

فرآیند تصفیه فاضلاب و تأثیر آن بر صرفه جویی در انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای

شرکت تامین تجهیزات تصفیه

نویسندگان

D. Mamias

C. Noutsopoulos

مترجم: ملیکا خامنه

2024-1403

چکیده

هدف از این تحقیق، ارزیابی مصرف انرژی در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب، اعمال یک مدل ریاضی برای ارزیابی رد پای کربن در آن‌ها و پیشنهاد استراتژی‌های صرفه‌جویی در انرژی برای کاهش مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای (GHG) در یونان بود. این مطالعه بر روی 10 تصفیه‌خانه فاضلاب در یونان با ظرفیت تصفیه از 10,000 تا 4,000,000 معادل جمعیت (PE) متمرکز بود. بر اساس نتایج، مصرف ویژه انرژی سالانه از 86 - 15 kWh/PE متغیر بود. بیشترین مصرف انرژی در تمامی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب مربوط به فرآیند هوادهی بود که 40-75 % از کل انرژی مورد نیاز را شامل می‌شد. انتشار گازهای گلخانه‌ای سالانه بر اساس روش تصفیه به‌کار گرفته شده، به طور قابل توجهی متفاوت و بین 161 - 61 kgCO_{2e}/PE متغیر بود. بیشترین میزان انتشار CO₂ در سیستم‌های هوادهی گسترده و کمترین در سیستم‌های لجن فعال متعارف مشاهده شد. استراتژی‌های کلیدی که صنعت فاضلاب می‌تواند برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای اتخاذ کند، شناسایی و مورد بحث قرار گرفتند. یک مطالعه موردی ارائه شد تا استراتژی‌های بالقوه برای صرفه‌جویی در انرژی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای را نشان دهد. با توجه به نتایج، فرض بر این است که کاهش نقاط تنظیم اکسیژن محلول (DO) و زمان نگهداری لجن می‌تواند صرفه‌جویی قابل توجهی در انرژی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای به همراه داشته باشد.

مقدمه

مدیریت سنتی فاضلاب شهری در بسیاری از کشورهای اروپایی عمدتاً به مسائل بهداشت عمومی و محیط‌زیستی مرتبط با ذخیره سازی، تصفیه و دفع فاضلاب می‌پردازد. در نتیجه، در بسیاری از موارد مدیریت فاضلاب شهری به صورت ناپایدار انجام شده است و از روش‌های تصفیه‌ای استفاده می‌شود که مصرف انرژی بالایی دارند، رد پای کربنی بزرگی به جا می‌گذارند و باعث تغییرات اقلیمی قابل توجهی می‌شوند. در ایالات متحده، میانگین مصرف انرژی ویژه سالانه در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب حدود 29 kWh/PE و در محدوده 16 - 71 kWh/PE متغیر است. (طبق گزارش Stillwell و همکاران، 2010). در اروپا مصرف انرژی ویژه سالانه در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب بین 120 kWh/PE تا 20 گزارش شده است. طبق گزارش Jonasson (2010) مصرف انرژی ویژه سالانه در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب در بریتانیا، سوئد و اتریش به ترتیب حدود 38، 42 و 23 kWh/PE است، در حالی که Balmer (2000) گزارش‌های مشابهی برای پنج تصفیه‌خانه فاضلاب در کشورهای نوردیک ارائه کرده است (31-47/2 kWh/PE).

به طور مشابه، Krampe (2013) گزارش داد که مصرف انرژی ویژه سالانه در ۱۱ تصفیه‌خانه فاضلاب در جنوب استرالیا بین ۳۰ تا ۱۲۰ kWh/PE متغیر بوده که میانگین آن حدود ۶۰ kWh/PE است. این مقادیر با German Guide

Manual قابل مقایسه است که هدف بهینه سازی انرژی را بسته به اندازه تصفیه‌خانه، حدود 30 - 20 kWh/PE تعیین می‌کند (Krampe، 2013). در اکثر تصفیه‌خانه‌های فاضلاب متوسط و بزرگ که از سیستم‌های لجن فعال برای تصفیه ثانویه استفاده می‌کنند، فرآیند هوادهی معمولاً حدود ۵۰-۶۰٪ از کل مصرف برق را شامل می‌شود، و پس از آن تصفیه لجن (۲۵-۱۵٪) و ته‌نشینی ثانویه به همراه پمپ‌های ری‌سیرکولاتور (۱۵٪) قرار دارند.

تصفیه‌خانه‌های فاضلاب به طور گسترده‌ای به عنوان یکی از منابع اصلی انتشار گازهای گلخانه‌ای در صنعت آب شناخته شده‌اند (آژانس حفاظت از محیط زیست ایالات متحده، US EPA). تصفیه‌خانه‌های فاضلاب به طور مستقیم دی‌اکسید کربن (CO_2)، نیتروژن اکسید (N_2O) و متان را به عنوان محصول فرآیند تصفیه تولید می‌کنند و علاوه بر آن، از طریق مصرف انرژی نیز باعث انتشار CH_4 و CO_2 می‌شوند. مطالعاتی برای برآورد انتشار گازهای گلخانه‌ای از تصفیه‌خانه‌های فاضلاب انجام شده است (Cakir و Stenstrom، ۲۰۰۵؛ Sahely و همکاران، ۲۰۰۶). مقادیر گزارش‌شده انتشار گازهای گلخانه‌ای از تصفیه‌خانه‌های فاضلاب با سیستم لجن فعال متعارف همراه با حذف مواد مغذی، در محدوده $0/9 - 2/2 \text{ kgCO}_2\text{e/m}^3$ بوده است (Flores-Alsina و همکاران، 2011). علاوه بر این، Gustavsson و Tumlin (۲۰۱۳) مقادیر انتشار سالانه گازهای گلخانه‌ای در محدوده $108 - 7 \text{ kgCO}_2\text{e/PE}$ را برای ۱۶ تصفیه‌خانه فاضلاب در کشورهای اسکاندیناوی گزارش کرده‌اند. طبق گفته آن‌ها، بزرگترین عامل تولید گازهای گلخانه‌ای انتشار N_2O از فرآیندهای تصفیه فاضلاب بوده است. با توجه به این مطالب، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای به روشی مقرون‌به‌صرفه بدون تخریب کیفیت پساب خروجی، چالشی بزرگ برای اپراتورهای تصفیه‌خانه‌های فاضلاب به شمار می‌رود. نشان داده شده است که با اجرای استراتژی‌های کنترلی خاص، می‌توان کاهش قابل توجهی در انتشار گازهای گلخانه‌ای به دست آورد (Flores Alsina و همکاران، 2011؛ Sweetapple و همکاران، 2014).

اهداف این تحقیق شامل جمع‌آوری داده‌ها در مورد مصرف انرژی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب، توسعه یک مدل ریاضی برای ارزیابی انتشار گازهای گلخانه‌ای در محل و خارج از محل، و پیشنهاد استراتژی‌هایی برای صرفه‌جویی در انرژی است که بتوان آن‌ها را جهت کاهش مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای در یونان اجرا کرد. برای دستیابی به این اهداف، داده‌های مربوط به عملکرد و مصرف برق از ۱۰ تصفیه‌خانه فاضلاب در یونان جمع‌آوری شد. این تصفیه‌خانه‌ها با ظرفیت تصفیه‌ای از PE ۴,۰۰۰,۰۰۰ - ۱۰,۰۰۰ از روش‌های تصفیه مختلفی استفاده می‌کردند که شامل سیستم‌های لجن فعال متعارف با هضم لجن بی‌هوازی، سیستم‌های لجن فعال با حذف مواد مغذی و هضم لجن بی‌هوازی بود. علاوه بر این، یک تحلیل انرژی دقیق برای تصفیه‌خانه فاضلاب سیتالیا (Psytalia)، بزرگترین تصفیه‌خانه فاضلاب در یونان که منطقه شهری آتن با جمعیتی در حدود ۴ میلیون نفر را تحت پوشش قرار می‌دهد، انجام شد تا تغییرات عملیاتی نسبتاً ساده‌ای که می‌تواند صرفه‌جویی در انرژی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای را با هزینه‌ای قابل توجیه به همراه داشته باشد، اعمال و ارزیابی شود.

مواد و روش‌ها

مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب

داده‌های عملیاتی از ۱۰ تصفیه‌خانه فاضلاب با حذف مواد مغذی زیستی (BNR) در یونان با ظرفیت تصفیه‌ای از ۴,۰۰۰,۰۰۰ - ۱۵,۰۰۰ جمع‌آوری شد. تمامی تصفیه‌خانه‌ها معیارهای اکسیژن مورد نیاز بیوشیمیایی (BOD_5)، مواد جامد معلق کل (TSS) و نیتروژن کل (TN) تعیین‌شده توسط دستورالعمل ۹۱/۲۷۱ اتحادیه اروپا را برای پساب خروجی برآورده کردند. جدول 1 ظرفیت تصفیه، متوسط جریان ورودی و نوع تصفیه هم برای فاضلاب و هم برای لجن در هر یک از ۱۰ تصفیه‌خانه فاضلاب نشان می‌دهد.

جدول 1. ظرفیت تصفیه، جریان ورودی و مشخصات عملیاتی تصفیه‌خانه‌های مورد ارزیابی

WWTPs	Treatment capacity (PE)	Current loading (PE)	Type of treatment (category)	Sludge age (d)	Type of aeration ^a	Total installed power (kW)
WWTP 1	88,000	78,000	1 ^{a,c}	31	DS	1,390
WWTP 2	55,600	60,000	1 ^a	52	SA	584
WWTP 3	127,000	45,000	1 ^a	37	SA	1,718
WWTP 4	20,000	13,400	1 ^a	29	SA	414
WWTP 5	56,000	47,500	1 ^a	18.5	SA	433
WWTP 6	186,700	180,000	2 ^{b,c}	18	DS	2,106
WWTP 7	107,000	106,000	2 ^b	24	DS	1,361
WWTP 8	227,500	110,000	2 ^b	7.3	SA	2,251
WWTP 9	195,000	155,000	2 ^b	29	SA	2,216
WWTP 10	5,630,000	3,650,000	2 ^{b,d}	8	DS	34,076

^aCategory 1 refers to WWTPs consisting of preliminary works, extended aeration activated sludge system, sewage sludge thickening and dewatering units.

^bCategory 2 refers to WWTPs consisting of preliminary works, primary treatment units, conventional activated sludge system, sewage sludge treatment through thickening, anaerobic digestion and dewatering units.

^cTertiary treatment unit included.

^dCombine heat and power system to produce heat and electricity from excess biogas.

^eDS: diffusion system, SA: surface aeration.

اهداف این مطالعه ارائه داده‌هایی بود که امکان ارزیابی رابطه میان مصرف انرژی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب با فرآیند تصفیه و ظرفیت را فراهم کند، تا مراحل تصفیه‌ای که بیشترین مصرف انرژی را دارند شناسایی کند و به توسعه برنامه‌های بهینه‌سازی انرژی برای تصفیه‌خانه‌های فاضلاب کمک کند. برای هر تصفیه‌خانه، این مطالعه شامل جمع‌آوری داده‌ها از مطالعات طراحی تصفیه‌خانه، نقشه‌ها، قبوض خدماتی و فهرست تجهیزات بود تا فرآیندهای تصفیه فاضلاب و لجن به‌کاررفته و مصرف انرژی در هر مرحله از تصفیه به درستی درک شود. علاوه بر این، داده‌های عملیاتی شامل جریان‌های ورودی، اکسیژن مورد نیاز شیمیایی (COD)، BOD_5 ، TSS، TN و فسفر کل (TP)، دفع لجن، استفاده مجدد از بیوگاز (در صورت کاربرد) و

معیارهای فاضلاب خروجی جمع‌آوری شدند. داده‌های عملیاتی برای هر تصفیه‌خانه فاضلاب برای دوره‌های تابستان و زمستان جمع‌آوری شد. بر اساس این مطالعه، تصفیه‌خانه‌ها به دو دسته زیر تقسیم شدند:

• **دسته ۱ - تصفیه‌خانه‌های ۱-۵:** این دسته شامل تصفیه‌خانه‌های کوچک تا متوسط با ظرفیت تصفیه‌ی $100,000 - 15,000$ PE است. هر پنج تصفیه‌خانه فاضلاب سیستم‌های لجن فعال با هوادهی گسترده بودند و هیچ‌یک تصفیه اولیه نداشتند.

• **دسته ۲ - تصفیه‌خانه‌های ۱۰-۶:** تصفیه‌خانه‌های بزرگ با ظرفیت تصفیه‌ی PE $4,000,000 - 100,000$ که دارای تصفیه اولیه و ثانویه فاضلاب هستند. هر پنج تصفیه‌خانه‌ای که در این دسته قرار داشتند، از هضم بی‌هوازی برای تصفیه لجن و استفاده از بیوگاز برای گرمایش فرآیند هضم استفاده می‌کردند. علاوه بر این، یکی از تصفیه‌خانه‌ها (۱۰) در حال حاضر از سیستم‌های تولید همزمان حرارت و برق برای تولید گرما و برق از بیوگاز اضافی استفاده می‌کند.

برآوردهای انتشار گازهای گلخانه‌ای شامل تولید CO_2 ، CH_4 و N_2O در محل و خارج از محل بود و دو گاز آخر به واحدهای معادل CO_2 تبدیل شدند که با ضرب در ۲۳ و ۲۹۶ محاسبه شدند (IPCC، ۲۰۰۱). مدل استفاده‌شده برای محاسبه انتشار گازهای گلخانه‌ای بر اساس روش جامع پیشنهاد شده توسط Bridle و همکاران (۲۰۰۸) بود. توضیح جامع این روش در Snip (۲۰۱۰) آمده است.

عمده گازهای گلخانه‌ای که در محل در نظر گرفته شدند، از (۱) تصفیه بیولوژیکی فاضلاب، (۲) تصفیه لجن و (۳) احتراق بیوگاز برای گرمایش و تولید برق تولید شدند. انتشار گازهای خارج از محل شامل انتشار گاز از مصرف انرژی و دفع لجن بود. انتشار گازهای خارج از محل ناشی از مصرف مواد شیمیایی ناچیز در نظر گرفته شد زیرا هیچ ماده شیمیایی برای کنترل pH و دینیتریفیکاسیون استفاده نشد.

مطالعه موردی استراتژی‌های کنترلی

تصفیه‌خانه فاضلاب سیتالیا به عنوان یک مطالعه موردی انتخاب شد تا تأثیر پارامترهای عملیاتی بر مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای در آن ارزیابی شود. در آگوست ۲۰۰۴، با تکمیل فاز B، تصفیه‌خانه فاضلاب سیتالیا ارتقا یافت تا بتواند مواد مغذی را در جریان متوسط حدود $1,000,000 m^3/day$ در هوای خشک به صورت بیولوژیکی تصفیه کند. طبق الزامات پساب خروجی، مرحله تصفیه بیولوژیکی به گونه‌ای طراحی شد که کیفیت پساب خروجی با $25 mg/L$ برای BOD_5 و $10 mg/L$ برای نیترژن کل تضمین شود. واحد لجن فعال ساخته شده شامل ۱۲ بیوراکتور با حجم کلی m^3 ۲۹۸،۱۴۰ است که پس از آن ۶۴ مخزن مستطیلی ته‌نشینی نهایی با مساحت کلی m^2 ۵۲،۱۵۰ قرار دارد. هر مخزن بیوراکتور شامل یک بخش بی‌هوازی،

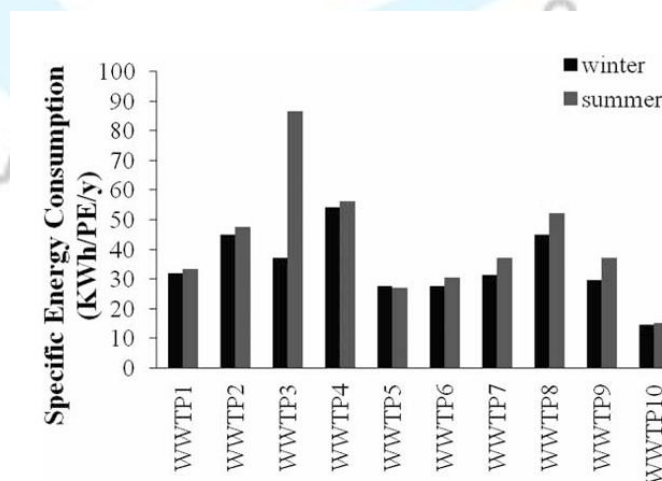
یک بخش آنوکسیک و چهار بخش هوازی است که همه دارای عمق خالص 9/4 m هستند.

تصفیه‌خانه فاضلاب سیتالیا در حال حاضر بهینه‌سازی انرژی را از طریق بازیابی انرژی الکتریکی از بیوگاز بخش هضم بی‌هوازی و با استفاده از یک سیستم انرژی کارآمد برای هوادهی که شامل انتشار حباب‌های ریز، دمنده‌هایی با درایو فرکانس-متغیر و سیستم مانیتورینگ و کنترل خودکار اکسیژن محلول است، اجرا می‌کند. در طول این مطالعه، بهبود بیشتر در بازده انرژی برای تصفیه‌خانه فاضلاب سیتالیا ارزیابی شد که شامل اقداماتی مانند بهینه‌سازی سن لجن و تنظیم نقاط غلظت DO در هر بخش هوازی بود. ارزیابی هر یک از روش‌های صرفه‌جویی انرژی از طریق شبیه‌سازی عملکرد تصفیه‌خانه با استفاده از نرم‌افزار GPS-X (یک نرم‌افزار تجاری؛ Hydromantis، کانادا) انجام شد.

نتایج و بحث

ارزیابی مصرف ویژه انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب یونان

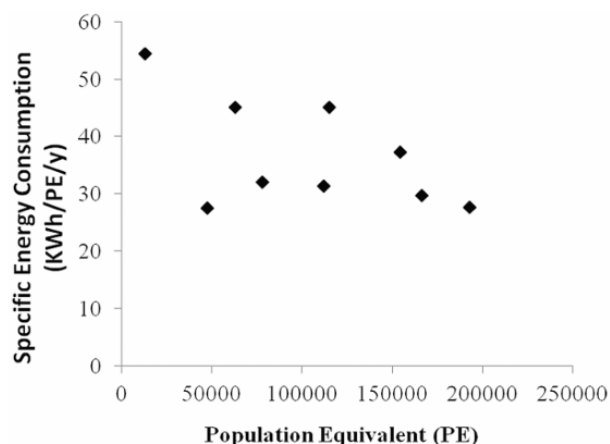
نتایج ارزیابی مصرف ویژه انرژی در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب یونان که در این مطالعه شرکت کردند، در شکل ۱ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که مصرف ویژه انرژی سالانه بین 15 - 86 kWh/PE متغیر بوده است. مصرف بیشتر انرژی که به افزایش نیاز به هوادهی به دلیل نرخ خودخوری بالاتر نسبت داده شده است، در تابستان مشاهده شد که میانگین آن 42/3 kWh/PE در مقایسه با میانگین زمستانی 34/5 kWh/PE بود.



شکل 1. مصرف انرژی در تصفیه‌خانه‌های یونان

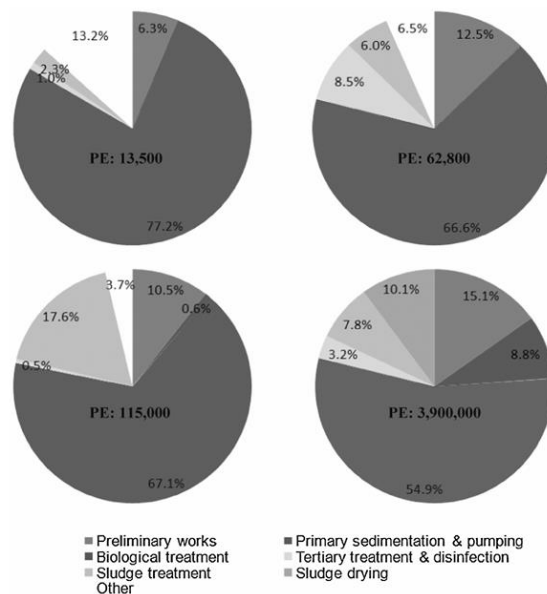
مصرف بیش‌تر انرژی به طور متوسط در تصفیه‌خانه‌های دسته ۱ (تصفیه‌خانه‌های ۱ تا ۵) در مقایسه با تصفیه‌خانه‌های لجن فعال متعارف که از هضم بی‌هوازی برای تصفیه لجن استفاده می‌کردند و بیوگاز را برای گرمایش هضم به‌کار می‌بردند (تصفیه‌خانه‌های ۶ تا ۱۰) مشاهده شد. میانگین مصرف انرژی سالانه در تصفیه‌خانه‌های دسته ۱ در یونان تقریباً 44 kWh/PE در مقایسه با 32 kWh/PE در تصفیه‌خانه‌های دسته ۲ بود. با مقایسه این دو مجموعه داده (مصرف انرژی ویژه برای دسته‌های ۱ و ۲) یک مقدار احتمال ($p\text{-value}$) برابر با $0/07$ محاسبه شد که نشان‌دهنده یک معنی‌داری آماری قابل قبول است. تصفیه‌خانه فاضلاب سیتالیا، که تنها تصفیه‌خانه‌ای بود که از تولید همزمان حرارت و برق از بیوگاز استفاده می‌کرد، کمترین مصرف انرژی سالانه را با حدود ۱۵ کیلووات ساعت به ازای هر معادل جمعیت داشت. در دسته ۱، کمترین مصرف انرژی ویژه مربوط به تصفیه‌خانه‌های ۱ و ۵ بود. قابل توجه است که تصفیه‌خانه ۱ تنها تصفیه‌خانه در دسته ۱ است که از سیستم دیفیوژن برای هوادهی استفاده می‌کند، در حالی که تصفیه‌خانه ۵ با کمترین سن لجن کار می‌کند. بالاترین مصرف انرژی ویژه برای تصفیه‌خانه‌های ۲، ۳، ۴ و ۸ ثبت شده که در جدول ۱ نشان داده شده است.

تصفیه‌خانه ۲ با بالاترین سن لجن (۵۲ روز) در میان تمام تصفیه‌خانه‌های دیگر کار می‌کند. علاوه بر این، تصفیه‌خانه‌های ۳، ۴ و ۸ بیشترین مصرف انرژی و تاسیسات برقی را در میان تمام تصفیه‌خانه‌های دیگر دارند (به ترتیب 38 kWh/PE ، ۳۱ و ۲۰، در مقایسه با میانگین 12 kWh/PE برای سایر تصفیه‌خانه‌ها). مصرف ویژه انرژی بالا در تصفیه‌خانه‌های ۳، ۴ و ۸ با استفاده از سیستم‌های هوادهی سطحی و در مورد تصفیه‌خانه ۴، با ظرفیت پایین تصفیه نیز مرتبط است. لازم به ذکر است که مصرف ویژه انرژی پایین در زمستان برای تصفیه‌خانه ۳ به دلیل افزایش بار آلی این تصفیه‌خانه با فاضلاب‌های مایع دارای کربن آلی بالا از یک واحد صنعتی است که باعث افزایش معادل جمعیت تصفیه‌خانه در زمستان می‌شود. بر اساس نتایج، این فرض مطرح می‌شود که مصرف ویژه انرژی با افزایش ظرفیت تصفیه کاهش می‌یابد (شکل ۲). این رابطه توسط چندین محقق گزارش شده است (Mizuta و Shimada، 2010؛ Krampe، 2013). علاوه بر این، مصرف انرژی ویژه به نوع سیستم هوادهی نیز وابسته است، به طوری که تصفیه‌خانه‌هایی با سیستم‌های هوادهی دیفیوژن، مصرف انرژی به‌مراتب کمتری نسبت به تصفیه‌خانه‌های با سیستم هوادهی سطحی دارند (۲۶/۵ در مقابل 40 kWh/PE).

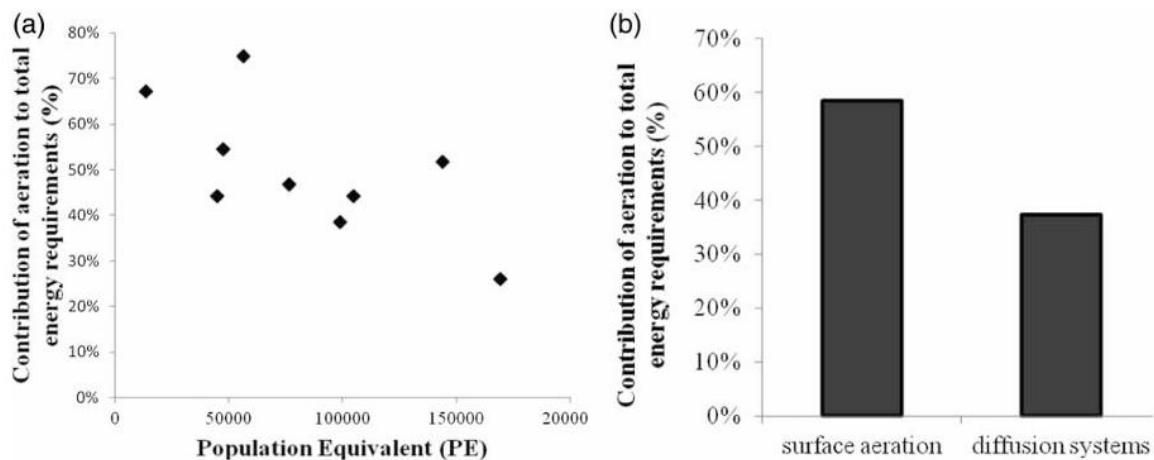


شکل 2. سهم تاثیر سن لجن در کل انتشار غیر مستقیم گازهای گلخانه ای

شکل 3 توزیع مصرف انرژی بین چندین واحد تصفیه فاضلاب و لجن را برای چهار تصفیه‌خانه نماینده نشان می‌دهد، در حالی که شکل 4 سهم هوادهی در مصرف کل انرژی را نسبت به ظرفیت تصفیه (شکل 4.a) و تأثیر نوع هوادهی (شکل 4.b) ارائه می‌کند. بر اساس این داده‌ها نتیجه می‌شود که تصفیه بیولوژیکی بیش از ۵۵ درصد از مصرف کل انرژی را به خود اختصاص می‌دهد که هوادهی به عنوان مصرف‌کننده اصلی شناخته می‌شود. واحدهای آماده‌سازی اولیه و تصفیه لجن نیز مصرف‌کنندگان قابل توجه انرژی هستند و به ترتیب حدود ۱۱ و ۸٪ از مصرف کل انرژی تصفیه‌خانه‌ها را شامل می‌شوند. سهم هوادهی در کل انرژی مورد نیاز بستگی به هر دو عامل ظرفیت تصفیه و نوع هوادهی دارد، به طوری که تصفیه‌خانه‌های کوچکتر با سیستم‌های هوادهی سطحی، مصرف انرژی بالاتری برای هوادهی دارند. نتایج محاسبه انتشار گازهای گلخانه‌ای از تصفیه‌خانه‌های فاضلاب یونان که در این مطالعه بررسی شده‌اند، در شکل 5 و شکل‌های 6 تا 9 ارائه شده است. طبق نتایج، انتشار سالانه گازهای گلخانه‌ای بین $161 - 61 \text{ kgCO}_2\text{e/PE}$ متغیر بود. مقادیر مشابهی از انتشار گازها توسط پژوهشگران دیگر نیز گزارش شده است (Gustavsson & Tumlin, 2013).



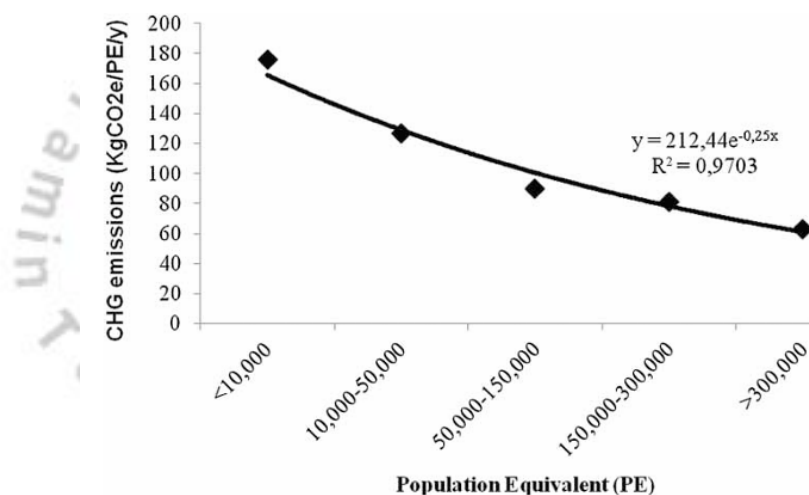
شکل 3. توزیع مصرف انرژی برای چهار تصفیه‌خانه



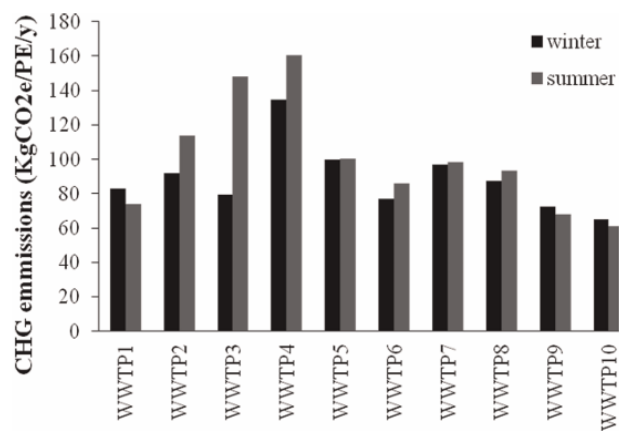
شکل 4. (a) سهم هوادهی در انرژی مورد نیاز کل و (b) تاثیر نوع هوادهی در مصرف انرژی

بر اساس داده‌های ارائه شده در شکل 5 و شکل‌های 6 تا 8، انتشار گازهای گلخانه‌ای با پیکربندی سیستم (شکل‌های 6 و 8) و ظرفیت تصفیه (شکل 5) مرتبط است. همان‌طور که در شکل 7 نشان داده شده است، تصفیه‌خانه‌های فاضلاب با هوادهی گسترده به‌طور متوسط انتشار گازهای گلخانه‌ای بیشتری نسبت به سیستم‌های لجن فعال متعارف نشان دادند. انتشار سالانه گازهای گلخانه‌ای برای تصفیه‌خانه‌های فاضلاب دسته ۱ و ۲ به ترتیب برابر با

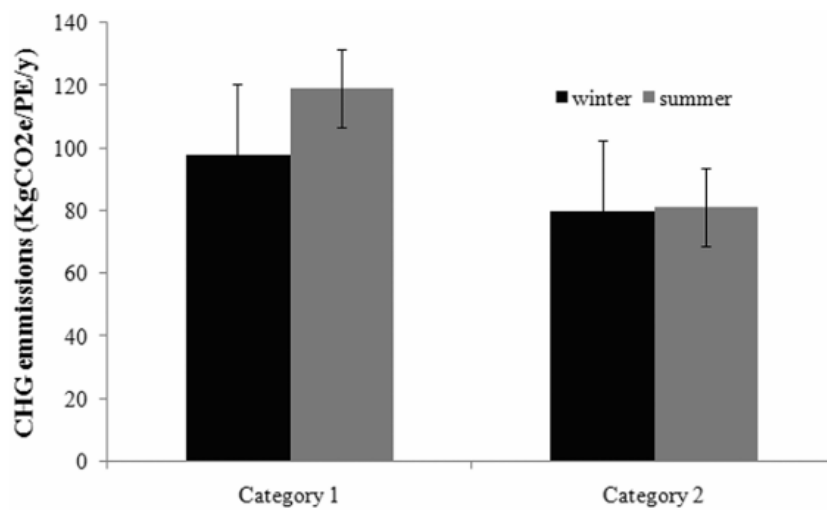
سالانه گازهای گلخانه‌ای برای دسته ۱ و ۲) یک مقدار p -value برابر با 0/03 محاسبه شد که نشان‌دهنده معنی‌داری آماری قابل قبول است. شکل 8 نشان می‌دهد که عامل اصلی ردپای کربنی در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب، انتشار مستقیم گازهای گلخانه‌ای ناشی از تصفیه فاضلاب است که بیش از ۴۵٪ از کل انتشار را تشکیل می‌دهد (بین ۴۵ تا ۵۸٪ متغیر است)، به جز تصفیه‌خانه‌های فاضلاب ۳ و ۸ که در آن‌ها هم انتشار مستقیم و هم انتشار غیرمستقیم و مرتبط با انرژی به‌طور تقریباً برابر به ایجاد ردپای کربنی کمک می‌کنند. در میان تصفیه‌خانه‌های بررسی شده، ردپای کربنی بالاتری برای تصفیه‌خانه‌های ۲، ۳، ۴ و ۵ محاسبه شد. عامل اصلی ردپای کربنی در تصفیه‌خانه ۲ انتشار مستقیم در محل به دلیل تقاضای هوادهی بیشتر به علت سن لجن بالا در سیستم لجن فعال بود، در حالی که در مورد تصفیه‌خانه ۵، سهم انتشار غیرمستقیم به دلیل افزایش تولید لجن نیز قابل توجه است. بر اساس این داده‌ها فرض می‌شود که با افزایش ظرفیت تصفیه، سهم انتشار مستقیم کاهش می‌یابد در حالی که سهم انتشار غیرمستقیم افزایش می‌یابد. علاوه بر این، همان‌طور که در شکل 9 ارائه شده است، سهم انتشار غیرمستقیم در ردپای کربنی کل با افزایش سن لجن کاهش می‌یابد.



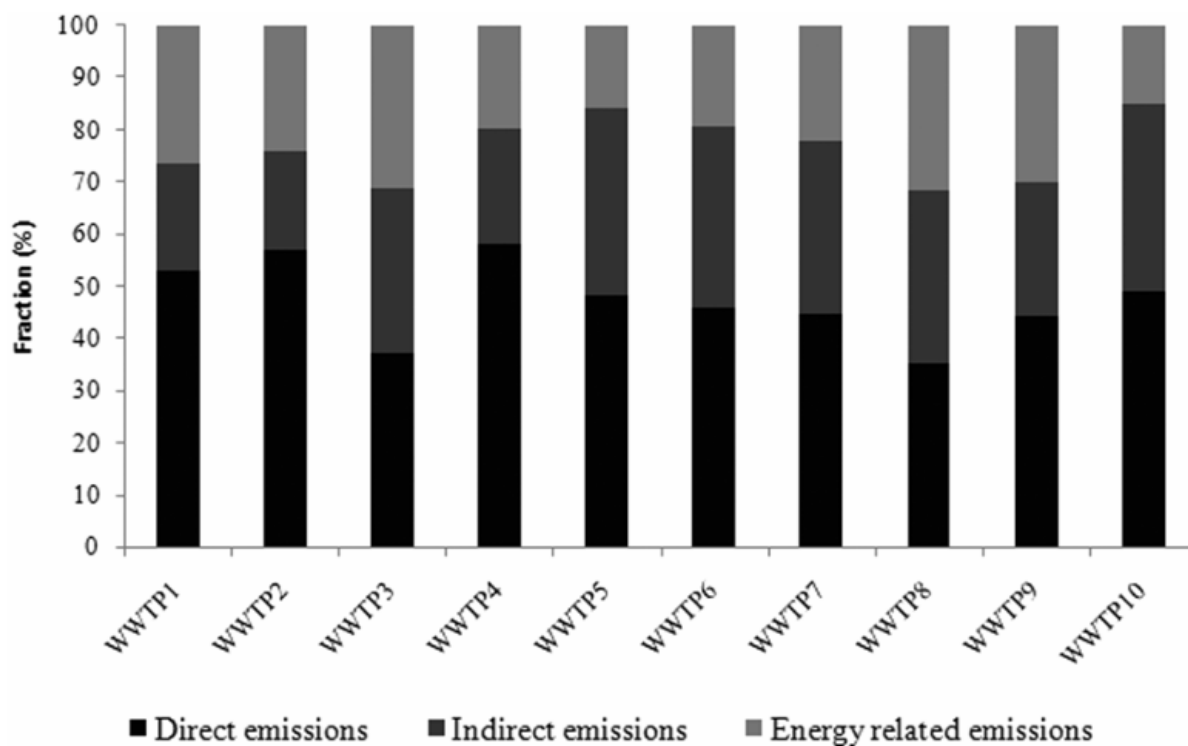
شکل 5. رابطه انتشار گازهای گلخانه‌ای با ظرفیت تصفیه‌خانه‌ها



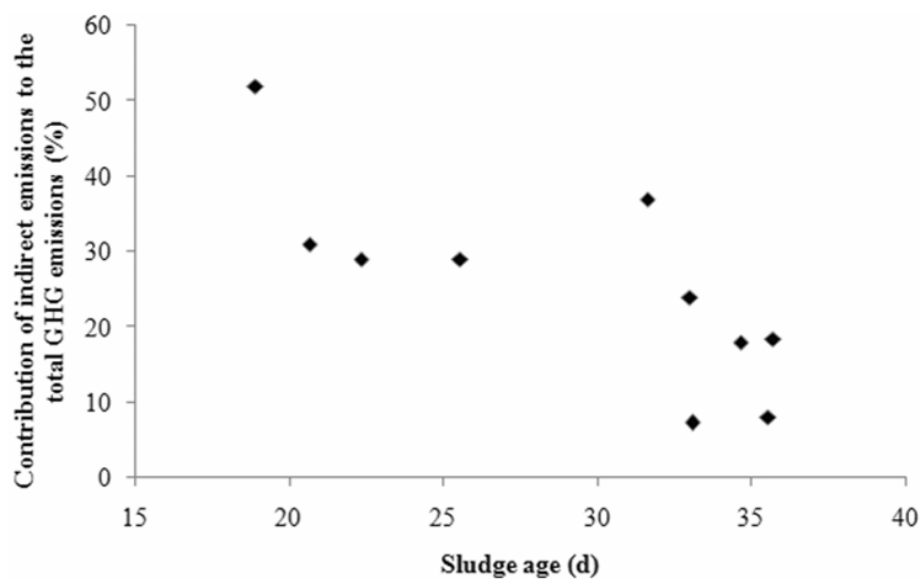
شکل 6. انتشار گازهای گلخانه‌ای در تصفیه‌خانه‌های یونان



شکل 7. میانگین انتشار گازهای گلخانه‌ای برای دسته 1 و 2



شکل 8. توزیع انتشار گازهای گلخانه‌ای در انتشار مستقیم، غیرمستقیم و مرتبط با انرژی



شکل 9. تاثیر سن لجن بر سهم انتشار غیر مستقیم در انتشار کل گازهای گلخانه‌ای

مطالعه موردی تصفیه‌خانه فاضلاب سیتالیا: ارزیابی استراتژی‌های کنترلی جایگزین

تصفیه‌خانه فاضلاب سیتالیا به‌عنوان یک مطالعه موردی انتخاب شد تا تأثیر پارامترهای عملیاتی بر مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای مورد ارزیابی قرار گیرد. بر اساس نتایج، تصفیه بیولوژیکی فاضلاب، تصفیه اولیه و خشک کردن لجن از مراحل اصلی مصرف انرژی در تصفیه‌خانه فاضلاب سیتالیا هستند که به ترتیب حدود ۵۵، ۱۵ و ۱۰٪ از کل مصرف برق تصفیه‌خانه را تشکیل می‌دهند. به همین دلیل، هوادهی و تصفیه لجن بهترین فرصت را برای صرفه‌جویی در انرژی در اختیار قرار می‌دهند. بنابراین، اقدامات عملیاتی جهت بهبود بهره‌وری انرژی که برای تصفیه‌خانه فاضلاب سیتالیا ارزیابی شدند شامل بهینه‌سازی سن لجن و تنظیم ست پوینت‌های غلظت اکسیژن در هر مخزن هوادهی بودند.

در حال حاضر، تصفیه‌خانه فاضلاب سیتالیا در ست پوینت‌های غلظت اکسیژن برای چهار مخزن هوادهی هر بیورآکتور به ترتیب برابر با ۳، ۳/۵، ۲/۵ و ۲ mg/L و سن لجن برابر با ۸/۴ روز عمل می‌کند. باید تأکید کرد که همه سناریوهای مورد بررسی توانستند به‌طور کامل با الزامات پساب تصفیه‌خانه فاضلاب سیتالیا مطابقت داشته باشند. در سناریوهای A1-A4، عملکرد تصفیه‌خانه با ست پوینت‌های غلظت اکسیژن پایین‌تر برای چهار مخزن هوادهی نسبت به مقادیر فعلی ارزیابی شد. ست پوینت‌های غلظت اکسیژن برای سناریو A1 برابر با ۳، ۲/۵، ۱/۵ و ۱/۵ mg O₂/L؛ برای سناریو A2 برابر با ۲/۵، ۲/۵، ۱/۵ و ۱/۵ mg O₂/L؛ برای سناریو A3 برابر با ۳، ۲/۵، ۱ و ۰/۵ mg O₂/L و برای سناریو A4 برابر با ۲/۵، ۲/۵، ۱ و ۱ mg O₂/L تعیین شد.

در سناریو B، واحد لجن فعال در کمترین زمان ماند مجاز جامدات (۶/۱ روز) کار می‌کند، در حالی که سناریو C ترکیبی از سناریوهای A3 و B است. نتایج به‌دست‌آمده از هر استراتژی کنترل جایگزین با توجه به میزان لجن اضافی تولید شده و صرفه‌جویی انرژی در کل تصفیه‌خانه مورد ارزیابی قرار گرفت. بر اساس نتایج (جدول ۲)، انتظار می‌رود کاهش ست پوینت‌های اکسیژن محلول به مقادیر کمتر از وضعیت فعلی، موجب کاهش قابل‌توجهی در مصرف انرژی، به میزان تا ۱۰/۱-۶٪ در صد (صرفه‌جویی سالانه در حدود ۱۴۰۰ تا ۲۹۰۰ MWh) از کل مصرف انرژی سالانه برای هوادهی شود.

جدول ۲. نتایج سناریوهای مختلف برای کاهش مصرف انرژی

Scenarios	Decrease in annual energy consumption of the aeration system (%) ^a	Total annual energy savings (MWh/year)
A1: DO set points 3, 2.5, 1.5 and 1.5 mg/L	6	1.440
A2: DO set points 2.5, 2.5, 1.5 and 1.5 mg/L	9	2.514
A3: DO set points 3, 2.5, 1.0 and 0.5 mg/L	7.1	1.814
A4: DO set points 2.5, 2.5, 1.0 and 0.5 mg/L	10.1	2.910
B: Sludge age 6.1 d and no change at current DO set points	6.2	3.700
C: Sludge age 6.7 d; DO set points 3, 2.5, 1.0 and 0.5 mg/L	11.2	4.500

^aComparisons are made with the zero scenario in which the set points of the four aerobic compartments were equal to 3.5, 3, 2.5 and 2 mg/L and sludge age was equal to 8.4 d.

یکی دیگر از اقدامات ممکن، کارکرد واحد لجن فعال در کمترین سن لجن مجاز است که موجب کاهش انرژی به میزان 6/2 % (سناریو B) می شود. برای دستیابی به صرفه جویی بیشتر در مصرف انرژی (در حدود 11/2 %)، می توان یک رویکرد ترکیبی (سناریو C) را اتخاذ کرد که هم ست پوینت های اکسیژن محلول و هم سن لجن را کاهش می دهد (صرفه جویی انرژی در حدود 4500 MWh در سال). باید توجه داشت که در هنگام اتخاذ استراتژی هایی با سن لجن کمتر، هزینه های مربوط به تصفیه و مدیریت لجن اضافی تولید شده نیز باید در نظر گرفته شود.

نتیجه گیری

نتایج نشان داد که داده های عملیاتی جمع آوری شده از ۱۰ تصفیه خانه با حذف مواد مغذی بیولوژیکی در یونان با ظرفیت های تصفیه بین PE ۴,۰۰۰,۰۰۰ - ۱۵,۰۰۰ نشان می دهد که مصرف ویژه انرژی سالانه به طور متوسط ۳۸ kWh/PE است که در محدوده 86 - 15 kWh/PE قرار دارد. همچنین، انتشار گازهای گلخانه ای سالانه به طور متوسط برابر با 94 kgCO_{2e}/PE، با محدوده ای بین 61- 161kgCO_{2e}/PE است.

اگر تعداد زیاد تصفیه خانه های فاضلاب در حال بهره برداری در اتحادیه اروپا که ظرفیت تصفیه ی بیش از ۴۰۰ میلیون PE دارند را در نظر بگیریم، صرفه جویی در انرژی و مزایای زیستمحیطی ناشی از تلاش ها برای کاهش مصرف انرژی در تصفیه خانه های فاضلاب می تواند بسیار قابل توجه باشد. از این رو، اجرای استراتژی های کنترلی مشخص برای کاهش انتشار گازهای گلخانه ای و کاهش مصرف انرژی در تصفیه خانه های فاضلاب امری ضروری است.



ترجمه

ملیکا خامنه

منابع

[Wastewater treatment process impact on energy savings and greenhouse gas emissions | Water Science & Technology | IWA Publishing \(iwaponline.com\)](#)

[WST-EM141073R1Supplement 1..6 \(silverchair-cdn.com\)](#)

