastewater treatment plants. The main goal of the current research is to investigate this issue in a municipal wastewater treatment plant with a conventional activated sludge (conventional). While studying the quantity and quality of wastewater, direct and indirect emissions were calculated based on the operation of the treatment plant and the amount of electricity consumption using emission coefficients. An average of 6,192,000 m^3 of wastewater is treated annually in this treatment plant. The average BOD_5 and COD removed are 274.6 and 467.9 mg/L, respectively. On average, 0.3623 ± 0.081 kWh/m^3 of energy is consumed for treated wastewater, which is equivalent to 2241.5 MWh per year. As much as 94.6% of energy is consumed by pumps and surface aerators. Considering BOD removed, the direct greenhouse gas emissions are on average 2338.2 $tCO_{2e/year}$ and the indirect emissions due to electricity consumption are 2603 to 4665 $tCO_{2e/year}$. Old design and lack of up-to-date equipment are factors that increase energy consumption and carbon footprint emission. The low tariff of electricity in the wastewater treatment plant (agricultural tariff) has made the issue of saving energy consumption less of a priority. It is necessary to pay attention to the reduction of electricity consumption, especially in the reactive mode, with the necessary modifications. It seems essential to conduct an energy audit in the existing treatment plants and pay attention to the nexus between energy and carbon footprint.

Keywords: Energy Footprint, Greenhouse Gases, Wastewater, Global Warming.

آب و فاضلاب، دوره ۳۴، شماره ۲، صفحه: ۷۷-۶۶

بررسی همبست انرژی و ردپای کربن در تصفیه‌خانه فاضلاب شهری با فرایند لجن فعال (هوادهی متداول)

سارا نیک‌مرام[۱*]، غلامرضا نبی بیدهندی[۲]، ناصر مهردادی[۲]، محمد مسافری[۳]

۱- دانشجوی دکترای مهندسی آب و فاضلاب، دانشکده محیط‌زیست، دانشگاه تهران (پردیس بین‌المللی ارس)، تهران، ایران
(نویسنده مسئول) sara.nikmaram@icloud.com
۲- استاد، گروه مهندسی محیط‌زیست، دانشکده محیط‌زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران
۳- استاد، مرکز تحقیقات سلامت و محیط‌زیست، دانشگاه علوم پزشکی تبریز، تبریز، ایران

(دریافت ۱۴۰۱/۸/۸ پذیرش ۱۴۰۱/۱۰/۱۹)

برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام بفرمایید:
نیک‌مرام، س.، نبی بیدهندی، غ. ر.، مهردادی، ن.، مسافری، م.، ۱۴۰۲، "بررسی همبست انرژی و ردپای کربن در تصفیه‌خانه فاضلاب شهری با فرایند لجن فعال (هوادهی متداول)" *آب و فاضلاب*، ۳۴(۲)، ۷۷-۶۶. **Doi: 10.22093/wwj.2023.367486.3297**

چکیده

همبست انرژی و ردپای کربن در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب در ایران چندان مورد توجه قرار نگرفته است. هدف اصلی این پژوهش، بررسی این موضوع در یک تصفیه‌خانه فاضلاب شهری با سیستم لجن فعال متداول بود. ضمن بررسی کمیّت و کیفیت فاضلاب، انتشارات مستقیم و غیرمستقیم از روی عملکرد تصفیه‌خانه و میزان مصرف برق با به‌کارگیری ضرایب انتشار محاسبه شد. سالیانه به‌طور متوسط ۶۱۹۲۰۰۰ مترمکعب فاضلاب در این تصفیه‌خانه تصفیه می‌شود. متوسط BOD_5 و COD حذف شده به ترتیب ۲۷۴/۶ و ۴۶۷/۹ میلی‌گرم در لیتر است. به‌طور میانگین ۰/۰۸۱ ± ۰/۳۶۲۳ kWh/m برای فاضلاب تصفیه شده انرژی مصرف می‌شود که معادل ۲۲۴۱/۵ مگا وات ساعت در سال است. بالغ بر ۹۴/۶ درصد انرژی توسط پمپ‌ها و هواده‌های سطحی مصرف می‌شود. با در نظر گرفتن BOD حذف شده، انتشار مستقیم گازهای گلخانه‌ای به‌طور متوسط ۲۳۳۸/۲ $tCO_{2e/year}$ و انتشارات غیرمستقیم ناشی از مصرف برق به‌دلیل مصرف برق، ۲۶۰۳ تا ۴۶۶۵ $tCO_{2e/year}$ است. قدیمی بودن طراحی و به روز نبودن تجهیزات از عوامل افزایش انرژی مصرفی و ردپای کربن است. تعرفه پایین برق در تصفیه‌خانه فاضلاب (تعرفه کشاورزی) باعث شده تا فعلاً موضوع صرفه‌جویی در مصرف انرژی، اولویت آنچنانی نداشته باشد. لازم است با اصلاحات لازم کاهش مصارف برق به‌ویژه در حالت راکتیو مورد توجه قرار گیرد. انجام ممیزی انرژی در تصفیه‌خانه‌های موجود و توجه به همسبت انرژی و ردپای کربن ضروری به نظر می‌رسد.

واژه‌های کلیدی: ردپای انرژی، گازهای گلخانه‌ای، فاضلاب، گرمایش جهانی

۱- مقدمه

در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری مقدار قابل‌توجهی از انرژی در واحدهای مختلف تصفیه‌خانه برای انجام فرایندهای بیولوژیکی و فراوری لجن مصرف می‌شود (Rashidi et al., 2015). در این میان هواده‌ها و پمپ‌ها بیشترین مصرف انرژی را به‌خود اختصاص می‌دهند.

کاپوداگلیو و اولسون گزارش کردند که در یک تصفیه‌خانه

dx.doi.org/10.22093/wwj.2023.367486.3297

فاضلاب شهری ۵۴/۱ درصد نیازمندی‌های انرژی مربوط به واحد هوادهی است. پمپاژ فاضلاب ۱۴/۳ درصد، هضم بی‌هوازی لجن ۱۴/۲ درصد و تأمین روشنایی و ساختمان‌ها ۸/۱ درصد نیازمندی‌های انرژی را به‌خود اختصاص می‌دهند. بقیه مصارف انرژی به‌ترتیب مربوط به واحد پرس لجن (۳/۹ درصد)، زلال‌سازها (۳/۲ درصد)، دانه‌گیر (۱/۴ درصد) و مابقی (۰/۸ درصد) است (Capodaglio and Olsson, 2019).

در حال حاضر در دنیا همبست انرژی، آب و کربن توجه پژوهشگران زیادی را به‌خود جلب کرده است (Meng et al., 2019). اصولاً هر مصرف انرژی در دنیا مرتبط با ردپای کربن بوده و آسیب‌های محیط‌زیستی ناشی از ردپای کربن از جمله گرمایش جهانی، چالش‌های زیادی را ایجاد کرده است. بر این اساس دانشمندان و راهبرهای تصفیه‌خانه‌های فاضلاب به سوی بهینه‌سازی طرح‌های تصفیه فاضلاب سوق یافته‌اند. انجام هوادهی برای فرایندهای بیولوژیکی تصفیه فاضلاب حائز اهمیت بوده، اما مصرف‌کننده اصلی انرژی نیز محسوب می‌شود. ازاین‌رو راه‌حل‌های پیشرفته فناورانه مانند مدل‌های ریاضی و شبیه‌سازی‌های کامپیوتری برای کاهش مصرف انرژی مورد توجه قرار گرفته است (Drewnowski et al., 2019, Pahunang et al., 2021).

انتشار گازهای گلخانه‌ای[1] از تصفیه‌خانه‌های فاضلاب به سه قسمت انتشار مستقیم، انتشار غیرمستقیم و سایر انتشارات غیرمستقیم تقسیم می‌شود (Strutt et al., 2008). انتشار مستقیم GHG از تصفیه‌خانه‌های فاضلاب به‌طور معمول CO_2 ناشی از تجزیه هوازی و تبدیل مواد آلی در فرایند تصفیه بیولوژیکی، CO_2 و CH_4 از فرایند هضم بی‌هوازی، N_2O از فرایند نیترات‌زدایی و انتشار مستقیم از سایر موارد است. انتشار غیرمستقیم GHG مربوط به برق خریداری شده است که توسط هواسازها (بلوورها)، پمپ‌ها، هواده‌های سطحی و سایر تجهیزات در تصفیه‌خانه فاضلاب مصرف می‌شود. سایر انتشارات غیرمستقیم گازهای گلخانه‌ای مربوط به انواع مواد خام و مواد شیمیایی خریداری شده و حمل‌ونقل سوخت مصرفی برای تصفیه‌خانه فاضلاب است (Demir and Yapıcıoğlu, 2019).

بهره‌برداری کارآمد از تصفیه‌خانه فاضلاب نه تنها منجر به حذف آلاینده‌ها و کاهش مصرف انرژی می‌شود، بلکه به‌عنوان وسیله‌ای برای بازیابی منابع نیز عمل می‌کند. برای چندین دهه، علاقه زیادی به کاهش GHG از تصفیه‌خانه‌های فاضلاب[2] وجود داشته و آنالیز ردپای کربن برای برآورد میزان GHG در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب در کشورهای مختلف دنیا به‌کار گرفته شده است (Nguyen et al., 2020). مصرف انرژی و ردپای کربن در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب کشور تا به امروز چندان مورد توجه قرار نگرفته و پژوهش‌های چاپ‌شده‌ای در این خصوص وجود ندارد. بر اساس گزارش مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی، در حال حاضر در ایران هنوز یک سیستم یکپارچه اندازه‌گیری و بانک اطلاعاتی در خصوص GHG و ردپای کربن وجود ندارد.

بر اساس آمار موجود از حدود ۴/۵ میلیارد مترمکعب فاضلاب شهری در کشور هر ساله حدود ۷۰۰ میلیون مترمکعب (۱۵ درصد) تصفیه و تبدیل به پساب می‌شود. در ایران ۱۸۳ تصفیه‌خانه و ظرفیت اسمی یک میلیارد و ۲۰۰ میلیون مترمکعب تولید پساب وجود دارد و بر اساس برنامه‌های موجود قرار است این ظرفیت در سال‌های آینده به ۴ میلیارد مترمکعب برسد. از ۱۸۳ تصفیه‌خانه فاضلاب شهری احداث شده کشور تقریباً ۸۰ تصفیه‌خانه بر اساس فرایند لجن فعال و اصلاح شده آن، ۴۶ تصفیه‌خانه بر اساس برکه تثبیت، ۴۲ تصفیه‌خانه بر اساس فرایند لاگون هوادهی، ۱۳ تصفیه‌خانه بر اساس فرایند SBR و ۲ تصفیه‌خانه بر اساس وتلند (تالاب) است. پساب خروجی از این تصفیه‌خانه‌ها یا به آبهای سطحی تخلیه شده و یا در کشاورزی، آبیاری فضای سبز و تغذیه آبخوان استفاده می‌شود.

آگاهی از مصارف انرژی در یک تصفیه‌خانه فاضلاب از چند دیدگاه اهمیت دارد و می‌تواند در خصوص مناسب بودن طراحی تصفیه‌خانه از نظر تجهیزات و انرژی مصرفی اطلاعات خوبی را فراهم کند. همچنین در مورد ردپای کربن در تصفیه‌خانه آگاهی لازم را ارائه می‌کند. با توجه به کمبود اطلاعاتی در کشور در ارتباط با همبست انرژی و کربن در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب، این پژوهش با هدف تعیین مصارف انرژی و رد پای کربن در یک تصفیه‌خانه فاضلاب شهری با فرایند لجن فعال از نوع هوادهی گسترده انجام شد.

[1] Greenhouse Gaz Emission (GHG)

[2] Wastewater Treatment Plants (WWTPs)

۲- مواد و روش‌ها

این پژوهش از نوع توصیفی- تحلیلی بود که در تصفیه‌خانه فاضلاب شهری میانه در استان آذربایجان شرقی در سال ۱۴۰۱ انجام شد. این تصفیه‌خانه در زمینی به مساحت حدود ۵/۳ هکتار و در کنار رودخانه مشترک (آیدوغموش، شهرچای و قرانقو) در مجاورت ایستگاه راه‌آهن میانه قرار گرفته و برای جلوگیری از ایراد خسارت بر تأسیسات تصفیه‌خانه به‌علت احتمال بالا آمدن سطح آب در رودخانه، تصفیه‌خانه در سطحی بالاتر از سطح زمین طبیعی احداث شده است. تصفیه‌خانه فاضلاب شهر میانه با فرایند هوادهی گسترده طراحی شده است. طراحی واحدهای این تصفیه‌خانه با هدف کاهش بار آلی ورودی انجام شده و حذف مواد مغذی (نیتروژن و فسفر) و تولید انرژی از ظرفیت‌های موجود از اهداف طراحی نبوده است.

در واحد بیولوژیکی، هوادهی به روش سطحی انجام می‌شود و لجن حاصل از فرایند، تغلیظ شده و سپس به بسترهای لجن خشک‌کن منتقل می‌شود. فاضلاب از طریق یک لوله سیمانی به قطر ۱۰۰۰ میلی‌متر تا ورودی تصفیه‌خانه رسیده سپس وارد آشغال‌گیر دهانه درشت مکانیکی شده و پس از آن وارد ایستگاه پمپاژ می‌شود. پس از پمپاژ، مراحل آشغال‌گیری و دانه‌گیری را طی کرده، سپس از پارشال فلوم عبور کرده و وارد سلکتور بیولوژیک می‌شود.

در این مرحله با لجن برگشتی ترکیب شده و وارد تانک‌های هوادهی (از نوع سطحی) می‌شود. پس از اکسیداسیون بیولوژیکی در تانک هوادهی وارد تانک ته‌نشینی شده و پساب و لجن از یکدیگر جدا می‌شوند. پساب، وارد مرحله کلرزنی شده و پس از تزریق محلول کلر، زمانی را در تانک تماس کلر سپری کرده و سپس به رودخانه تخلیه می‌شود. لجن نیز توسط ایستگاه پمپاژ به دو قسمت تقسیم شده و لجن برگشتی به ابتدای تانک سلکتور و لجن مازاد به تانک تغلیظ ثقلی و سپس به بسترهای لجن خشک‌کن منتقل می‌شود.

۲-۱- جمع‌آوری اطلاعات عملکردی تصفیه‌خانه

اطلاعات مرتبط با انرژی و ردپای کربن در تصفیه‌خانه ضمن انجام بازدید میدانی و بررسی مستندات و مبانی طراحی، سابقه پایش‌ها و آنالیزهای کیفی فاضلاب خام و پساب و در نهایت مصاحبه با اپراتورهای تصفیه‌خانه تهیه شد. داده‌های مربوط به دبی و کیفیت فاضلاب ورودی و پساب خروجی تصفیه‌خانه مربوط به یک سال اخیر بوده که با استفاده از تست‌های آماری، نرمالیتی آنها بررسی و تعیین شد. پس از تعیین نرمال بودن یا غیرنرمال بودن داده‌ها (جدول ۱: شاپیرو-ویلک و کولموگروف-اسپیرنوف)، با استفاده از شاخص‌های آمار توصیفی نسبت به توصیف داده‌ها و استفاده از اعداد میانگین در انجام محاسبات اقدام شد. هم‌بستگی بین پارامترهای مختلف از طریق رگرسیون بررسی شد. در مرحله بعدی وضعیت موجود تصفیه فاضلاب از نظر دبی، بار آلی و مصرف انرژی تشریح و تحلیل شد. به‌منظور تعیین انرژی الکتریکی مصرفی در تصفیه‌خانه‌های تحت بررسی، بررسی‌های میدانی دقیقی به عمل آمد و کلیه تجهیزات از نظر توان الکتریکی شناسایی شدند. آمار مصرف برق در تصفیه‌خانه فاضلاب طی بازه زمانی یک ساله اخیر تهیه شد. بر اساس میانگین دبی روزانه، مقدار مصرف برق برحسب کیلووات ساعت برای هر مترمکعب فاضلاب محاسبه شد.

۲-۲- محاسبات GHG و ردپای کربن

انتشار GHG، CO_2، CH_4، N_2O و سایر گازهای گلخانه‌ای منتشر شده از تصفیه‌خانه فاضلاب به‌طور یکنواخت با مقدار CO_2 تولید شده اندازه‌گیری می‌شود. با توجه به پتانسیل گرمایش جهانی[1]، مقدار بالقوه CO_2 یک و مقدار بالقوه CH_4 و N_2O به‌ترتیب ۲۳ و ۲۹۶ است. CH_4 و N_2O را می‌توان با توجه به پتانسیل مربوطه به معادل انتشار کربن تبدیل کرد (Lin, 2020, Snip, 2010).

فاکتورهای GHG برای موارد مختلف توسط برخی از سازمان‌ها از جمله هیئت بین دولتی تغییر اقلیم[2] ارائه شده است. همچنین در پژوهش‌های منتشر شده به شکل پژوهش و پایان‌نامه نیز این ضرایب قابل استخراج و استفاده هستند. در این پژوهش نیز سعی بر آن شد تا ضرایب مربوطه از منابع معتبر تهیه و استفاده شود. نظر به اینکه در تصفیه‌خانه مورد بررسی عملاً ماده شیمیایی خاصی استفاده نمی‌شود و همچنین فراوری خاصی روی لجن انجام نمی‌شود، بنابراین عملاً این موارد در محاسبات مربوط به ردپای کربن وارد نشد و مرز سیستم صرفاً محدود به خود فرایند تصفیه فاضلاب محدود شد. بنابراین تمرکز اصلی در محاسبات ردپای

[1] Global Warming Potential (GWP)
[2] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)

dx.doi.org/10.22093/wwj.2023.367486.3297

جدول ۱- تحلیل آماری پارامترهای کیفی فاضلاب طی ۳ سال اخیر

Table 1. Statistical analysis of wastewater quality parameters during the last three years

	Number of samples	Min.	Max.	Mean	±SD	Skewness		Kurtosis	
						Statistic	Std. error	Statistic	Std. error
BODin	16	190	440	303.1	79.7	0.239	0.564	-1.180	1.091
BODout	16	8	75	28.5	18.8	1.460	0.564	1.830	1.091
CODin	16	320	740	513.1	137.6	0.214	0.564	-1.293	1.091
CODout	16	14	120	45.2	29.1	1.590	0.564	2.369	1.091
NH_{3in}	4	28.1	44.2	36.4	8.3	-0.052	1.014	-5.458	2.619
NH_{3out}	4	7.5	16.4	12.3	3.8	-0.542	1.014	-0.054	2.619

کربن، مربوط به انتشارات مستقیم GHG از سیستم تصفیه فاضلاب در اثر تبدیل مواد آلی (BOD) و نیز انتشارات غیرمستقیم ناشی از مصرف برق در تصفیه‌خانه با معادلات ۱ و ۲ مدنظر قرار گرفت:

(۱) ضریب انتشار دی‌اکسید کربن × کیلوگرم BOD حذف شده = مقدار انتشار CO_2

(۲) ضریب انتشار دی‌اکسید کربن × مقدار برق مصرف شده = مقدار انتشار CO_2

در تصفیه‌خانه میانه به دلیل عدم وجود واحد نیترات‌زدایی و نیز نبود هضم بی‌هوازی لجن عملاً مقدار انتشار متان و N_2O صفر است، بنابراین ضرورتی برای ورود به محاسبات ردپای کربن وجود ندارد. این شرایط معمولاً در اغلب تصفیه‌خانه‌های مشابه در منطقه وجود دارد. برای تعیین میزان برق (انرژی) مصرفی به‌ازای هر مترمکعب از فاضلاب تصفیه شده، آمار قبوض برق تصفیه‌خانه طی سال‌های ۱۳۹۷ تا دو ماهه اول ۱۴۰۱ بررسی و مقدار انرژی مصرف شده به‌ازای هر مترمکعب فاضلاب تصفیه شده به این صورت محاسبه شد که ابتدا عدد کل قدرت مصرفی به تعداد روزها تقسیم شد تا قدرت مصرفی روزانه به‌دست آید. سپس این عدد روزانه به مقدار متوسط روزانه فاضلاب تصفیه شده در تصفیه‌خانه تقسیم شد تا مقدار انرژی مصرفی به‌ازای هر مترمکعب فاضلاب به‌دست آید.

در خصوص محاسبه GHG، مقدار انتشار مطابق با IPCC 2019 و همچنین پژوهش وانگ و همکاران در سال ۲۰۲۲، در سیستم‌های مختلف تصفیه فاضلاب ارائه شده است. مطابق این منابع، در فرایندهای بیولوژیکی تصفیه فاضلاب و همچنین لجن فعال به‌ازای هر کیلوگرم COD حذف شده ۵۶۰ گرم (۰/۵۶ کیلوگرم) دی‌اکسید کربن تولید می‌شود (Wang et al., 2022).

بر اساس پژوهش چای و همکاران در سال ۲۰۱۵، به‌ازای هر کیلوگرم BOD حذف شده ۱/۳۷۵ کیلوگرم CO_2 می‌تواند منتشر شود. همچنین به‌ازای هر کیلوگرم ازت دنیتریفای شده ۰/۰۳۵ کیلوگرم ازت — N_2O تولید می‌شود که معادل ۱۰/۳۶ کیلوگرم CO_2 خواهد بود. بر اساس همین رفرنس به‌ازای هر کیلووات ساعت برق مصرفی ۰/۶۸۱ کیلوگرم معادل دی‌اکسید کربن تولید می‌شود (Chai et al., 2015).

بر اساس پاراویچینی و همکاران در سال ۲۰۱۶، مقدار انتشار دی‌اکسید کربن معادل به‌ازای هر kWh برق مصرفی برابر ۰/۳۸ کیلوگرم است (Parravicini et al., 2016).

در این پژوهش، برای انجام محاسبات از اعداد و ضرایب رفرنس‌های فوق استفاده شد، ضمن آنکه با توجه به عدم فراوری لجن و بازیافت انرژی، تعریف سناریوی دیگری غیر از وضعیت موجود عملاً موضوعیت نداشت.

۳- نتایج

در این بخش، نتایج حاصل از پژوهش ضمن توصیف تصفیه‌خانه فاضلاب مورد بررسی ارائه شده است.

۳-۱- کمیت فاضلاب تصفیه شده

تغییرات دبی فاضلاب ورودی به تصفیه‌خانه در دو فصل بهار و تابستان در طی ۱۰ روز متوالی در شکل ۱ ارائه شده است. در فصل بهار، میانگین نتایج به‌دست آمده ۱۷۹۵۴/۷ مترمکعب در شبانه‌روز بود و به‌طور تقریبی می‌توان دبی روزانه تصفیه‌خانه را

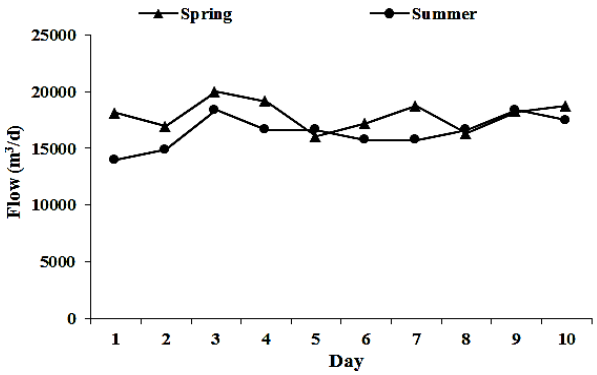

Fig. 1. Variation of flow of wastewater treatment plant in spring and summer

شکل ۱- تغییرات دبی فاضلاب ورودی به تصفیه‌خانه در فصل بهار و تابستان

۱۸۰۰۰ مترمکعب در شبانه‌روز در نظر گرفت. این مقدار دارای انحراف معیار ۲۰۰۰ مترمکعب در روز بود (۱۱± درصد). در فصل تابستان، میانگین نتایج به‌دست آمده عدد ۱۶۴۵۰ مترمکعب در شبانه‌روز بود. به‌طور تقریبی می‌توان دبی روزانه تصفیه‌خانه را ۱۶۵۰۰ مترمکعب در شبانه‌روز در نظر گرفت. این مقدار دارای انحراف معیار ۲۵۰۰ مترمکعب در روز (۱۵± درصد) بود. مجموع ارقام ثبت شده در دو فصل و ۲۰ نوبت دبی‌سنجی مقدار میانگین ۱۷۲۰۰ مترمکعب در شبانه‌روز با تغییرات حدود ۱۸ درصد را گزارش کرد. بنابراین می‌توان فرض کرد دبی فعلی تصفیه‌خانه در مقدار میانگین بیان شده و قابل تعمیم به سایر فصول نیز هست. بر این اساس مقدار دبی میانگین ماهیانه و سالیانه تصفیه‌خانه به ترتیب ۵۱۶۰۰۰ و ۶۱۹۲۰۰۰ مترمکعب در روز برآورد شد. این مقدار در حداقل خود به ترتیب برابر ۴۲۳۱۲۰ و ۵۰۷۷۴۴۰ مترمکعب در روز و در حداکثر خود به‌ترتیب برابر ۶۰۸۸۸۰ و ۷۳۰۶۵۶۰ مترمکعب در روز برای دبی ماهیانه و سالیانه برآورد شد.

۳-۲- کیفیت فاضلاب تصفیه شده

نتایج آنالیز کیفیت فاضلاب ورودی به تصفیه‌خانه طی فروردین ۱۳۹۹ تا تیر ۱۴۰۱ بررسی شد که بر اساس نتایج جدول ۱ مقدار میانگین BOD_5، COD و ازت آمونیاکی ورودی به تصفیه‌خانه به‌ترتیب ۷۹/۷ ± ۳۰۳، ۱۳۷/۶ ± ۵۱۳ و ۸/۲۷ ± ۳۶/۴ میلی‌گرم در لیتر بود. این مقدار برای میانگین BOD_5، COD و ازت آمونیاکی خروجی از تصفیه‌خانه به‌ترتیب ۱۸/۷ ± ۲۸/۵، ۲۹/۱ ± ۴۵/۲ و ۷/۳ ± ۱۲/۳ میلی‌گرم در لیتر بود. مقدار BOD_5، COD و ازت آمونیاکی حذف شده به‌ترتیب برابر ۲۷۴/۶، ۴۶۷/۹ و ۲۴/۰۵ میلی‌گرم در لیتر بود.

۳-۳- مصارف انرژی

توان مصرفی واحدهای مختلف تصفیه‌خانه طی بررسی میدانی و همچنین نقشه‌های طراحی استخراج و در جدول ۲ ارائه شده است. در شکل ۲ نیز مقدار انرژی مصرفی در بخش‌های مختلف تصفیه‌خانه با هم مقایسه شده‌اند. بر اساس این شکل، بیشترین مصرف انرژی، مربوط به واحد هوادهی لجن فعال و سپس پمپ‌های ورودی است که برای دادن ارتفاع به فاضلاب استفاده می‌شود.

بر اساس تحلیل‌های انجام شده بر روی آمار برق مصرفی در تصفیه‌خانه، به‌طور میانگین ۰/۰۸۱ ±۰/۳۶۲۳ kWh/m^3 به‌ازای هر مترمکعب فاضلاب تصفیه شده انرژی مصرف می‌شود. این مقدار حداقل ۰/۱۹ kWh/m^3 و حداکثر ۰/۶۱ kWh/m^3 است.

۳-۴- ردپای کربن

در جدول ۳، مقدار ردپای کربن برای تصفیه فاضلاب از روی COD، ازت کل، BOD حذف شده و برق مصرفی و با استفاده از ضرائب معتبر محاسبه و ارائه شده است. بر اساس ضرائب IPCC مربوط به COD، تصفیه‌خانه فاضلاب بررسی شده می‌تواند بین ۳۱۰۷/۷ تا ۴۴۷۲/۲ و به‌طور متوسط ۳۷۹۰/۱ تن در سال معادل دی‌اکسید کربن به‌عنوان انتشارات مستقیم تولید کند. در این میان تقریبا ۵۰ درصد این مقدار مربوط به N_2O است. بر اساس ضرائب وانگ، این مقدار به‌ترتیب ۱۴۳۴/۲، ۲۰۳۶/۹ و ۱۷۴۹/۱ تن در سال معادل دی‌اکسید کربن است. نسبت متوسط IPCC به متوسط وانگ برابر ۲/۱۷ است. با در نظر گرفتن BOD حذف شده، انتشار معادل دی‌اکسید کربن، حداقل ۱۷۱۹/۳ و حداکثر ۲۷۵۹/۱ تن در سال و به‌طور متوسط ۲۳۳۸/۲ تن در سال است. این مقدار بیشتر از عدد محاسبه شده بر اساس وانگ و کمتر از IPCC است.

در خصوص انتشارات غیرمستقیم به‌دلیل مصرف برق، مقدار GHG با استفاده از ضریب چای، حدود ۴۶۶۵ تن در سال و با استفاده از ضریب پاراوینچینی حدود ۲۶۰۳ تن در سال معادل دی‌اکسید کربن است.

dx.doi.org/10.22093/wwj.2023.367486.3297

جدول ۲- انواع مصارف انرژی در واحدهای مختلف تصفیه‌خانه فاضلاب میانه

Table 2. Types of energy consumption in different units of the Miyaneh wastewater treatment plant

Row	Unit	Number	Electrical power (kW)	Total electrical power (kW)
1	Pumping station pumps (raw wastewater)	6	15	90
2	Coarse screen	1	2	2
3	Fine screen	2	1	1
4	Grit chamber blower	2	3.5	7
5	Grit chamber blower	1	0.75	0.75
6	Surface aerators (aeration tank)	10	55	550
7	Return sludge screw pump	2	50	100
8	Outside lighting	60	0.25	20
9	Others		10	10
10	Total power demand			782

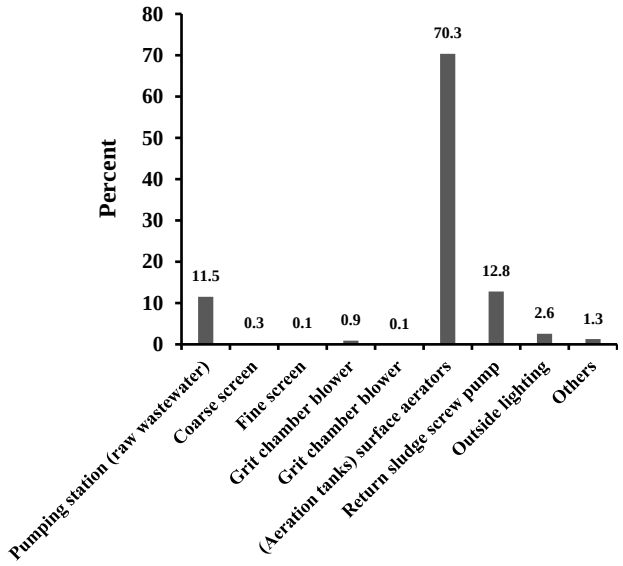

Fig. 2. Comparison of electricity consumption (%) in different sections of the investigated wastewater treatment plant

شکل ۲- مقایسه مقدار برق مصرفی (درصد) در بخش‌های مختلف تصفیه‌خانه فاضلاب بررسی شده

۴- بحث

جمع‌آوری و تصفیه فاضلاب‌های شهری یکی از راهکارهای مهم مورد استفاده در دنیا برای پیشگیری از آلودگی محیط‌زیست، حفاظت از منابع آب و حفظ سلامت جامعه است. با این حال به دلیل استفاده از سیستم‌های بیولوژیکی به‌ویژه هوازی، به‌دلیل مصرف انرژی زیاد این تصفیه‌خانه‌ها همواره از نظر ردپای کربن طی دهه‌های اخیر مورد توجه هستند. تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری در ایران اغلب عمر زیادی داشته و طراحی به‌کار رفته و تجهیزات استفاده شده در آنها قدیمی بوده و از فناوری‌های روز که مصرف انرژی را کاهش می‌دهد، بهره نمی‌برند. بر این اساس بررسی مصارف انرژی در این تصفیه‌خانه‌ها موضوعی ضروری برای انجام اصلاحات و کاهش GHG است چون امروزه بزرگترین چالش محیط‌زیستی که جهان با آن درگیر است موضوع گرمایش جهانی در اثر GHG است و پاسخ‌گویی به تغییرات آب و هوایی جهانی نیازمند محاسبه بهتر انتشار این گازها برای توسعه است (Harvey, 2018).

در این پژوهش انتشارات مستقیم و غیرمستقیم گازهای گلخانه‌ای از یک تصفیه‌خانه فاضلاب شهری با سیستم لجن فعال بررسی شد. این تصفیه‌خانه سالیانه به‌طور متوسط ۶/۲ میلیون مترمکعب فاضلاب را تصفیه کرده و به‌طور میانگین به ازای هر مترمکعب فاضلاب تصفیه شده ۰/۳۶۲ کیلووات ساعت برق مصرف می‌کند که معادل ۲۲۴۱/۵ مگاوات ساعت در سال است. بر اساس مقدار گزارش شده IPCC و EPA(Zib III et al., 2021)، مقدار GHG برای هر مگاوات ساعت برق مصرف شده به‌طور متوسط ۵۹۵/۹ کیلوگرم معادل دی‌اکسید کربن است بنابراین انتظار می‌رود در تصفیه‌خانه فاضلاب بررسی شده ۱۳۳۵/۷ تن معادل دی‌اکسید کربن انتشار یابد. بیش از ۷۰ درصد برق مصرفی

جدول ۳- مقدار ردپای کربن و انتشارات غیرمستقیم گازهای گلخانه‌ای در تصفیه‌خانه بررسی شده بر اساس ازت کل، BOD حذف شده و برق مصرفی (برحسب $tCO_2e/year$)

Table 3. Amounts of carbon footprint and indirect emissions of greenhouse gases in the investigated treatment plant based on total nitrogen, BOD removed and electricity consumption (in terms of $tCO_2e/year$)

Flow of wastewater treatment plant (No sludge processing)	Anually treated wastewater (m^3)	Removed COD (mg/L)	Removed COD (kg/year)	Total GHG emission (IPCC)	Total GHG emission (Wang)	Emission of CO_2×	Emission of CH_4** (IPCC)	Emission of CH_4*** (Wang)	Emission of N_2O (IPCC)	Emission of N_2O (Wang)
Min.	5077440	467.88	2375632.6	3107.7	1434.15	1330.3	409.8	38.25	1367.6	65.6
Mean	6192000	467.88	2897112.9	3790.1	1749.14	1622.4	499.8	46.64	1667.9	80.1
Max	7306560	467.88	3418593.3	4472.2	2063.94	1914.4	589.7	55.04	1968.1	94.5

* Assuming the emission of 560g of carbon dioxide per kg of COD removed
** 5.7g of methane per kg of COD removed based on IPCC 2019
*** 0.7 g of methane per kg of COD removed based on (Wang, 2022)
Methane and N_2O are equated with CO_2 by multiplying the values by 23 and 296, respectively.

در تصفیه‌خانه بررسی شده در واحد هوادهی سطحی حوضچه‌های هوادهی لجن فعال است. این رقم ۱۵ درصد بیشتر از عدد اعلام شده توسط کاپوداگلیو و اولسون است (Capodaglio and Olsson, 2019). دلیل این تفاوت عموماً مربوط به عدم استفاده از تأسیسات فراوری لجن در تصفیه‌خانه مورد بررسی است. باید در نظر داشت که کل نیاز انرژی در یک تصفیه‌خانه فاضلاب متغیر است و به عوامل مختلفی از جمله سن تصفیه‌خانه، اندازه آن (بار آلی و هیدرولیکی، معادل جمعیت)، فرایند تصفیه اعمال شده، سیستم هوادهی نصب شده و الزامات کیفیت پساب بستگی دارد (Bodik and Kubaska, 2013).

حدود سختگیرانه تخلیه، منجر به مصارف بیشتر برق و مواد شیمیایی به منظور دستیابی به غلظت مجاز مواد مغذی در پساب می‌شود (Rahman et al., 2016). علاوه بر این، واحدهای تصفیه پیشرفته که در موارد استفاده مجدد از فاضلاب شهری پس از تصفیه موردنیاز هستند، مصرف انرژی تصفیه‌خانه فاضلاب را افزایش می‌دهند (Opher and Friedler, 2016).

در تصفیه‌خانه فاضلاب بررسی شده عملاً فراوری خاصی بر روی لجن تولید شده انجام نمی‌شود، بنابراین سهم انرژی مربوط به فراوری لجن ناچیز است. همچنین حذف ازت نیز مدنظر نبوده، بنابراین واحدی برای انجام نیتریفیکاسیون و دنیتریفیکاسیون نیز وجود ندارد، همچنین انرژی خاصی نیز برای این منظور مصرف نمی‌شود. داده‌های موجود نشان می‌دهد که در یک تصفیه‌خانه فاضلاب متعارف، هوادهی مایع مخلوط، بیشترین مصرف انرژی را دارد. به‌طوری که یک سیستم لجن فعال متعارف میزان ۵۰ تا ۶۰ درصد از کل برق مصرفی را به خود اختصاص می‌دهد و تصفیه لجن به ۱۵ تا ۲۵ درصد انرژی نیاز دارد. از طرفی تهنشینی ثانویه با پمپ‌های گردش مجدد به میزان ۱۵ درصد انرژی مصرف می‌کند (Mamais et al., 2015).

در مورد تصفیه‌خانه فاضلابی که از فرایندهای بیولوژیکی پیشرفته، از جمله حذف مواد مغذی و فیلتراسیون استفاده می‌کند، تقاضای انرژی می‌تواند ۱/۵ برابر بیشتر از سیستم‌های لجن فعال متداول باشد. در مواردی که از فناوری‌های پیشرفته تصفیه برای تصفیه ثالثیه استفاده می‌شود، مصرف انرژی می‌تواند به‌طور قابل توجهی افزایش یابد (Panepinto et al., 2016).

در تصفیه‌خانه فاضلاب بررسی شده مقدار انتشارات مستقیم و غیرمستقیم تقریباً نزدیک به هم است. با این حال گزارش شده که انتشارات مستقیم در طی تصفیه فاضلاب سهم بیشتری در ردپای کربن و به ویژه در انتشار اکسید نیتروس (N_2O) دارد (Gustavsson and Tumlin, 2013).

اکسید نیتروس می‌تواند طی دو فرایند بیولوژیکی حذف نیتروژن، یعنی نیتریفیکاسیون و دنیتریفیکاسیون تولید شود و این واقعیت که GWP آن در یک بازه زمانی ۱۰۰ ساله حدود ۲۶۵ برابر بیشتر از CO_2 است، نقش آن را در ردپای کربن تصفیه‌خانه فاضلاب برجسته می‌کند (Change, 2014).

dx.doi.org/10.22093/wwj.2023.367486.3297

با توجه به عدم استفاده از واحد نیترات‌زدایی به نظر نمی‌رسد در تصفیه‌خانه فاضلاب بررسی شده انتشار N_2O نقش مهمی در گازهای گلخانه‌ای داشته باشد و همین موضوع دلیلی بر مشابهت انتشارات مستقیم و غیرمستقیم است. علی‌رغم اهمیت انتشار مستقیم گازهای گلخانه‌ای، اندازه‌گیری‌های محدودی در محل وجود دارد و در بیشتر پژوهش‌ها از یک روش تخمینی مبتنی بر فاکتورهای انتشار که برگرفته از متون مختلف است، استفاده می‌شود (Parravicini et al., 2016).

با این حال، در واقع استفاده از فاکتورهای انتشار مربوط به فناوری‌های مختلف تصفیه فاضلاب، یا استفاده از فاکتورهای پیش‌فرض برای تحلیل مدل، می‌تواند به نتایج غیرقابل اعتمادی برای ارزیابی کل ردپای کربن تصفیه‌خانه فاضلاب منجر شود. بسیاری از پژوهش‌ها بر کاهش ردپای کربن تصفیه‌خانه‌های فاضلاب تمرکز دارند که هدف اصلی آن کاهش مصرف انرژی است (Maktabifard et al., 2020).

در تصفیه‌خانه مورد بررسی بالغ بر ۹۴/۶ درصد انرژی توسط پمپ‌ها و هواده‌های سطحی مصرف می‌شود که لازم است دقت و تمرکز لازم در این خصوص متمرکز شود. بررسی‌ها در این پژوهش نشان داد که پمپ‌های استفاده شده برای لیفت فاضلاب در ورودی تصفیه‌خانه بررسی شده قدیمی بوده و ظرفیت آنها به‌طور مناسب انتخاب نشده است. همچنین هواده‌های سطحی نیز قدیمی و با کارایی پایینی بوده و نیازمند بازنگری هستند. استفاده از اینورتر می‌تواند مصرف برق در فرایند تصفیه فاضلاب را به شدت کاهش دهد. پایش آنلاین به وسیله حسگرها با هدف تنظیم زمان ایده‌آل هوادهی، منجر به افزایش ظرفیت تصفیه و دستیابی به کاهش در مصرف انرژی به میزانی بیش از ۴۰ درصد می‌شود (Panepinto et al., 2016).

مؤسسه تحقیقات انرژی الکتریکی[1] تخمین زده که با بهینه‌سازی در فرایندهای سیستم، به‌عنوان مثال با اصلاح عملکرد پمپ‌ها و هوادهی و انجام پایش می‌توان به صرفه‌جویی ۱۰ تا ۲۰ درصدی در مصرف انرژی دست یافت (Copeland and Carter, 2014). باید توجه شود که انرژی موردنیاز در یک تصفیه‌خانه فاضلاب به میزان زیادی توسط فناوری تصفیه مورد استفاده و حداکثر مجاز پارامترهای کیفی پساب تعیین می‌شود. در نهایت، تأثیر اندازه تصفیه‌خانه فاضلاب بر مصرف کل انرژی قابل توجه است، به‌طوری که افزایش اندازه آن منجر به کاهش مصرف برق آن واحد می‌شود (Goldstein and Smith, 2002).

یک نکته مهم این است که استراتژی تصفیه فاضلاب با نگاهی صرف به حذف آلاینده‌ها بدون در نظر گرفتن نیازهای انرژی راه‌حل پایداری نیست. در طول بیش از یک دهه گذشته، این نگرش تغییر کرده و چندین شاخص بهره‌وری انرژی برای بخش آب، از جمله تصفیه فاضلاب، توسعه پیدا کرده و اتخاذ شده است (Molinos-Senante et al., 2015).

این امر توسط دستورالعمل اتحادیه اروپا با شماره EC/۲۸/۲۰۰۹ توصیه شده که اهداف انرژی را برای کشورهای عضو با کاهش ۲۰ درصدی GHG، تأمین ۲۰ درصد از انرژی از منابع تجدیدپذیر و افزایش ۲۰ درصدی در بهره‌وری انرژی تعیین کرده است. مورد مهم دیگری که در تصفیه‌خانه فاضلاب بررسی شده می‌تواند از دیدگاه انرژی مورد توجه قرار گیرد، عدم فراوری لجن و استفاده از هضم بی‌هوازی برای تولید انرژی است. اصولاً فاضلاب شامل مقدار قابل‌توجهی از انرژی شیمیایی، حرارتی و کینتیکی (جنبشی) است و گزارش شده که میزان انرژی شیمیایی موجود در فاضلاب، منبع قابل‌توجهی از انرژی تجدیدپذیر است که از طریق هضم بی‌هوازی لجن بازیابی و منجر به تولید بیوگاز می‌شود (Kaszycki et al., 2021).

بیوگاز متعاقباً با استفاده از یک موتور ترکیبی حرارت و قدرت[2]، برای کمک به تولید برق یا گرما استفاده می‌شود. اجزای اصلی بیوگاز شامل متان (CH_4) و دی‌اکسید کربن (CO_2) است که به ترتیب درصدهای حجمی ۴۰ تا ۷۵ و ۱۵ تا ۶۰ درصد را تشکیل می‌دهند و حذف CO_2 برای افزایش محتوای انرژی بیوگاز بسیار حائز اهمیت است (Baciocchi et al., 2013).

فاضلاب علاوه بر انرژی شیمیایی موجود، مقدار قابل‌توجهی از انرژی حرارتی را نیز در بر می‌گیرد. این واقعیت که فاضلاب دارای دمایی پایدار است می‌تواند آن را به منبعی از انرژی تبدیل کند که کار خنک‌سازی در تابستان و تأمین گرما در زمستان را انجام دهد.

[1] Electric Power Research Institute (EPRI)

[2] Combined Heat and Power (CHP)

چون انتقال فاضلاب در داخل لوله‌ها انجام می‌شود و دمای محیط تأثیر ناچیزی بر روی دمای فاضلاب دارد (Procter et al., 2016).

پتانسیل انرژی حرارتی فاضلاب برای کارکرد پمپ‌های حرارتی به ویژه در محل و عمدتاً در عملیات تصفیه‌خانه فاضلاب مانند گرمایش ساختمان‌ها و خشک کردن لجن که به گرما نیاز دارند، ایده‌آل است. علاوه بر این، می‌توان از آن در مناطق مجاور که به انرژی سرمایشی یا گرمایشی نیاز دارند استفاده کرد (Hao et al., 2019).

در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب هزینه برقی که پرداخت می‌شود طبق میزان مصرف انرژی الکتریکی برحسب کیلووات ساعت محاسبه می‌شود که در محاسبات بهای انرژی در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب ساعات کم‌باری، میان‌باری و اوج بار مطرح می‌شود. به نظر می‌رسد تعرفه پایین برق در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب (تعرفه کشاورزی) باعث شده که فعلاً صرفه‌جویی در مصرف انرژی به دلیل هزینه کم آن، چندان مورد توجه قرار نگیرد. لازم است مصرف انرژی در همه تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری کشور به صورت فنی و جدی مورد ممیزی و اصلاح قرار گیرد. مدل‌های متعددی برای اندازه‌گیری GHG و پیشنهاد کمّی‌سازی توسعه داده شد و پژوهش‌های موجود به بررسی رابطه بین GHG و هزینه عملیاتی[1] می‌پردازد که یکی از مهم‌ترین شاخص‌ها برای تصمیم‌گیرندگان است هر چند پارامترهای دیگری از جمله کیفیت پساب و کل اثرات محیط‌زیستی می‌توانند بر استراتژی‌های کنترل تأثیر بگذارند. در این میان مشخص شده که ارزیابی چرخه حیات، ارزیابی کلی بهتری از تصفیه‌خانه‌های فاضلاب ارائه می‌کند (Nguyen et al., 2020).

۵- نتیجه‌گیری

موضوع همبست انرژی و ردپای کربن در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب در ایران چندان مورد توجه قرار نگرفته است. این پژوهش، کوششی در این راستا بود و در یک تصفیه‌خانه فاضلاب شهری با مقیاس متوسط در منطقه شمال‌غرب کشور انجام شد. بر اساس این پژوهش در تصفیه‌خانه فاضلاب بررسی شده به دلیل عدم بهره‌گیری از واحدهای فراوری لجن (تغلیظ، هضم، آب‌گیری) و نیز عدم وجود واحدهای نیتریفیکاسیون و دنیتریفیکاسیون، بیشترین انتشارات ناشی از تبدیل مواد کربنه (BOD) بود. همچنین بیشترین مصرف انرژی نیز مربوط به هواده‌های سطحی واحد لجن فعال و پمپاژ فاضلاب ورودی و خط برگشت لجن بود. بخشی از این موضوع ناشی از قدیمی بودن طراحی و نیز به روز نبودن تجهیزات مورد استفاده بود. لازم است در پمپ‌های لیفت فاضلاب، اسکروپمپ لجن برگشتی و هواده‌های سطحی اصلاحات لازم از نظر طراحی و تعویض پمپ‌ها و هواده‌ها و استفاده از اینورتر برای موتورهای الکتریکی و کاهش مصرف برق راکتیو انجام شود. تعرفه پایین برق در تصفیه‌خانه فاضلاب (تعرفه کشاورزی) باعث شده تا فعلاً موضوع صرفه‌جویی در مصرف انرژی دارای اولویت آنچنانی نباشد. با توجه به برنامه‌های موجود در توسعه تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری در سطح کشور توصیه می‌شود انجام ممیزی انرژی در تصفیه‌خانه‌های موجود و توجه به همسبت انرژی و ردپای کربن در این بخش به‌ویژه احداث تصفیه‌خانه‌های جدید به‌طور جدی مورد توجه قرار گیرد.

۶- قدردانی

این پژوهش، بخشی از نتایج رساله دکترا در رشته مهندسی محیط‌زیست دانشگاه تهران بود که بدون دریافت هر گونه مساعدت مالی انجام شد. به‌این‌وسیله نویسندگان، قدردانی خود را از کلیه افرادی که در تهیه و گردآوری اطلاعات موردنیاز، تیم پژوهشی را همراهی و یاری کردند به‌ویژه آقای مهندس کلانتری اعلام می‌کنند.

[1] Operating Costs (OC)

References

Baciocchi, R., Carnevale, E., Costa, G., Gavasci, R., Lombardi, L., Olivieri, T., et al. 2013. Performance of a biogas upgrading process based on alkali absorption with regeneration using air pollution control residues. *Waste Management*, 33, 2694-2705. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.08.022.

Bodik, I. & Kubaska, M. 2013. Energy and sustainability of operation of a wastewater treatment plant. *Environment Protection Engineering*, 39, 15-24. [Link]

Capodaglio, A. G. & Olsson, G. 2019. Energy issues in sustainable urban wastewater management: use, demand reduction and recovery in the urban water cycle. *Sustainability*, 12**,** 266. https://doi.org/10.3390/su12010266.

Chai, C., Zhang, D., Yu, Y., Feng, Y. & Wong, M. S. 2015. Carbon footprint analyses of mainstream wastewater treatment technologies under different sludge treatment scenarios in China. *Water*, 7**,** 918-938. https://doi.org/10.3390/w7030918.

Change, I. C. 2014. Mitigation of climate change. *Contribution of Working Group III to the 5th Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Turkey, 1454**,** 147.

Copeland, C. & Carter, N. T. 2014. Energy-water nexus: the water sector's energy use. *Congressional Research Service*, Washington DC, USA. [Link]

Demir, Ö. & Yapıcıoğlu, P. 2019. Investigation of GHG emission sources and reducing GHG emissions in a municipal wastewater treatment plant. *Greenhouse Gases: Science and Technology*, 9**,** 948-964. https://doi.org/10.1002/ghg.1912.

Drewnowski, J., Remiszewska-Skwarek, A., Duda, S. & Łagód, G. 2019. Aeration process in bioreactors as the main energy consumer in a wastewater treatment plant. Review of solutions and methods of process optimization. *Processes*, 7(5)**,** 311. https://doi.org/10.3390/pr7050311.

Goldstein, R. & Smith, W. 2002. US electricity consumption for water supply & treatment-the next half century. *Water and Sustainability*, 4. [Link]

Gustavsson, D. & Tumlin, S. 2013. Carbon footprints of Scandinavian wastewater treatment plants. *Water Science and Technology*, 68**,** 887-893. https://doi.org/10.2166/wst.2013.318.

Hao, X., Wang, X., Liu, R., Li, S., Van Loosdrecht, M. C. & Jiang, H. 2019. Environmental impacts of resource recovery from wastewater treatment plants. *Water Research*, 160**,** 268-277. https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.05.068.

Harvey, L. D. 2018. *Global Warming*, Routledge, Oxford, UK.

Kaszycki, P., Głodniok, M. & Petryszak, P. 2021. Towards a bio-based circular economy in organic waste management and wastewater treatment–the polish perspective. *New Biotechnology*, 61**,** 80-89. https://doi.org/10.1016/j.nbt.2020.11.005.

Lin, L. 2020. Carbon emission assessment of wastewater treatment plant based on accounting perspective. *E3S Web of Conferences*, *EDP Sciences*, 04049. [Link]

Maktabifard, M., Zaborowska, E. & Makinia, J. 2020. Energy neutrality versus carbon footprint minimization in municipal wastewater treatment plants. *Bioresource Technology*, 300**,** 122647. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122647.

Mamais, D., Noutsopoulos, C., Dimopoulou, A., Stasinakis, A. & Lekkas, T. 2015. Wastewater treatment process impact on energy savings and greenhouse gas emissions. *Water Science and Technology*, 71**,** 303-308. https://doi.org/10.2166/wst.2014.521.

Meng, F., Liu, G., Liang, S., Su, M. & Yang, Z. 2019. Critical review of the energy-water-carbon nexus in cities. *Energy*, 171**,** 1017-1032. https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.01.048.

Molinos-Senante, M., Hanley, N. & Sala-Garrido, R. 2015. Measuring the CO_2 shadow price for wastewater treatment: a directional distance function approach. *Applied Energy*, 144**,** 241-249. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.02.034.

Nguyen, T., Ngo, H., Guo, W., Chang, S., Nguyen, D., Nghiem, L., et al. 2020. A critical review on life cycle assessment and plant-wide models towards emission control strategies for greenhouse gas from wastewater treatment plants. *Journal of Environmental Management*, 264**,** 110440. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110440.

Opher, T. & Friedler, E. 2016. Comparative LCA of decentralized wastewater treatment alternatives for non-potable urban reuse. *Journal of Environmental Management*, 182**,** 464-476. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.07.080.

Pahunang, R. R., Buonerba, A., Senatore, V., Oliva, G., Ouda, M., Zarra, T., et al. 2021. Advances in technological control of greenhouse gas emissions from wastewater in the context of circular economy. *Science of The Total Environment*, 792**,** 148479. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148479.

Panepinto, D., Fiore, S., Zappone, M., Genon, G. & Meucci, L. 2016. Evaluation of the energy efficiency of a large wastewater treatment plant in Italy. *Applied Energy*, 161**,** 404-411. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.027.

Parravicini, V., Svardal, K. & Krampe, J. 2016. Greenhouse gas emissions from wastewater treatment plants. *Energy Procedia*, 97**,** 246-253. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.10.067.

Procter, A. C., Kaplan, P. Ö. & Araujo, R. 2016. Net Zero Fort Carson: integrating energy, water, and waste strategies to lower the environmental impact of a military base. *Journal of Industrial Ecology*, 20**,** 1134-1147. https://doi.org/10.1111/jiec.12359.

Rahman, S. M., Eckelman, M. J., Onnis-Hayden, A. & Gu, A. Z. 2016. Life-cycle assessment of advanced nutrient removal technologies for wastewater treatment. *Environmental Science and Technology*, 50**,** 3020-3030. https://doi:10.1021/acs.est.5b05070.

Rashidi, H., Ghaffarianhoseini, A., Ghaffarianhoseini, A., Sulaiman, N. M. N., Tookey, J. & Hashim, N. A. 2015. Application of wastewater treatment in sustainable design of green built environments: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49**,** 845-856. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.104.

Snip, L. 2010. Quantifying the greenhouse gas emissions of wastewater treatment plants. *Environmental Sciences Netherlands*, 8-13. [Link]

Strutt, J., Wilson, S., Shorney-Darby, H., Shaw, A. & Byers, A. 2008. Assessing the carbon footprint of water production. *Journal-American Water Works Association*, 100, 80-91. https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.2008.tb09654.x.

Wang, D., Ye, W., Wu, G., Li, R., Guan, Y., Zhang, W., et al. 2022. Greenhouse gas emissions from municipal wastewater treatment facilities in China from 2006 to 2019. *Scientific Data*, 9. https://doi.org/10.1038/s41597-022-01439-7.

Zib Iii, L., Byrne, D. M., Marston, L. T. & Chini, C. M. 2021. Operational carbon footprint of the US water and wastewater sector's energy consumption. *Journal of Cleaner Production*, 321**,** 128815. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128815.

© The Author(s)
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License