بررسی شاخص‌های زیست‌محیطی نیروگاه بیوگاز سوز تولید هم‌زمان برق و حرارت (BIO-CHP) تصفیه‌خانه‌های فاضلاب با استفاده از ارزیابی چرخه حیات (LCA)

محمد رحمتی[۱]، مجید رسولی*[۲] حسین حاجی‌آقا علی زاده[۳]

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی بیوسیستم دانشگاه بوعلی سینا (آدرس پست الکترونیک (Mohandesrahmati76@gmail.com)
۲. استادیار گروه مهندسی بیوسیستم دانشگاه بوعلی سینا (آدرس پست الکترونیک m.rasouli@basu.ac.ir)
۳. دانشیار گروه مهندسی بیوسیستم دانشگاه بوعلی سینا

چکیده

با شتاب شهرنشینی، تولید لجن شهری به‌سرعت در حال افزایش است. برای به حداقل رساندن اثرات زیست‌محیطی در خروجی تصفیه‌خانه فاضلاب، انجام تجزیه‌وتحلیل تأثیرات زیست‌محیطی و ارزیابی میزان پایداری در استراتژی‌های مختلف فنی تصفیه فاضلاب، شامل تصفیه لجن فاضلاب، بیوگاز حاصل از هضم بی‌هوازی و تولید انرژی، بر اساس ارزیابی چرخه حیات که در جهت مدیریت محیط‌زیست، امری ضروری است و در سطح بین‌المللی انجام می‌شود. مطالعه حاضر مقالات بسیاری را در راستای شناسایی و بررسی فرآیندها در تصفیه‌خانه را بررسی کرده است و اثرات زیست‌محیطی از یک نیروگاه بیوگاز مبتنی بر لجن فاضلاب است که بیشترین تأثیرات زیست‌محیطی را در سیستم تولید بیوگاز ایجاد می‌کند بیان کرده است. فرآیند تصفیه لجن فاضلاب منجر به ورود فلزات سنگین، محصولات دارویی و مراقبت شخصی به منابع آبی و خاک و همچنین تولید یک سری از گازهای گلخانه‌ای به اتمسفر می‌شود. در این مطالعه ضمن بررسی پیشینه پژوهش در سطح جهانی، روش‌های مورداستفاده جهت تجزیه‌وتحلیل نتایج آورده شده است و در ادامه ضمن تعریف مفاهیم اولیه به بسط و گسترش مفاهیم می‌پردازد. روش‌های متنوعی برای ارزیابی تأثیرات محیطی در دسترس است که می‌تواند در صورت تولید انرژی از طریق بیوگاز به‌طور بالقوه مورداستفاده قرار گیرد. برای ارزیابی این تأثیرات و آسیب‌ها از روش ارزیابی چرخه حیات[۱] در این مطالعه استفاده شد. هدف از این کار بررسی ارزیابی چرخه حیات و تأثیر یک نیروگاه بیوگاز بر اساس لجن فاضلاب شهری بود. به‌طورکلی ارزیابی چرخه حیات نتایج به‌دست‌آمده از فهرست موجودی را در نه دسته تأثیرات زیست‌محیطی ارزیابی می کند.

کلمات کلیدی:
ارزیابی چرخه حیات- انرژی‌های تجدید پذیر- تصفیه‌خانه- لجن فاضلاب شهری- هضم بی‌هوازی

* نویسنده مسئول: مجید رسولی

[1] LCA: Life Cycle Assessment

بررسی شاخص‌های زیست‌محیطی نیروگاه بیوگاز سوز تولید هم زمان برق و حرارت (BIO-CHP) تصفیه‌خانه‌های فاضلاب با استفاده از ارزیابی چرخه حیات (LCA)

مقدمه

طبق مطالعات انجام‌شده در راستای بررسی اثرات زیست‌محیطی در تصفیه‌خانه مشخص شد که برآورد اثرات زیست‌محیطی تولید انرژی در یک سیستم واحد تولید گرما و الکتریسیته دارای انتشاراتی به فضای خارج از تصفیه‌خانه است که در جداول ۲ و ۳ و ٤ بیان‌شده است. لذا توجه به اهمیت بخش تولید انرژی در یک سیستم واحد تولید گرما و الکتریسیته، درون تصفیه‌خانه، لازم است شاخص‌های زیست‌محیطی و اثرات زیست‌محیطی مشخص گردد. لذا هدف از این مطالعه بررسی شاخص‌های انرژی و اثرات زیست‌محیطی سیستم بیوگاز سوز تولید انرژی تصفیه‌خانه فاضلاب است. تصفیه‌خانه‌های فاضلاب[2] برای کاهش آلودگی فاضلاب ناشی از فعالیت‌های انسانی مهندسی‌شده و به‌منظور کاهش آسیب‌های واردشده به محیط‌زیست و سلامت مردم فعال می‌شوند. لجن فاضلاب محصول جانبی فرآیند تصفیه فاضلاب، از مخزن رسوب اولیه، مخزن رسوب ثانویه و سایر فرآیندهای مرتبط است. به‌منظور جلوگیری از آسیب‌های زیست‌محیطی، اجرای مجموعه‌ای از روش‌های پیچیده تصفیه و دفع لجن فاضلاب مانند هضم بی‌هوازی[3]، آبگیری، خشک‌کردن حرارتی، سوزاندن، غلظت لجن و دفع محل دفن زباله ضروری است. مدیریت نادرست زباله های آلی می‌تواند منجر به آلودگی جدی محیط مانند بو، انتقال بیماری و گرم شدن کره زمین شود [۱]. با افزایش تقاضای جهانی برای انرژی‌های تجدید پذیر و یا مواد شیمیایی، زباله های آلی ممکن است به یکی از در دسترس‌ترین منابع موجود تبدیل شوند. لجن، حاوی مقدار عظیمی از مواد آلی تجدید پذیر است و می‌تواند به‌عنوان یک منبع پایدار با پتانسیل اقتصادی باشد [۲]. انرژی زیستی تولیدشده برای گرمایش، برق و به‌عنوان سوخت حمل‌ونقل مورداستفاده قرار می‌گیرد. در یک واحد ترکیبی گرما و قدرت، بیوگاز به‌طور هم‌زمان برای تولید گرما و الکتریسیته به کار می‌رود. معمولاً گرما برای خودمصرفی (گرم شدن هاضم) مورداستفاده قرار می‌گیرد درحالی‌که الکتریسیته تولیدشده به شبکه عمومی یا ملی تغذیه می‌شود. در مطالعات متعدد، هم الکتریسیته و هم گرما در کارخانه هضم بی‌هوازی برای بهره‌برداری از همزن‌ها، پمپ‌ها و واحدهای سردخانه مصرف شدند. بااین‌حال، برق مازاد نیز به شبکه ملی وارد شد [۳]. با محدودیت منابع متعارف و افزایش تقاضا برای سوخت‌های فسیلی مانند زغال‌سنگ، سوخت‌های نفتی و غیره، علاقه به سمت توسعه منابع انرژی تجدید پذیر تغییر کرده است. در بین چندین منبع انرژی تجدید پذیر، بیوگاز یکی از بالقوه‌ترین منابع انرژی است. بیوگاز به‌عنوان سوخت جهت پخت‌وپز به‌راحتی با هضم بی‌هوازی مواد زراعی، صنعتی، زباله‌های خانگی، کود حیوانات، لجن فاضلاب و غیره به دست می‌آید [٤]. بیوگاز در آینده جایگزین گاز طبیعی با منشأ فسیلی در نظر گرفته می‌شود [۵]. بیوگاز تولیدشده می‌تواند در محل به گرما و انرژی تبدیل شود [٦, ۷]. انرژی زیستی تولیدشده از زیست‌توده در مقایسه باانرژی خورشیدی یا بادی از برخی وقفه‌ها مانند شدت تابش، سرعت باد یا وابستگی به آب‌وهوا تأثیر نمی‌پذیرد و ازاین‌رو یک منبع انرژی مفید است [۷].

۲. پیشینه پژوهش‌های مرتبط در سطح جهانی

۲-۱ ارزیابی چرخه حیات تولید بیوگاز از کود

[2] WWTP: Wastewater Treatment Plant
[3] AD: Anaerobic digestion

در مطالعه‌ای که توسط الیسا ماریا مانو استیو و همکاران (۲۰۱۹) انجام شد دریافتند که باقیمانده کود دامی در دسته‌های مختلف باعث ایجاد بارهای زیاد زیست‌محیطی می‌شود . استفاده از آن در تولید بیوگاز نه تنها برای کاهش این تأثیرات، بلکه برای تولید انرژی و کودهای زیستی نیز راهی مفید برای محیط‌زیست است. اگرچه کود دارای ارزش انرژی کم و بازده تبدیل بیوگاز پایین است، اما برای استفاده در هضم هم‌زمان با سایر لایه‌ها برای تولید بیوگاز نشان داده می‌شود. در این مقاله یک بررسی سیستماتیک از چرخه تولید بیوگاز از کود در سراسر جهان، برای شناسایی و مقایسه عوامل قابل‌توجه که منجر به اختلاف در مراحل ارزیابی چرخه حیات[4] و در پردازش بیوگاز می‌شود، ارائه‌شده است [۸]. این مقاله تأکید می‌کند که عدم توصیف لایه‌های فرعی مورداستفاده در هضم بی‌هوازی، گردآوری موجودی این مواد اولیه و تحلیل کارایی بیوگاز را دشوار می‌کند. استفاده از پسماند مواد حاصل از هضم بی‌هوازی به‌عنوان کود آلی نیتروژن[5] در مقایسه با استفاده از ترکیب متداول کودهای غیر آلی و کود اولیه، پتانسیل اسیدی شدن زمین و اوتروفیکاسیون (پاسخ اکوسیستم به افزایش بیش‌ازحد مواد طبیعی یا مصنوعی در یک محیط آبی است) را افزایش می‌دهد. این به دلیل فرآیندهای هیدرولیز و تولید آمونیاک در نیروگاه‌های هضم بی‌هوازی اتفاق می‌افتد [۹].

۲-۲ ارزیابی چرخه حیات در تولید بیوگاز به‌صورت خانگی در مصر

درمطالعه‌ای که توسط لیدا لونا و همکاران (۲۰۲۱) انجام شد دریافتند که تولید بیوگاز از کود دامی می‌تواند بسیاری از تأثیرات منفی تولید سنتی انرژی را برطرف کند و همچنین شرایط حیات در جوامع روستایی در مصر را بهبود بخشد، این مطالعه موردی در مصر و سایر مناطق آن انجام‌گرفته. حتی اگر جنبه‌های فنی و اقتصادی فناوری هضم‌کننده بیوگاز خانگی کاملاً بررسی‌شده باشد، پایداری محیطی آن، به‌ویژه در شرایط مصر تا حد زیادی ناشناخته مانده است. برای این منظور، داده‌های مورد ارزیابی در تهیه فهرست چرخه حیات از هضم‌کننده‌های گنبد ثابت معمولی که در مصر فعال می‌باشند استخراج شد [۱۰].

۲-۳ ارزیابی چرخه حیات نیروگاه‌های بیوگاز خانگی در مقیاس بزرگ در شمال غربی چین

در مطالعه‌ای که توسط وانگ و همکاران (۲۰۱۸) در شمال غربی چین، انجام شد دریافتند که کارخانه‌های تولید بیوگاز در مقیاس بزرگ (مدرن) و خانگی (متعارف) دو روش اصلی تخمیر بیوگاز وجود دارد که یک روش امیدبخش برای دفع ضایعات دامداری و بازیافت مؤثر کشاورزی است. تفاوت در مکانیسم‌های عملکرد این دو سیستم منجر به تفاوت در عملکرد زیست‌محیطی آن‌ها می‌شود. در این مطالعه، ارزیابی دقیق چرخه حیات از تولید بیوگاز در مقیاس بزرگ و خانگی برای مقایسه عملکرد زیست‌محیطی آن‌ها ازنظر استفاده از انرژی و پتانسیل اثرات زیست‌محیطی در هر واحد عملکرد (دبی به کارخانه بیوگاز۲۱۳٦ تن در سال کود) انجام شد. اطلاعات در طی یک دوره دوساله (۲۰۱٦-۲۰۱٤) جمع‌آوری شد [۱۱].

۲-٤ ارزیابی چرخه حیات نیروگاه تولید بیوگاز در مقیاس بزرگ بر پایه لجن فاضلاب

[4] LCA: Life cycle assessment
[5] N: Nitrogen

نتایج نشان داد که ساخت نیروگاه برای اثرات کل چرخه حیات ناچیز است. این نیروگاه بیوگاز انتشار گازهای گلخانه‌ای (منفی ۰/۲۳۵ کیلوگرم دی‌اکسید کربن معادل بر مترمکعب) را در مقایسه با نیروگاه‌های برق مبتنی بر زغال‌سنگ نشان داد و هضم تولیدشده می‌تواند گزینه خوبی برای جایگزینی کود شیمیایی باشد. تولید بیوگاز و انتشار کشاورزی۰۸- ۳/۰۵۹e کیلوگرم کلروفلوروکربن‌ها[6] معادل بر مترمکعب به سمت اثرات مفیدی که ممکن است به دلیل جلوگیری از مصرف برق و کودهای مصنوعی نسبت داده شود، نقش دارد. نتایج نشان داد که نیروگاه بیوگاز مبتنی بر لجن فاضلاب تأثیر مفیدی بر محیط‌زیست نشان می‌دهد ارزیابی چرخه حیات شناسایی عوامل مهمی را که به محیط پیشرو کمک می‌کند، امکان‌پذیر می‌کند. انتشار از منابع اولیه سهم تقریباً ناچیزی در اثرات کل چرخه حیات داشته است. انتشار از مواد ساختمانی مانند سیمان، فولاد و غیره، کمترین سهم را در تغییرات آب و هوایی داشته و تخریب اوزن اثرات قابل‌ملاحظه‌ای در ایجاد مسمومیت با محیط‌زیست آب شیرین و کاهش فلزات داشته است. نشت متان[7] و دی‌اکسید کربن از نیروگاه، به‌طور قابل‌توجهی در کاهش تغییرات زیست‌محیطی کمک می‌کند. مطالعه حاضر از داده‌های متوسطی استفاده می‌کند که هیچ قطعیتی در نتایج نشان نمی‌دهد؛ بنابراین، تجزیه‌وتحلیل عدم اطمینان با متوسط داده‌های محدود جمع‌آوری‌شده از منابع مختلف که می‌تواند دامنه تحقیق باشد، انجام نمی‌شود [۱۲].

۲-۵ پایداری محیطی هضم بی‌هوازی زباله‌های مواد غذایی خانگی

درمطالعه‌ای که توسط اسلوریک هریش و همکاران (۲۰۱۹) انجام شد دریافتند که مصرف‌کنندگان عمده‌ترین تولیدکننده زباله‌های غذایی[8] در کشورهای پیشرفته هستند. آگاهی در مورد ارزش جمع‌آوری زباله‌های غذایی به‌عنوان جریان پسماند جداگانه برای تولید مخلوط مواد یا بازیابی انرژی از طریق هضم بی‌هوازی افزایش می‌یابد. این مطالعه بر روی هضم بی‌هوازی برای ارزیابی چرخه حیات پایداری محیطی بازیابی انرژی و کودها از خانواده زباله‌های غذایی در انگلستان متمرکز است. تجزیه‌وتحلیل برای دو واحد عملکردی مختلف انجام می‌شود:
۱) رفتار ۱ تن زباله‌های غذایی که با سوزاندن و دفن زباله مقایسه می‌شود.
۲) تولید ۱ مگاوات ساعت برق که با سایر گزینه‌های تولید برق مقایسه می‌شود [۱۳].

۲-۶ ارزیابی چرخه حیات در تصفیه و دفع لجن فاضلاب

این مطالعه توسط آن‌دینگ و همکاران (۲۰۲۱) انجام شد که ۳۷ مقاله را مرور کرده و نکات کلیدی را در اختیار محققان برای توسعه و مدیریت بهبود لجن از طریق اقدامات ارزیابی چرخه حیات قرار داده است. بیشتر استراتژی‌های مدیریت لجن به خصوصیات فیزیکی شیمیایی لجن، شرایط خاص اکوسیستم، هزینه‌های مربوطه و آسیب‌های زیست‌محیطی پیش‌بینی می‌شود که کاهش می‌یابد. در حقیقت، اختلافاتی در تفسیر نتایج وجود دارد که در مطالعات مختلف گزارش‌شده است که مقایسه نتایج مختلف مطالعات را تضعیف می‌کند، بنابراین بیشتر تحقیقات بر روی دستورالعمل مقایسه‌ای متمرکز هستند [۱۴].

۲-۷ ارزیابی چرخه حیات تولید بیوگاز در چشم‌اندازهای آینده در مالزی

[6] CFC-11: Trichlorofluoromethane
[7] CH4: Methane
[8] FW: Food waste

در مطالعه‌ای توسط عزیز نواحما و همکاران (۲۰۱۹) انجام شد بدین‌صورت بیان می‌شود که این مقاله بررسی جامعی از ٤٨ مطالعه در مورد ارزیابی چرخه حیات تولید بیوگاز از سال ۲۰۰٦ تا ۲۰۱۸ ارائه‌شده است. دامنه بررسی، نوع مواد اولیه و مقوله‌های مورداستفاده در مطالعات بررسی‌شده و موردبحث قرار گرفت. اگرچه مطالعات مختلفی برای ارزیابی کارایی و پتانسیل زباله‌ها برای تولید بیوگاز انجام‌شده است، بااین‌حال، به‌ویژه در کشورهای درحال‌توسعه برای انجام تجزیه‌وتحلیل جامع مربوط به عملکرد زیست¬محیطی تولید بیوگاز بر اساس روش ارزیابی چرخه حیات، توجه کمی شده است. در مالزی، بهره‌برداری از پساب کارخانه روغن نخل به‌عنوان منبع انرژی به دلیل تولید انبوه در کارخانه روغن نخل به‌تازگی گسترش پیداکرده است [۳].

۲-۸ ارزیابی عملکرد انرژی در چرخه حیات بیوگاز

درمطالعه‌ای که توسط ماریابرگولاند و همکاران (۲۰۰٦) انجام شد دریافتند که تعادل‌های انرژی از یک چشم‌انداز چرخه حیات برای سیستم‌های بیوگاز بر اساس ۸ ماده خام مختلف تجزیه‌وتحلیل می‌شوند. این تحلیل بر اساس داده‌های منتشرشده و مربوط به شرایط سوئد است. نتایج نشان می‌دهد که ورودی انرژی به سیستم بیوگاز (به‌عنوان‌مثال: نیروگاه بیوگاز در مقیاس بزرگ) به‌طورکلی برابر با ۲۰ تا ٤۰ درصد است (به‌طور متوسط تقریباً ۳۰ درصد) از مقدار انرژی موجود در بیوگاز تولیدشده. خروجی خالص انرژی زمانی منفی می‌شود که فواصل حمل‌ونقل از حدود ۲۰۰ کیلومتر (کود) تا ۷۰۰ کیلومتر (پسماند کشتارگاه) تجاوز می‌کند. تغییرات زیادی در بهره‌وری انرژی در بین سیستم‌های بیوگاز وجود دارد که موردمطالعه قرارگرفته است [٦].

۲-۹ چرخه حیات و ارزیابی‌های اقتصادی تولید بیوگاز از زیست‌توده جلبک‌های کوچک با روش پیش‌گرمایش حرارتی از روش هضم بی‌هوازی

در مطالعه‌ای که توسط خو وهمکاران (۲۰۲۰) انجام شد دریافتند که افزایش آلودگی محیط‌زیست و مسائل مربوط به بحران انرژی، انسان را ترغیب می‌کند تا فن‌آوری‌های جدید انرژی تجدید پذیر را توسعه دهد. تبدیل زیست‌توده جلبکی به سوخت زیستی به‌عنوان یک فناوری امیدوارکننده در نظر گرفته می‌شود [۱٥]. در این مطالعه، از روش چرخه حیات و ارزیابی اقتصادی تولید بیوگاز از زیست‌توده ریز جلبکی با پیش‌تصفیه گرمابی و با پیش گرمایی خورشیدی انجام‌شده است. تولید بیوگاز با این فرآیندها از مزایای زیست‌محیطی و اقتصادی خوبی برخوردار است. تبدیل زیست‌توده‌جلبک‌های کوچک به سوخت زیستی به‌عنوان یک فناوری امیدوارکننده در نظر گرفته می‌شود. زیرا زیست‌توده‌جلبک‌های کوچک می‌تواند برای تولید سوخت زیستی، زیست‌توده تولید کند، درحالی‌که نیتروژن و فسفر را از فاضلاب جذب می‌کند. بیوگاز تولیدشده از زیست‌توده ریز جلبکی با پیش هیدروترمال خورشیدی دارای هزینه سطح کمتری از انرژی نسبت به قبل با هیدروترمال حرارتی می‌باشد [۱٦].

۲-۱۰ تجزیه‌وتحلیل چرخه حیات تولید بیوگاز از هضم بی‌هوازی پساب کارخانه روغن پالم

در مطالعه‌ای که باهدف ارزیابی عملکرد زیست‌محیطی چرخه حیات گهواره به دروازه تولید بیوگاز توسط هضم بی‌هوازی پساب کارخانه روغن پالم[9] انجام می‌شود. این مطالعه بر گرم شدن کره زمین[10]، تغییر کاربری

[9] POME: Palm Oil Mill Effluent
[10] GWP: Global Warming

زمین[11] و مصرف آب[12] به دلیل سهم قابل‌توجه آن‌ها تأکید دارد. می‌توان نتیجه گرفت که بیوگاز ناشی از زباله یک فناوری امیدوارکننده است که می‌تواند برای رسیدن به اهداف ملی برای یک انرژی تجدید پذیر پایدار مورداستفاده قرار گیرد. این مطالعه می‌تواند یک نقطه شروع برای برجسته‌سازی پایداری تولید بیوگاز برای یک مدیریت پسماند مناسب و بازیابی انرژی درکشور مالزی باشد [۱۷].

روش مورداستفاده در تجزیه‌وتحلیل نتایج

ارزیابی چرخه حیات

روش ارزیابی چرخه حیات توسط سازمان بین‌المللی استاندارد در چهار مرحله تعریف می‌گردد

۱- مشخص کردن هدف و محدوده مطالعه (شامل انتخاب یک واحد عملکردی)

۲- تهیه فهرست موجودی انرژی و منابع مربوط به مواد و انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی (تحلیل فهرست چرخه حیات)

۳- ارزیابی اثرات بالقوه زیست‌محیطی مرتبط با ورودی‌ها و خروجی‌های شناسایی‌شده (ارزیابی اثرات چرخه حیات)

٤- تفسیر نتایج برای کمک به تصمیم‌گیرندگان در تصمیم‌گیری آگاهانه‌تر [۱۸].

روش‌های مورداستفاده در مقالات موردبررسی در جدول ۱ آورده شده است

جدول ۱. ارزیابی چرخه حیات در مقالات

مقاله	روش مورداستفاده	LCIA دسته‌بندی‌های	منابع
چرخه حیات و ارزیابی‌های اقتصادی تولید بیوگاز از زیست‌توده جلبک‌های کوچک با روش پیش‌گرمایش حرارتی از روش هضم بی‌هوازی	کاربرد ارزیابی چرخه حیات در تولید بیوگاز از زیست‌توده ریز جلبکی به تولید کود و تولید برق نسبت داده می‌شود و با نرم‌افزار openLCA ارزیابی شد	GWP	[۱٦].
ارزیابی چرخه حیات تولید بیوگاز از کود	به‌منظور محاسبه تأثیرات زیست‌محیطی دسته‌های مختلف، از برنامه‌ها یا صفحات گسترده مرتبط با پایگاه داده Ecoinvent و نرم‌افزار simapro استفاده‌شده است	GWP, ODP, EP, PE, ET, AP, ADP, OIR, و PED, HTP, POF ALO	[۸]
ارزیابی چرخه حیات تولید بیوگازبصورت خانگی در مصر	مدل‌سازی محیط بر اساس روش ارزیابی چرخه حیات با استفاده از SimaPro انجام شد. مشخص شد که پتانسیل گرمایش جهانی ۱۰۰ ساله برای تولید ۱ مترمکعب بیوگاز در شرایط مصر به ۲/۷۲ کیلوگرم CO2 معادل. می‌رسد	FD, MRD, WD, NLT, ULO, ALO, IR, MEC, FEC, TE, PMF, POF, HT, FE, TA, OD, CC	[۱۰]
ارزیابی چرخه حیات نیروگاه‌های بیوگاز خانگی در	تعادل انرژی و اثرات زیست‌محیطی سیستم های تولید بیوگاز در مقیاس	EC, EP, POP, AP GWP, HTP	[۱۹]

[11] LUC: Land use change
[12] WCP: Water consumption

مقیاس بزرگ در شمال غربی چین	بزرگ[13] بیوگاز در مقیاس کوچک[14] با استفاده از داده‌های جمع‌آوری‌شده در تجزیه‌وتحلیل موجودی در چهار مرحله طبقه‌بندی، مشخصات، استانداردسازی و تجزیه‌وتحلیل وزن. ارزیابی شد		
ارزیابی چرخه حیات نیروگاه تولید بیوگاز در مقیاس بزرگ بر پایه لجن فاضلاب	هدف از این کار بررسی ارزیابی چرخه حیات و تأثیر یک نیروگاه بیوگاز بر اساس لجن فاضلاب شهری نیروگاه بیوگاز با ظرفیت ۶۰۰۰ مترمکعب در تصفیه‌خانه فاضلاب بود. تجزیه‌وتحلیل اثرات زیست‌محیطی ناشی از سیستم های اساسی تولید بیوگاز و همچنین بررسی تأثیر استفاده از بیوگاز به‌عنوان سوخت جایگزین با استفاده از نرم‌افزار simapro و روش‌های ReCiPe و midpoint انجام شد.	FA, ETP, HT, CC,ODP, AP, MD, FD WD	[۱۲]
پایداری محیطی هضم بی‌هوازی زباله‌های مواد غذایی خانگی	روش ارزیابی چرخه حیات اعمال‌شده در این مطالعه از دستورالعمل‌های ISO 14040/14044 پیروی می‌کند. داده‌های موردنیاز از پایگاه داده Ecoinvent استخراج شدند	GWP و ET,HT, EP, AP,SPM,POP,ODP, TETP, FD, ME FEC	[۱۳]
ارزیابی چرخه حیات در تصفیه و دفع لجن فاضلاب	نتایج در این مقاله با استفاده از نرم‌افزار sima pro از روش ReCiPe–midpoint استخراج شد	HT, POP, ODP, AP, GWP	[۱۴]
ارزیابی چرخه حیات تولید بیوگاز در چشم‌اندازهای آینده در مالزی	تحلیل نتایج حاصل از ارزیابی چرخه حیات با استفاده از نرم‌افزار sima pro در این مقاله به‌دست‌آمده	GMP,CED,CEXD, NEG, PED	[۳]
تجزیه‌وتحلیل چرخه حیات تولید بیوگاز از هضم بی‌هوازی پساب کارخانه روغن پالم	ارزیابی چرخه حیات (LCA) با استفاده از روش ReCiPe 2016 و نرم‌افزار SimaPro 8.5 انجام شد	GWP, WCP, LUC	[۱۷]
ارزیابی عملکرد انرژی در چرخه حیات بیوگاز	تمام جریان‌های انرژی در سیستم بیوگاز شناسایی و از یک دیدگاه چرخه حیات خلاصه‌شده است و در مقایسه با بازده بیوگاز ناشی می‌شود. تجزیه‌وتحلیل بر روی مواد خام و سیستم‌های بیوگاز تمرکز دارد	–	[۶]

ADP – پتانسیل تخریب غیر زیستی، AP – پتانسیل اسیدی شدن، CC – تغییر اقلیم، EP – پتانسیل اوتروفیکاسیون، FAETP – پتانسیل مسمومیت با آب شیرین، FE – یونیزه شدن آب شیرین، GWP – پتانسیل گرم شدن کره زمین، HT – سمیت انسانی، HTTP – پتانسیل سمیت انسانی، IR –

[13] LBP: Large Biogas Plant
[14] HBP: Household Biogas Plant

تابش یونیزاسیون، MAETP – **پتانسیل مسمومیت زیست‌محیطی در آب دریا،** NRE – **انرژی تجدید ناپذیر،** ODP – **پتانسیل تخریب لایه ازن،** POCP – **پتانسیل اکسیداسیون فتوشیمیایی،** TA – **اسیدی شدن زمینی،** TE – **پتانسیل مسمومیت زیست‌محیطی زمینی،** LUC- **تغییر کاربری زمین-** WCP **مصرف آب،** ADP.B– **پتانسیل تخریب غیر زیستی،** FAETP– **پتانسیل مسمومیت آبزیان در آب شیرین،** HTTP– **پتانسیل سمیت انسانی،** ODP– **پتانسیل تخریب لایه ازن،** TETP– **پتانسیل مسمومیت زیست‌محیطی زمینی؛** POP، **اکسیداسیون فتوشیمیایی؛** HTP، **پتانسیل سمیت انسانی. تخلیه فسیل** SPM (FD) **ذرات معلق** MD–**تخلیه فلزی،** ET– **سمیت محیطی،** OD- **کاهش اوزون،** FE–**اوتروفیکاسیون آب شیرین،** ME– **اوتروفیکاسیون دریایی،** POF–**تشکیل اکسیدان فتوشیمیایی،** PMF–**تشکیل ماده ذرات،** FEC–**مسمومیت با آب شیرین،** MEC–**سمیت زیست‌محیطی دریایی،** IR–**پرتوی یونیزاسیون،** ALO–**شغل زمین‌های کشاورزی،** ULO–**شغل زمین شهری،** NLT–**تحول طبیعی سرزمین،** WD– **تخلیه آب،** MRD–**کاهش منابع معدنی،** FD- **تخلیه فسیل،** PED–**کاهش انرژی اولیه،** ADP–**پتانسیل کاهش جنینی،** OIR–**تنفس مواد آلی و معدنی**

جدول۲. داده‌های موجودی برای تکنیک‌های تصفیه لجن فاضلاب بیان‌شده در هر واحد عملکردی

پایگاه داده اکو اینونت[1]	کاربرد کشاورزی در لجن هضم شده از طریق هضم بی¬هوازی	کاربرد کشاورزی در لجن کمپوست شده	سوزاندن	تجزیه در اثر حرارت	اکسیداسیون هوای مرطوب	واحد (در هر ۱۰۰۰ کیلوگرم ماده خشک)
بهبود لجن	**هضم بی‌هوازی**	**مخلوط کردن کمپوست**	**سانتریفیوژ**	**پرس صافی**	**افزودن پلیمر**	
برق، ولتاژ متوسط، در شبکه (انگلستان)	۸۸/٦	۳۳/۲	۵۲/۵۰	٤۰/۰		kwh
دیزل		۸/۹۱				kg
پلیمر (پلی‌اکریل‌آمید)			۳/۷۲	۵/۰۰	۰/۱۰	kg
انتشار مونوکسید کربن	۰/۸٤					kg
انتشار دی‌اکسید نیتروژن	۰/۸۵					kg
انتشار اکسید نیتروژن	۰/۰۲					kg
انتشار ذرات (PM10)	۰/۰۸					kg
	ذخیره سازی وکاربردهای	**کاربرد کشاورزی**		**تجزیه در اثر حرارت**		
برق، ولتاژ متوسط در شبکه (انگلستان)	۵۸/۵			۲٤٤		kwh
دیزل	۰/۷۳	۰/۷۳				
انتشار متان	۳/۲	۱/٦		٤۸۰		g
انتشار مونوکسیدکربن				۲۱۷		g

مواد	غلظت لجن فاضلاب (mg/kg DM) [۱]			تعویض- کسر محلول در اسید (درصد)		
	کمترین	میانگین	بیشترین	هضم بی‌هوازی[۲]	کمپوست شده[۳]	
انتشار دی اکسید نیتروژن				۳/٦٦		g
	هضم بی‌هوازی	لجن کمپوست شده	سوزاندن	تجزیه در اثر حرارت	اکسیداسیون هوای مرطوب	
انتشار ترکیبات آلی فرار[۱۵]				٤٤/۳۰		g
انتشار دی اکسید کربن	-۱۷٤	۱۹۲	۸/۳۹	۳۱۵	۸٦/٤	kg
انتشارات فلورانس			۵E-۳/۰			ng
منابع	[۲۳،۲۰]	[۲۳،۲۱]	[۲۳،۲۰]	[۲۳،۲۰]	[۲۳،۲۲]	[۲۳]

۱- داده‌های موجودی برای تخمین تأثیرات زیست‌محیطی [۲۰]

جدول ۳. غلظت فلزات سنگین و کسر محلول قابل‌تغییر در اسید در لجن فاضلاب

[15] VOC: Volatile organic compounds

کادمیوم	۴/۰	۱/۲	۸۰/۳	–	۰/۱۰
کروم	۱۶	۱۴۶	۲۷۵	۲۰/۰	–
مس	۳۹	۳۴۰	۶۴۱	۴۰/۰	–
نیکل	۹	۵۰	۹۰	۰/۳۶	۰/۱۰
فلـــز روی	۱۴۲	۱۰۷۱	۲۰۰۰	۱۴/۱	۰۴/۰
	[۲۴]	[۲۴]	[۲۴]	[۲۵]	[۲۶]

جدول٤. غلظت محصولات دارویی و مراقبت شخصی[16] در لجن فاضلاب اعمال‌شده در زمین

PPCPs	غلظت لجن (µg/kg DM)			منابع
	کمترین	میانگین	بیشترین	
دیکلوفناک	۱۰۰	۱۲۵	۱۵۰	[۲۷]
ایبوپروفن	۱۰۰	۳۰۰	۵۰۰	[۲۸]
تریمتوپریم	۱۰	٤٥	۸۰	[۲۸]
اریترومایسین	۵۰	۱۰۰	۱۵۰	[۲۸]
سولفامتوکسازول	۲	٤	٦	[۲۸]
کاربامازپین	۱۰۰	۱۵۰	۲۰۰	[۲۸]
استرون	۱۰	۲۰	۳۰	[۲۷]
بتا- استرادیول۱۷	۱۰	۲۰	۳۰	[۲۷]
تریکلوزان	۹۰۰۰	۱۰,۰۰۰	۱۱,۰۰۰	[۲۸]

۳. لجن فاضلاب:

[16] PPCP: Pharmaceutical and personal care products

اگر تصفیه لجن به‌طور خاص برای تولید کودهای پایه لجن باارزش افزوده بالا طراحی‌شده باشد، دیگر نمی‌توان لجن را به‌عنوان زباله در نظر گرفت بلکه به‌عنوان محصول مشترک تصفیه‌خانه فاضلاب محسوب می‌شود.

۳-۱ هضم بی‌هوازی (AD)

تصفیه فاضلاب مستلزم تبدیل آلودگی محلول (اساساً کربن، نیتروژن و فسفر) به زیست‌توده است. لجن حاصل از پسماندهای فاضلاب یک مشکل عمده در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب است که حدود ۵۰ درصد هزینه کل نیروگاه را در بردارد. هضم بی‌هوازی پرکاربردترین روش برای بازیافت لجن است و همچنین حجم آن را به میزان قابل‌توجهی بین ۲۰ تا ۷۰ درصد کاهش می‌دهد [۲۹]. به‌طور گسترده‌ای گزارش‌شده است که هضم بی‌هوازی عملکرد خوبی در محیط دارد. روند بهبود یکپارچه هضم بی‌هوازی و استفاده از کشاورزی نیز به دلیل انتشار کمتر و تخلیه انرژی، سازگاری محیطی بهتری دارد [۲۲]. هضم بی‌هوازی به‌عنوان یک رویکرد کارآمد برای تولید سوخت زیستی در نظر گرفته می‌شود [۱۶]. دوغاب غلیظ مستقیماً به درون راکتور تخمیر، تحت نیرومحرکه پمپ با نیاز انرژی ۰/۰۳۶ کیلووات ساعت در مترمکعب (تقریباً ۰/۰۰۱۸۵ دلار در مترمکعب) منتقل می‌شود. در راکتور تخمیر، انرژی موردنیاز برای گرم کردن دوغاب از ۲۵ تا ۳۵ درجه سانتی‌گراد از احتراق بیوگاز در یک مشعل کمکی (۶۰ دلار بر کیلووات ساعت) است [۳۰].

۳-۲ هضم بی‌هوازی به‌عنوان یک کلید در اقتصاد چرخشی مدیریت فاضلاب

هضم بی‌هوازی یک فناوری کاملاً بالغ است. از قرن نوزدهم به تبدیل ذرات معلق و اجزای آلی محلول از پساب و فاضلاب به متان پرداخته‌شده است [۳۱]. در اصل، هضم بی‌هوازی برای تثبیت کودهای دامی و مواد دفع انسانی مورداستفاده قرار می‌گرفت، اما پس‌ازآن عمدتاً برای تصفیه پسماندهای جامد زیست‌توده حاصل از فرآیندهای بیولوژیکی برای تصفیه‌خانه فاضلاب خانگی تا دهه ۱۹۷۰ استفاده می‌شد. مفهوم بازیابی انرژی توسط هضم بی‌هوازی تا اوایل دهه ۱۹۷۰ شامل نمی‌شد که هم‌زمان با بحران اقتصادی ناشی از افزایش قیمت سوخت‌های فسیلی بود و نقطه شروع در نظر گرفتن هضم بی‌هوازی به‌عنوان یک فناوری عملی برای تبدیل ضایعات باقیمانده یا محصولات انرژی به انرژی زیستی (به‌عنوان بیوگاز یا بیوهیدروژن)؛ بنابراین تعادل انرژی یک گام کلیدی برای پرداختن به تولید بیوگاز پایدار در کاربردهای جدید هضم بی‌هوازی است (مانند، برای مثال، تجمع زیست‌توده لیگنوسلولزیک). بااین‌حال، الگوهای جدید در سیستم تولید امکان گسترش مفهوم هضم بی‌هوازی را درزمینه بازیابی منابع از منابع زباله فراهم کرده است. تعامل هضم بی‌هوازی با مفهوم اقتصاد چرخشی احتمالاً مطرح‌شده بود، اما مطمئناً با داده‌ها پشتیبانی شد [۳۲]. مفهوم اقتصاد چرخشی برای تولید صنعتی پایدار شامل چرخه حیات یک محصول "گهواره به گهواره" است که با استفاده مجدد از جزئی از اجزا یا بازیافت کامل اجزای اساسی برای ساخت مواد اولیه جدید [۳۳]. مدیریت پایدار آب، بازیافت آب و بازیابی منابع را به داستان می‌افزاید. معرفی مفهوم پایداری، مدیریت آب تعیین قیمت اجزای آب و از همه مهم‌تر تلاش برای مدیریت پایدار آب را ضروری می‌کند [۳۴]؛ اما ملاحظات پرانرژی برای دستیابی به پایداری در یک بازه زمانی کوتاه ضروری است. با توجه به زنجیره تأمین زباله به انرژی[17]، حل معضل تقاضای انرژی، مدیریت پسماند و انتشار گازهای گلخانه‌ای[18] برای جوامع در سطح جهان نه‌تنها

[17] WTE: Waste-To-Energy Supply Chain
[18] GHG: Greenhouse Gases

یک فرصت پرانرژی است (به‌ویژه برای کشورهای واردکننده سوخت فسیلی) بلکه درنهایت، یک نیاز انسانی است [۳۵].

۳-۳ مفهوم جدید در هضم بی‌هوازی

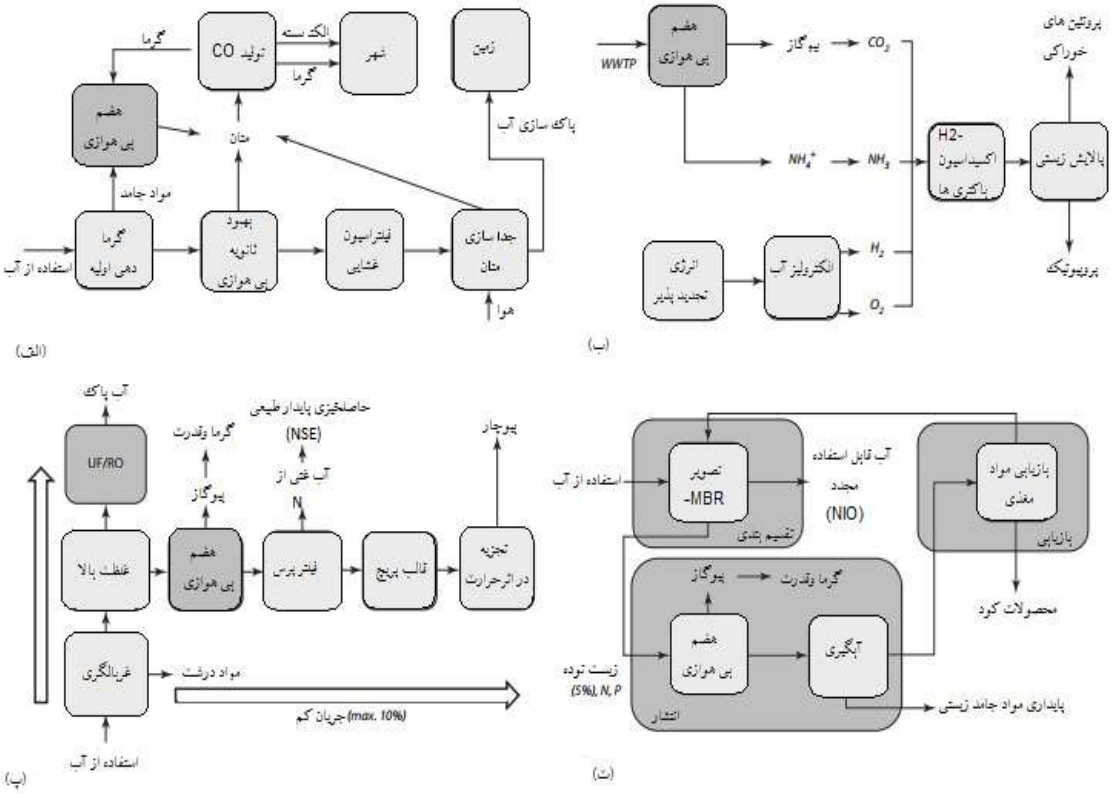
سال ۲۰۱٤ صدمین سالگرد فرآیند لجن فعال[19] بود. در طی این سال‌ها، تصفیه فاضلاب بیولوژیکی در حال رفع و قدمت مقدماتی بوده است و امروزه یافتن تصفیه‌خانه فاضلاب بدون تصفیه لجن فعال غیرمعمول است. بااین‌حال، نگرانی در مورد محدودیت‌های فرآیند لجن فعال به‌طور عمده به دلیل تقاضای انرژی زیاد، پتانسیل انتشار بالای گازهای گلخانه‌ای و پتانسیل بازیابی محدود برای کربن و سایر منابع افزایش می‌یابد؛ بنابراین، نسل چهارم شبکه‌های تصفیه‌خانه فاضلاب در حال تبدیل‌شدن به واقعیت است و اخیراً چهار گزینه قوی برای فرآیند لجن فعال ارائه‌شده است (شکل ۱). همه آن‌ها به‌نوعی مربوط به فرآیندهای هضم بی‌هوازی و اقتصاد چرخشی هستند [۳٦].

• مک کارتی و همکاران (۲۰۱۱) تصفیه فاضلاب بی‌هوازی کم انرژی را در خط اصلی پیشنهاد کردند [۳۷]، این مفهوم مبتنی بر جایگزینی فرآیند لجن فعال توسط یک فرآیند ثانویه بی‌هوازی است که منجر به ۱۰۰ درصد پتانسیل بیوگاز بیشتر، ۵۰ درصد کاهش لجن دفع شده و تولید انرژی خالص در کل نیروگاه می‌شود. این مفهوم "کم‌هزینه " بوده و بخصوص با استفاده از نوع راکتور پوششی بی‌هوازی لجن با جریان بالارونده[20] به‌طور موفقیت‌آمیزی در هند و آمریکای لاتین اعمال‌شده است [۳۸]. بااین‌حال، این مفهوم شامل مدیریت کارآمد بازیابی مواد مغذی نیست و پساب صرفاً به وجود آمده تا برای آبیاری استفاده شود. یک گزینه جالب ترکیب این مفهوم با فرآیند اکسیداسیون آمونیوم بی‌هوازی[21] برای از بین بردن مقدار اضافی نیتروژن است و بازیابی فسفر ناکارآمد است [۳۹].

• ون لوسدراخت و بردجانوویچ (۲۰۱٤) مفهوم تبدیل تصفیه‌خانه فاضلاب را به یک کارخانه بیولوژیکی برای بازیابی منابع موجود در فاضلاب، به‌ویژه آلودگی آلی و تولید منابع باارزش افزوده بالا که می‌توانند دوباره در بازار وارد شوند، معرفی کردند. به‌صورت گهواره به گهواره. ازآنجاکه تبدیل مستقیم اجزای آلی به محصولات قابل‌استفاده برای انسان به دلیل عوامل بیماری‌زا و آلودگی فلزات سنگین به‌سختی امکان‌پذیر است، تاکنون گزینه‌های جالبی ظاهرشده است، مانند ترکیب غیرمستقیم کربن ناشی از هضم بی‌هوازی پساب فاضلاب با هیدروژن خورشیدی - الکترولیز آب هدایت‌شده برای رشد زیست‌توده شیمی اتروفیکی است که می‌تواند برای استخراج پروتئین‌های تک‌سلولی خوراکی یا پریبوتیک مورداستفاده قرار گیرد [٤۰]. این مفهوم منجر به استفاده کامل از باقی‌مانده نیتروژن از فاضلاب می‌شود.

• مفهوم در نظر گرفتن تمام اجزای فاضلاب به‌عنوان منابع باارزش توسط وستریت و همکاران ارائه شد [۳٤]. اساس شامل مرحله اول جداسازی فیزیکی آب از هر دو اجزای محلول و ذرات معلق با توالی فوق‌العاده و نانوفیلتراسیون به دنبال اسمز معکوس (خط اصلی، ۹۰ درصد جریان) و مرحله دوم افزایش غلظت یک خردسال است. جریان (۱۰ درصد جریان) که به‌موجب آن تمام اجزای فاضلاب متمرکز می‌شوند. در این فرآیند، هضم بی‌هوازی نقش اساسی ایفا می‌کند، زیرا اولین مرحله‌ای است که تمام مواد آلی قابل‌تجزیه به بیوگاز تبدیل می‌شوند [۳٤].

[19] AS: Activated Sludge
[20] UASB: Upflow Anaerobic Sludge Blanket
[21] Anammox: Anaerobic ammonium oxidation



شکل ۱. مفاهیم جدید برای تصفیه فاضلاب با باز یابی انرژی از طریق هضم بی‌هوازی و بهبود باز یابی منابع [۸۰].

(الف) "انرژی کم" مفهوم خط اصلی [۳۷]

(ب) مفهوم کارخانه فاضلاب [٤٠]

(پ) تفکیک مفهوم جریان‌ها [٣٤]

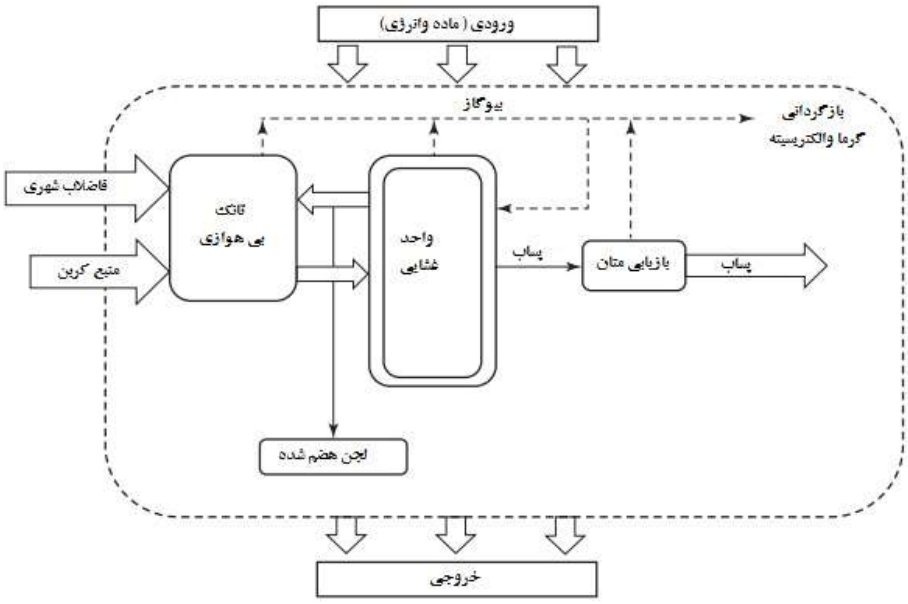
(ت) مفهوم تقسیم-انتشار-بازیابی [٤١]

٤-٣ هضم‌های بی‌هوازی از تصفیه فاضلاب شهری

تصفیه فاضلاب‌های شهری[22] برای کاهش اثرات زیست‌محیطی که با مقاومت آلی کم مشخص می‌شود [٤٢, ٤٣]. همان‌طور که قبلاً توضیح داده شد، فرآیندهای بی‌هوازی مزایای متعددی نسبت به فرآیندهای هوازی نشان می‌دهند: آن‌ها بیوگاز را به‌عنوان منبع اضافی انرژی به دست می‌آورند، تولید لجن کمتر از سیستم‌های هوازی است و امکان استفاده مجدد از مواد غیر آلی وجود دارد [٤٢]. هدف اصلی فرآیندهای بی‌هوازی کار بازمان ماند لجن[23] طولانی به دلیل رشد کند میکروارگانیسم‌ها (مربوط به قدرت آلی کم فاضلاب مانیتور) است. از این نظر، پوسته راکتور بیولوژیکی بی‌هوازی[24] یک گزینه امیدوارکننده هستند، زیرا می‌توانند زمان‌ماند هیدرولیکی[25] را از هم جدا کنند، حجم راکتور را کاهش دهند و غلظت لجن را حفظ کنند [٤٢]. همان‌طور که در جای دیگر گزارش شده است،

[22] UWWTP: Urban wastewater treatment plant
[23] SRT: solid retention time
[24] AnMBR: Anaerobic membrane bioreactor
[25] HRT: Hydraulic Retention Time

این سیستم‌ها همچنین می‌توانند تولید لجن را در مقایسه با یک فرآیند هوازی کاهش دهند، مصرف انرژی هوادهی را از بین ببرند و متان تولید کنند [٤٤]. از طرف دیگر، فن‌آوری‌های پوسته راکتور بیولوژیکی بی‌هوازی پوسته راکتور بیولوژیکی بی‌هوازی معایبی مانند رسوب نخاله دار و رسوب شدید رسوب‌گذاری در پوسته و گران بودن پوسته هارانشان می‌دهد. در مورد اول، انرژی برای جلوگیری از رسوب‌گذاری در پوسته موردنیاز است که می‌تواند باعث کاهش جریان نفوذ پوسته و افزایش هزینه‌های عملیاتی شود [٤٥]. برای محدود کردن این مشکل، از حباب گاز برای افزایش سطح شار استفاده می‌شود. علاوه بر این، پوسته راکتور بیولوژیکی بی‌هوازی برای بهبود امکان زیست‌محیطی این فناوری نیاز به بازیابی مواد مغذی و متان از پساب دارند. سرانجام، پوسته راکتور بیولوژیکی بی‌هوازی هنگام ایجاد نوسان در ترکیب فاضلاب، یا هنگامی‌که مواد آلوده ترکیبات سمی ایجاد می‌کنند، مشکلات عملیاتی را نشان می‌دهند [٤٧-٤٥]. همان‌طور که قبلاً توضیح داده شد، سیستم‌های پوسته راکتور بیولوژیکی بی‌هوازی را می‌توان در سه پیکربندی نصب کرد، دو مورد مربوط به پیکربندی غوطه‌وراست. این سیستم‌ها فناوری پوسته بیوراکتور بی‌هوازی غوطه‌ور شده[٢٦] نامیده می‌شوند که اخیراً به‌عنوان یک فناوری امیدوارکننده برای تصفیه فاضلاب شهری مورد کاوش قرارگرفته است. پرتل و همکاران (۲۰۱۳) گزارش یک مطالعه زیست‌محیطی از فناوری پوسته بیوراکتور بی¬هوازی غوطه‌ور شده در دماهای مختلف با استفاده از تجزیه‌وتحلیل LCA. طرح فرآیند در شکل ۲ نشان داده‌شده است [٤٤]. سیستم پوسته بیوراکتور بی¬هوازی غوطه‌ور شده گزارش‌شده توسط یک راکتور بی‌هوازی متصل به دو مخزن غشا که شامل غشاهای فوق تصفیه تجاری است. این نیروگاه ماند لجن[٢٧]، هفتاد روز کار می‌کند و دمای موردمطالعه ۲۰ و ۳۰ درجه سانتی‌گراداست [٤٨].



شکل ۲. طرح فرآیند SAnMBR برای شبکه‌های فاضلاب شهری [۸۰].

[26] SAnMBR: Submerged Anaerobic Membrane Reactor
[27] SRT: Sludge Retention Time

۵-۳ ارزیابی چرخه حیات هضم بی‌هوازی در آزمایشگاه تصفیه فاضلاب

جریان‌های فاضلاب تولیدشده در بخش‌های صنعتی معمولاً با محتوای آلی زیاد و غلیظ و وجود ترکیبات آلی پیچیده و به‌تدریج قابل‌تجزیه بیولوژیکی مشخص می‌شوند که بسته به کارخانه موردمطالعه تصفیه آن‌ها آسان نیست [۲۹]. در طراحی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب[۲۸]، به‌ویژه برای پساب‌های صنعتی، لازم است عوامل مرتبط با خصوصیات فاضلاب در نظر گرفته شود. بااین‌حال، مفهوم اقتصاد چرخشی مفاهیم تصفیه‌خانه فاضلاب را با تأثیرات زیست‌محیطی کم، هزینه و عملیات سرمایه‌گذاری و بهره‌وری بالای انرژی به سایر فناوری‌ها منتقل کرده است؛ بنابراین، تصفیه‌خانه فاضلاب باید نه‌تنها پساب تمیز مطابق با قوانین زیست‌محیطی تولید کند، بلکه همچنین یک جریان تصفیه‌شده قادر به استفاده مجدد، بازیابی انرژی و مواد مغذی در طی فرآیند است [۴۹]. قولی و همکاران (۲۰۱۰) اثرات بالقوه زیست‌محیطی سه گزینه تصفیه فاضلاب صنعتی را ارزیابی کرد: یک راکتور لجن بی‌هوازی با سرعت‌بالا با تولید بیوگاز (با داده‌های کل مقیاس). یک درمان سلول سوختی میکروبی با تولید مستقیم برق (داده‌های مقیاس آزمایشی کارخانه)؛ و یک سلول الکترولیز میکروبی با تولید پر اکسید هیدروژن (داده‌های به‌دست‌آمده از یک راکتور در مقیاس آزمایشگاهی). نتایج در همه موارد تأثیر منفی عمده مرتبط با مصرف برق را نشان داد. سلول الکترولیز میکروبی با تولید پر اکسید هیدروژن بهترین گزینه از بین این سه فناوری بود که دلیل اصلی آن تأثیر مثبت تولید مواد شیمیایی بود. در راکتور بی‌هوازی، تأثیر مثبت حاصل از بیوگاز و تولید انرژی بیش از تأثیرات منفی زیست‌محیطی است. درواقع، منافع حاصل از جابجایی منابع وابسته به سوخت فسیلی بیش از هزینه زیست‌محیطی ساخت و بهره‌برداری از کارخانه تصفیه در هر سه مورد است، اگرچه مقیاس محدود داده‌های موجود برای یکی از فرآیندها به‌طورجدی بر این نتیجه تأثیر گذاشت [۵۰].

جدول۵. مطالعات ارزیابی چرخه حیات در استفاده از راکتورهای بی‌هوازی برای تصفیه فاضلاب صنعتی

فاضلاب	سیستم بی‌هوازی[a]	روش‌های LCIA	دسته‌بندی‌ها LCIA[b]	منابع
صنایع لبنی	UASB reactor	CML 2 baseline2000, World 1995 normalization set	ADP, GWP, ODP, HTP, FAETP, MAETP, TETP POCP, AP and EP.	[۵۱]
فاضلاب شبیه‌سازی‌شده	HR-AS	IMPACT 2002+(v.2.03)	Carcinogens, TETP, GWP, ODP, AP, NRE and end-points (human health, climate change, ecosystem quality, resources)	[۵۰]

[28] WWTPs: Water Treatment Plants

صنعت فراوری مواد غذایی	Un-specified anaerobic reactor	Hybrid LCA(economy and energy flow)	Grey relational analysis	[۵۲]
فاضلاب و شبیه‌سازی باقدرت متوسط	AnMBR	Life cycle costing(LCC), net energy balance(NEB), and life cycle assessment (LCA) methods.	Tools for the Reduction and Assessment of Chemicaland Other Environmenta Impacts (TRACI)developed by the U.S. Environmental Protection Agency l	[۴۶]
صنعت خمیرکاغذ و کاغذ	UASB	CML-IA baseline4.1, with the addition of water extraction	EP, HTTP, FAETP, and the GWP100 method for GHG emissions	[۵۳]
فاضلاب‌های صنعتی و کشاورزی	UASB / EGSB	-	Multi-criteria analysis(MCA) for sustainable development indicators(SDIs)	[۵۴]
فاضلاب نشاسته‌ای	Un-specified anaerobic reactor	CML 2001	GWP and EP	[۵۵]

AnMBR.a- پوسته راکتور بیولوژیکی بی‌هوازی، EGSB- بستر لجن دانه‌ای منبسط‌شده، HR_AS- سیستم بی‌هوازی با سرعت‌بالا، UASB-پوشش بستر لجن بی‌هوازی.

ADP.b- پتانسیل تخریب غیر زیستی، AP- پتانسیل اسیدی شدن EP- پتانسیل اوتروفیکاسیون، FAETP- پتانسیل مسمومیت آبزیان در آب شیرین، GWP- پتانسیل گرم شدن کره زمین، HTTP- پتانسیل سمیت انسانی، MAETP- پتانسیل مسمومیت زیست‌محیطی در آب دریا، NRE- انرژی تجدید ناپذیر، ODP- پتانسیل تخریب لایه ازن، POCP- پتانسیل اکسیداسیون فتوشیمیایی، TETP- پتانسیل مسمومیت زیست‌محیطی زمینی.

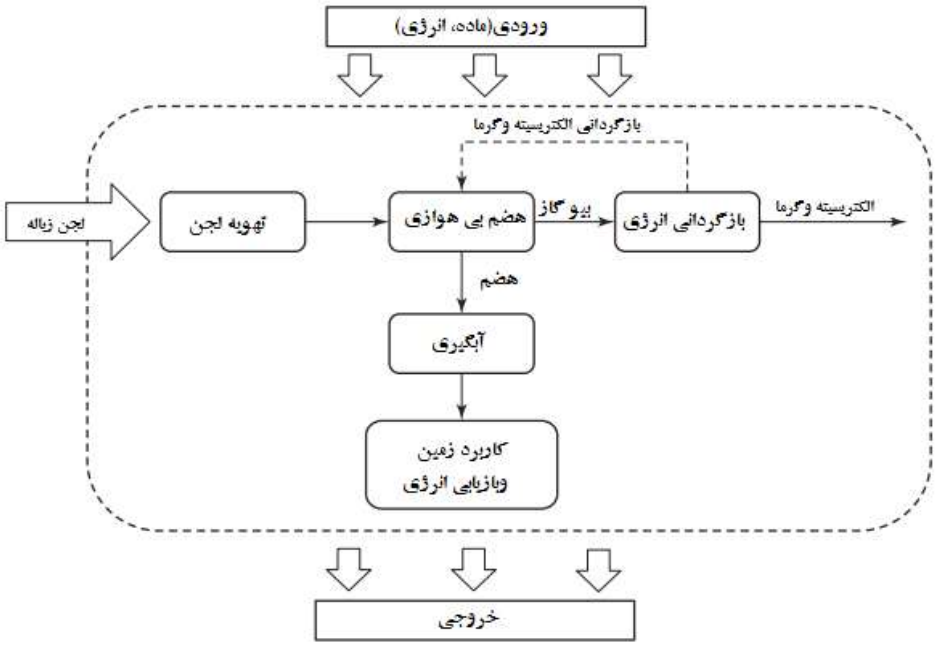
روش ارزیابی چرخه حیات همچنین به‌عنوان ابزاری برای تجزیه‌وتحلیل بهترین فناوری موجود برای تصفیه پساب تولیدشده در صنایع لبنی استفاده‌شده است [۵۱]. در میان شش سیستم مختلف لجن فعال، لجن هوادهی با

سرعت‌بالا و گسترش‌یافته، لجن فعال با یک راکتور آنوکسیک قبل از حوضه هوادهی، یک تالاب هوادهی و یک راکتور پوششی بی‌هوازی لجن با جریان بالارونده، هضم بی‌هوازی دوستانه‌ترین محیط اقتصادی و اقتصادی بود، در تولید گازهای گلخانه‌ای کمتر و انرژی موردنیاز در این اثر، ترکیبی از اقتصاد و محیط‌زیست قبلاً ایجادشده بود، چیزی که در سایر آثار نیز بیشتر توسعه یافته است؛ بنابراین، پذیرفته‌شده است که ارزیابی چرخه حیات باید با جنبه‌های فنی و اقتصادی ترکیب شود [٥٦, ٥٧].

٦-٣ کاربرد ارزیابی چرخه حیات در هضم بی‌هوازی از سیستم فاضلاب (ADWWS)

ارزیابی چرخه حیات به‌طور گسترده‌ای برای ارزیابی امکان‌سنجی زیست‌محیطی و اقتصادی هضم بی‌هوازی مورداستفاده در مدیریت لجن استفاده‌شده است. همان‌طور که توسط یو شیدا و همکاران گزارش‌شده است. (۲۰۱۳)، تعداد زیادی از آثار بر روی مطالعه هضم بی‌هوازی از منظر محیط‌زیست با استفاده از ارزیابی چرخه حیات متمرکزشده‌اند. هضم بی‌هوازی از سیستم فاضلاب[29] به‌طور سنتی به‌عنوان یک سیستم ورودی-خروجی مدل‌سازی می‌شود، اما این مفهوم به سمت سیستم‌های پیچیده‌تر تغییریافته است که در آن ویژگی‌های اضافی نیز وجود دارد، عمدتاً به دلیل امکان بازیابی مواد باارزش از لجن فاضلاب. اگرچه هر دو روش متفاوت است، معمول‌ترین روش برای تعریف واحد عملکردی ازنظر مقدار لجن خشک قابل مدیریت است [٥٨]. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، فرایندهای بالادست (تصفیه فاضلاب) را شامل نمی‌شوند؛ بنابراین، در نظر گرفته می‌شود که لجن بدون تأثیرات زیست‌محیطی وارد هضم بی‌هوازی می‌شود. این بدان معنی است که لجن به‌عنوان زباله در نظر گرفته می‌شود، اگرچه انرژی و یا مواد مغذی بازیابی می‌شود و در حقیقت، لجن باید به‌عنوان زباله به محصول در نظر گرفته شود. این فرض، همان‌طور که قبلاً فرض بار صفر نامیده می‌شود، معمولاً ارزیابی چرخه حیات در هضم بی‌هوازی از سیستم فاضلاب صرف‌نظر از هدف مطالعه اعمال می‌شود [٤٤]. مدل‌سازی هضم بی‌هوازی از سیستم فاضلاب به در نظر گرفتن لجن به‌عنوان زباله یا به‌عنوان زباله به محصول (در صورت بازیافت انرژی یا مواد) بستگی دارد. در حالت اول، هضم بی‌هوازی از سیستم فاضلاب تابع تصفیه پسماندها است و درنتیجه، کلیه تأثیرات به تصفیه فاضلاب اختصاص می‌یابد. بااین‌حال، همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده‌شده است، ارزیابی چرخه حیات در هضم بی‌هوازی از سیستم فاضلاب محدود به تیمار لجن نیست بلکه شامل بازیابی انرژی و مواد مغذی نیز است؛ بنابراین، همان‌طور که توسط هایمرسون و همکاران (۲۰۱۷) گزارش‌شده است، عملکرد اصلی سیستم تصفیه لجن مورداستفاده نهایی است، درحالی‌که عملکرد ثانویه تولید بیوگاز و هضم نیز علاوه بر این می‌تواند عملکردهای بیشتری مانند انرژی و بازیافت مواد مغذی داشته باشد. در این موارد، متداول‌ترین روش برای حل چندمنظوره با گسترش یا کاهش یا جایگزینی است. همان‌طور که قبلاً توضیح داده شد، در حالت اول، برخی از توابع می‌توانند شامل (گسترش) یا حذف (کاهش) شوند. این رویکردها معمولاً برای مقایسه سیستم‌های مختلف بکار می‌روند و درنتیجه معمولاً برای مقایسه هضم بی‌هوازی از سیستم فاضلاب با سایر فناوری‌ها به کار می‌روند [٤٤].

[29] ADWWS: Anaerobic Digestion of Wastewater Sludge



شکل ۲. روند طرح مدیریت پساب لجن فاضلاب از طریق هضم بی‌هوازی [۸۰].

مطالعات بیشتر ارزیابی چرخه حیات در مورد هضم بی‌هوازی لجن فاضلاب[30] شامل اطلاعات موجودی دقیق‌تری است، بنابراین نتایج واقعی‌تری به دست می‌آورد. هدف اصلی این کار مقایسه مقدار مختلف تصفیه‌خانه با لجن فاضلاب با تعیین کمیت اثرات محیطی بود. در این آثار، بیشتر مقوله‌های زیست‌محیطی ذکرشده در این فصل گنجانده‌شده و کمی شده است؛ بنابراین، یو شیدا و همکاران (۲۰۱۳) ارزیابی چرخه حیات را در هضم بی‌هوازی لجن فاضلاب و استفاده بیشتر از هضم آلی بررسی و نتایج به‌دست‌آمده را با سایر طرح‌های درمان لجن (عمدتاً فرآیندهای حرارتی) مقایسه کرد. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که هضم بی‌هوازی و کاربردهای زمینی دیگر، ازجمله بازیابی انرژی از بیوگاز و استفاده از لجن آلی، باعث کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای نسبت به سایر طرح‌های تصفیه لجن فاضلاب می‌شود [۵۸, ۵۹]

جدول۶. مطالعات ارزیابی چرخه حیات در مورد هضم بی‌هوازی لجن فاضلاب

عملکرد سیستم	واحد عملکردی	فهرست داده‌ها	روش LCIA	دسته‌بندی‌های LCIA	منابع
هضم بی‌هوازی، بیوگاز و استفاده از هضم	یک واحد ماده خشک از لجن مخلوط	عملیاتی و داده‌های مقالات	Characterization factors reported by different authors	EP, ODP, GWP, AP, POCP, ADP, HTP	[۲۰]

[30] ADWWS: Anaerobic Digestion of Wastewater Sludge

پیش درمانی لجن، هضم بی‌هوازی، استفاده از هضم	دو تن لجن خشک	مقالات و محاسبه داده‌ها	Not specified	GWP, HTP, TETP	[۶۰]
هضم بی‌هوازی، بیوگاز و استفاده از هضم	ده لیتر از لجن مخلوط	تجربی و محاسبه داده‌ها	CML 2 baseline2000	EP, GWP, HTP, TTP	[۶۱]
پیش درمانی لجن، هضم بی‌هوازی و استفاده از هضم	ده لیتر از لجن مخلوط	تجربی و محاسبه داده‌ها	CML 2 baseline2000	ADP, EP, GWP, HTP, TTP	[۵۹]
بازیابی انرژی از بیوگاز و لجن هضم شده	یک‌تن ماده خشک از لجن	مقالات و محاسبه داده‌ها	CML2001—Nov. 2010	GWP, POCP, EP, AP, ADP	[۶۲]
پیش درمانی لجن، هضم بی‌هوازی، بیوگاز و استفاده از هضم	یک‌تن ماده خشک از لجن	مقالات و محاسبه داده‌ها	ReCiPe v1.08/ Europe	CC, TA, FE, HT, IR	[۶۳]
هضم بی‌هوازی، بیوگاز و استفاده از هضم	بیست تن از لجن غلیظ	مقالات و محاسبه داده‌ها	CML 2 baseline2000	AP, CC, ADP, POP, EP, HTP, ETP	[۶۴]

ADP – پتانسیل تخریب غیر زیستی، AP – پتانسیل اسیدی شدن، CC – تغییر اقلیم، EP – پتانسیل اوتروفیکاسیون، FAETP – پتانسیل مسمومیت با آب شیرین، FE – یونیزه شدن آب شیرین، GWP – پتانسیل گرم شدن کره زمین، HT – سمیت انسانی، HTTP – پتانسیل سمیت انسانی، IR – تابش یونیزان، MAETP – پتانسیل مسمومیت زیست‌محیطی در آب دریا، NRE – انرژی تجدید ناپذیر، ODP – پتانسیل تخریب لایه ازن، POCP – پتانسیل اکسیداسیون فتوشیمیایی، TA – اسیدی شدن زمینی، TETP – پتانسیل مسمومیت زیست‌محیطی زمینی.

۴. ارزیابی زیست‌محیطی:

ارزیابی زیست‌محیطی یک رویکرد ساختاری برای پیش‌بینی تأثیرات یک اقدام پیشنهادی قبل از اجرا ی آن است. ارزیابی زیست‌محیطی معمولاً هنگامی استفاده می‌شود که تأثیرات یک اقدام بدون مطالعه منظم و متمرکز قابل‌درک نباشد. پس از شناخته شدن یا برآورد تأثیرات، می‌توان اقدامات لازم را برای جلوگیری از آسیب رساندن به محیط‌زیست (ازجمله معیشت افراد ساکن در آن محیط) و افزایش مزایا انجام داد. ارزیابی محیط‌زیست ابزاری برای جلوگیری از آسیب‌های غیرضروری است که پس از اجرای عمل ترمیم آن می‌تواند هزینه زیادی داشته باشد.

۴-۱ انواع مدل‌های ارزیابی زیست‌محیطی

در دهه گذشته چندین مدل برای ارزیابی زیست‌محیطی تصفیه و دفع مواد زائد جامد شهری ارائه‌شده است [۶۵].

۴-۱-۱ مدل IWM [۶۶]

تفکرچرخه‌حیات را درزمینهٔ مدیریت پسماندهای جامد شهری اعمال می‌کند. ابتدا دریک صفحه گسترده انجام‌شده و بعداً مدل پیشرفته‌تری برای محاسبه موجودی چرخه حیات ارائه می‌کند. این مدل بسیار کاربرپسند و یادگیری آن آسان است اما از همه لحاظ انعطاف‌پذیر نیست [٦٥].

٤-١-٢ مدل EASEWASTE

مدیران را قادر می‌سازد تا ارزیابی زیست‌محیطی سیستم‌های مدیریت پسماند جامد را انجام دهند و در مقایسه با چندین استراتژی مدیریت پسماند و فناوری‌های تصفیه زباله برای منطقه‌ای با جمعیت مشخص و تولید زباله را، بررسی کنند [٦٥].

٤-١-٣ مدل ORWARE

در ابتدا بر روی زباله‌های آلی خانوارها و صنایع متمرکز بود اما به‌طور مداوم گسترش‌یافته است و شامل سایر بخش‌های مادی زباله نیز می‌باشد. مدل ORWARE از ترکیبی از ارزیابی چرخه حیات و تجزیه‌وتحلیل جریان مواد[31] و تراشه‌های ترانس استفاده می‌کند و نتایج را در اثرات زیست‌محیطی مانند گرم شدن کره زمین، اسیدی شدن، غنی‌سازی مواد اولیه و تشکیل ازن فتوشیمیایی جمع می‌کند [٦٧].

٤-١-٤ روش دیگر ارزیابی محصولات یا سیستم‌ها با استفاده از تجزیه‌وتحلیل هزینه و سود

که به‌طور فزاینده‌ای استفاده‌شده است. برای یافتن بهینه‌ترین استراتژی برای تصفیه پسماند با توجه به هزینه-های اقتصادی و زیست‌محیطی و نتایج آن. سود هزینه[32] در میان دیگر مواد زائد آلی انجام‌شده است [٦٨]. یک ویژگی عمده دو ابزار، محدوده سیستم محصول یا سیستمی است که باید ارزیابی شود. یک تفاوت مهم بین ارزیابی سود هزینه و ارزیابی چرخه حیات این است که هدف تجزیه‌وتحلیل سود هزینه بهینه‌سازی منافع جامعه از طریق غلبه بر پیامدهای اقتصادی و زیست‌محیطی بر فرضیات است. ارزیابی چرخه حیات ابزاری استانداردشده است که هدف آن به حداقل رساندن تأثیر بالقوه بر محیط‌زیست، سلامت انسان و منابع است؛ بنابراین محدودیت‌ها به‌طور محدودتری تعریف می‌شوند زیرا اقتصاد در آن لحاظ نشده است [٦٥].

٥. نرم‌افزارهای ارزیابی چرخه حیات (LCA)

٥-١ نرم‌افزار سیما پرو Sima Pro

سیما پرو نرم‌افزار مدل‌سازی و ارزیابی سیستم محصول است که در سال ۱۹۹۰ منتشر شد و در سراسر جهان نیز به فروش می‌رسد. SimaPro توسط مشاوران PRe، مستقر در هلند، توسعه و توزیع‌شده است [٦٩]. یک روش ارزیابی جدید است که با دسته‌های آسیب، زیرگروه‌ها و جریان‌ها یا "موادی" که تأثیرات را بیان می‌کنند، بیان می‌شود با استفاده از این اطلاعات، هزینه‌های چرخه حیات برای یک محصول قابل‌محاسبه است سایر تفسیرهای ارائه‌شده توسط سیما پرو نمایش داده می‌شود. [٧٠]. SimaPro به‌عنوان معیار مورداستفاده قرار می‌گیرد زیرا این تنها سیستم نرم‌افزاری ارزیابی چرخه حیات است که حداقل مورداستفاده ما قرارگرفته است (حداقل طبق اطلاعات ما) که قادر

[31] SFA: Substance Flow Analysis
[32] CBA: Cost Benefit Analysis

است سیستم‌های بزرگ مبتنی بر فرآیند واحد را از Ecoinvent 3 تاکنون محاسبه کند [۷۱]. در SimaPro فقط یک مرجع نرمال‌سازی و یک عامل وزنی برای هر یک از گروه‌های آسیب "سلامت انسان"، "کیفیت اکوسیستم" و "منابع" وجود دارد؛ بنابراین، در SimaPro منابع نرمال‌سازی و عوامل وزنی گروه‌بندی می‌شوند. نرمال‌سازی گروهی مورداستفاده در SimaPro با منابع نرمال‌سازی فردی مورداستفاده در GaBi متفاوت است که تفاوت بین نسبت نتایج مشخص‌شده و نرمال‌سازی را ایجاد می‌کند. بعد از مرحله توزین، این اختلافات از بین می‌روند زیرا محصول مربوط به منابع نرمال‌سازی گروهی و عوامل وزنی مورداستفاده در SimaPro با محصول منابع نرمال‌سازی فردی و فاکتورهای وزنی مورداستفاده در GaBi مطابقت دارد [٦٩].

۱-۱-۵ روش‌های ارزیابی در Sima Pro

با توجه به گستردگی روش‌های تجزیه‌وتحلیل، روش‌هایی که بیشترین کاربرد رادارند در ادامه تعریف می‌شوند که در مطالعات مختلف مورد تجزیه‌وتحلیل، روش‌های CML، IPCC و ReCiPe بیشترین استفاده را داشتند.

۱-۱-۱-۵ CML 2001

روش CML 2001 در ۱۵ اثر استفاده شد. این روش که توسط دانشگاه لیندن در هلند در سال ۲۰۰۱ ایجادشده است، شامل بیش از ۱۷۰۰ جریان مختلف است [۷۲]. دسته‌بندی‌های اساسی شامل اسیدی شدن، تغییر آب‌وهوا، کاهش منابع، سمیت محیطی، اوتروفیکاسیون، سمیت انسانی، تخریب لایه ازن و اکسیداسیون فتوشیمیایی است [۷۳].

۲-۱-۱-۵ IPCC

فقط شامل یک دسته است: تغییرات آب و هوایی که با توجه به پتانسیل گرم شدن کره زمین اندازه‌گیری می‌شود. گروه تغییرات آب و هوایی، از IPCC 2007 بوده، در بسیاری از روش‌های دیگر نیز استفاده می‌شود [۷۲].

۳-۱-۱-۵ ReCiPe

این روش برای داشتن دو سطح شاخص متمایز می‌شود: شاخص‌های نقطه میانی، با واحدهای مختلف برای هر گروه تأثیر که تأثیرات را در طول زنجیره علت و معلولی تجزیه‌وتحلیل می‌کنند: اسیدی شدن، تغییر آب‌وهوا، تخلیه منابع غیرزنده، سمیت‌زیست‌محیطی، پتانسیل اوتروفیکاسیون، سمیت انسانی، تشعشعات یونیزه، استفاده از زمین، تخریب لایه ازن، ذرات معلق و اکسیداسیون فتوشیمیایی و شاخص‌های نقطه پایانی که اثرات زیست‌محیطی را در انتهای این زنجیره علت-معلولی تجزیه‌وتحلیل می‌کنند، واحدهای دسته‌های تأثیر را برای ۳ گروه نقطه پایانی استانداردسازی می‌کنند ازجمله: آسیب به‌سلامت انسان، آسیب به اکوسیستم‌ها و آسیب به دسترسی به منابع [٧٤].

۲-۵ openLCA

هسته اصلی هر مدل‌سازی ارزیابی چرخه حیات مدل‌سازی چرخه عمر محصول موردمطالعه است. در openLCA (همانند ISO 14040)، مدل چرخه عمر یک محصول سیستم محصول نامیده می‌شود و بسته به پایگاه داده و ترجیحات کاربر، روش‌های مختلفی برای ایجاد و تکمیل سیستم‌های محصول وجود دارد. در openLCA، گزینه محاسبه "تجزیه‌وتحلیل" انتخاب شد که نتایج مشابه محاسبه شبکه در SimaPro را ایجاد می‌کند. در

openLCA، یک سیستم محصول که یک‌بار ایجادشده است، می‌تواند ذخیره شود. OpenLCA پیشنهادات بیشتر و نتایج سریع دیگری نیز ارائه می‌دهد [۷۱].

GaBi ۵-۳

GaBi یک نرم‌افزار مدل‌سازی و ارزیابی سیستم محصول است که اولین بار در سال ۱۹۹۲ در بازار ظاهر شد و توسط PE INTERNATIONAL، یک شرکت آلمانی توسعه‌یافته و در سراسر جهان توزیع شد [۶۹]. بیشترین نسخه GaBi مورداستفاده ٤.٤.١٣٩.١ (تلفیقی) بود، با نسخه ٤.١٣١ DB شامل پایگاه داده EcoInvent است. SimaPro و GaBi پیشروترین نرم‌افزارهایی هستند که برای ارزیابی چرخه حیات استفاده می‌شوند. انتظار می‌رود که ارزیابی سیستم‌های محصول با استفاده از دقیق فرآیند واحد، مجموعه نتایج قابل‌مقایسه‌ای را با هر دو ابزار ارائه دهد. عملکرد نرم‌افزار بر اساس یک نمونه تصادفی از ۱۰۰ فرآیند واحد مقایسه می‌شود. در بسیاری از موارد نتایج بین SimaPro و GaBi تقریباً یکسان است، اما در موارد دیگر نتایج اختلافات را نشان می‌دهد. در GaBi یک نرمال‌سازی و یک عامل وزنی به‌طور منحصربه‌فرد برای هر نوع تأثیرگذاری اعمال می‌شوند. بین SimaPro و GaBi در مورد مقادیر مشخص‌شده گرمایش کره زمین تفاوت محسوسی وجود دارد [۶۹].

۶. تعریف دسته‌های تأثیر

دسته‌های تأثیر در مقالات مختلف به شرح زیر تعریف می‌شود:

- توانایی اسیدی شدن (AP) (کیلوگرم گوگرد (SO2) معادل): توانایی مواد را برای اسیدی شدن جو تعریف می‌کند. چنین ترکیباتی می‌تواند باعث باران اسیدی خطرناک بر روی حیوانات خشکی و دریایی شود.
- خطر گرم شدن کره زمین (GWP) (کیلوگرم دی‌اکسید کربن معادل): ظرفیت تحریک گرم شدن کره زمین از طریق آلودگی گازها را توضیح داد.
- پتانسیل اوتروفیکاسیون (کیلوگرم فسفات (PO4) معادل): خطر اوتروفیکاسیون در آب‌های سطحی توسط مواد خوراکی را توضیح می‌دهد.
- توانایی تخریب لایه ازن (ODP) (کیلوگرم کلروفلوروکربن‌ها (CFC-11) معادل): این توانایی ترکیبات را برای القای از بین رفتن لایه ازن تعریف می‌کند.
- توانایی مسمومیت سمیت‌زمینی (TE) (١/٤ کیلوگرم DB معادل): توانایی مواد شیمیایی را برای تأثیر بر روی انسان، نیروگاه‌ها و جانوران شناسایی کرد. هر یک از این آلودگی‌ها حاوی فلزات سنگین یا مواد آلی هستند که ازنظر بیولوژیکی بودند.
- سمیت‌زیست‌محیطی دریایی آب شیرین (EF) (١/٤ کیلوگرم DB معادل): مربوط به تأثیر بر روی زیستگاه‌های آب شیرین (جوی‌ها، آبراهه‌ها و مخازن با شوری کمتر از ۰/۵ درصد)، ناشی از آلودگی، آب و غلظت سطح مواد رادیواکتیو.
- تخلیه آب (WD) (مترمکعب): این توانایی مواد در القای کاهش آب را توضیح می‌دهد.
- تخلیه فلز (MD) (کیلوگرم آهن معادل[۳۳]): این توانایی ترکیبات تخلیه کننده فلز را تعریف می‌کند.

[33] kg Fe eq

- **حذف فسیلی (FD) (کیلوگرم روغن معادل[34]): این توانایی مواد در القای کاهش سوخت طبیعی را توضیح می‌دهد [۱۲]**

نتیجه‌گیری

این مطالعه چندین مقاله را مرور کرده و نکات کلیدی را در اختیار محققان برای توسعه و مدیریت بهبود تصفیه‌خانه از طریق اقدامات ارزیابی چرخه حیات قرار داده است. در جدول ۲ دارای انتشاراتی به اتمسفر می‌باشد که از میان مقادیر انتشار دی‌اکسید کربن سهم قابل‌توجهی را به خود اختصاص داده است. همچنین فرآیند تصفیه لجن فاضلاب دارای انتشاراتی به منابع آبی واک می‌باشد که از میان فلزات سنگین، کادمیوم و کروم خطرناک‌ترین فلزات سمی اطلاق می‌شوند که در فرآیند تصفیه لجن فاضلاب سهم قابل‌توجهی از انتشارات را به خود اختصاص داده‌اند و در صورت مصرف انسانی باعث ایجاد بیماری‌های خطرناکی ازجمله سرطان ریه، نرم‌استخوانی، پروتئینوری و احتمال آسیب شدید کلیه می‌شوند؛ که با توجه به آسیب‌های محیطی و انسانی موارد ذکرشده تیمار هضم بی‌هوازی به دلیل وجود فلزات سنگین، بالاترین میانگین مسمومیت سمیت آب شیرین را دارد. سهم محصولات دارویی و مراقبت شخصی در لجن به‌طورکلی مسمومیت با آب شیرین در مقایسه با فلزات سنگین ناچیز است؛ بنابراین، باید توجه ویژه‌ای به فلزات سنگین، به‌ویژه روی، داده شود تا اطمینان حاصل شود که مسمومیت با آب شیرین لجن فاضلاب مورداستفاده برای مصارف کشاورزی از حد تخمین زده‌شده برای فرآیندهای حرارتی فراتر نرود. هضم بی‌هوازی از لجن فاضلاب دارای ارزیابی چرخه حیات شناسایی عوامل مهمی را که به محیط پیشرو کمک می‌کند، امکان‌پذیر می‌کند. با توجه به عواملی که بیشترین تأثیرات زیست‌محیطی تغییرات آب و هوایی داشته‌اند ازجمله انتشارات که در هوا وجود دارد (انتشار گازهای هوایی از خط تصفیه فاضلاب[35]) و تقاضای انرژی (برق از خط تصفیه فاضلاب) در خط تصفیه فاضلاب مهم‌ترین آن‌ها هستند (حدود ۶۰ درصد و ۲۵ درصد از کلیه عوامل شرکت‌کننده در خط تصفیه فاضلاب). سهم حاصل از انتشار در هوا در لجن (انتشار به خط تصفیه لجن[36]) فقط ۵ درصد است [۷۵]. ارزیابی تأثیرات زیست‌محیطی با ابزار ارزیابی چرخه حیات، فاقد جزئیات مربوط به لایه‌ها و فن‌آوری‌های مورداستفاده در فرایند هضم بی‌هوازی و نیروگاه ترکیبی گرما و الکتریسیته هستند؛ بنابراین، لازم است این جزئیات بهتر توصیف شود تا توسعه تحقیقات در مسیرهای صنعتی برای به حداقل رساندن بارهای زیست‌محیطی امکان‌پذیر باشد. مقایسه ساختار ارزیابی چرخه حیات هر مقاله مورد تجزیه‌وتحلیل امکان‌پذیر است، زیرا پارامترها و مراحلی به‌خوبی توسط استانداردهای ایزو[37] تعریف‌شده‌اند. تأثیرات محیطی هر مرحله باید به‌دقت ارزیابی و درک شود تا به ایجاد یک استراتژی پایداری منطقه‌ای برای تولید بیوگاز از کود کمک کند. نتایج ارزیابی اثرات محیط زیستی نیروگاه بیوگاز سوز تولید هم‌زمان برق و حرارت بیانگر این حقیقت است که در مراحل تصفیه لجن فاضلاب و درنهایت که منجر به تولید برق و گرما از آن می‌شود دارای اثرات زیست‌محیطی در طول چرخه حیات این نیروگاه بود و این نتایج مشابه با نتایج به‌دست‌آمده توسط لان کو وهم کاران (۲۰۲۰) و تاپارنی و همکاران (۲۰۲۰) می‌باشد و دارای اثرات زیست محیط ازجمله پتانسیل تغییر اقلیم- پتانسیل کاهش منابع - سوخت فسیلی و فلزات- پتانسیل کاهش آب- پتانسیل تخریب ازن- پتانسیل اوتروفیکاسیون، آب شیرین و دریایی- پتانسیل اسیدی شدن زمینی-

[34] oil kg eq
[35] Ww: wastewater treatment line
[36] SL: sludge treatment line
[37] ISO: International Organization For Standardization

پتانسیل یونیزاسیون- پتانسیل سمیت‌زیست‌محیطی، آب شیرین، دریایی و زمینی- پتانسیل تشکیل اکسیدان های فتوشیمیایی- پتانسیل اشغال زمین شهری و کشاورزی- پتانسیل تشکیل ذرات معلق - پتانسیل سمیت انسانی می‌باشد. در تمام حالات ارزیابی چرخه حیات در محدوده خط لجن[38]، عوامل مؤثر با بیشترین مقادیر مطلق دفع نهایی لجن (یعنی تأثیرات احتمالی (برای سمیت انسانی) یا اثرات اجتناب شده (برای همه گروه‌های دیگر))، ۱۵ درصد برای تخریب ازن تا تقریباً ۸۰ درصد برای سمیت انسانی، تعادل انرژی از ۱۲ درصد برای تغییرات آب‌وهوا به بیش از ۷۵ درصد برای کاهش ازن و آلودگی آب از ۱۱ درصد برای سمیت انسانی و تشعشات یونیزه کننده تا ۲۲ درصد برای کاهش فسیلی. همچنین مهم است بیان شود که عامل انتشار گازهای موجود در هوا فقط به‌طور مضر فقط برای تغییرات آب‌وهوا بیش از ۸۰ درصد از تأثیرات ناشی از محیط‌زیست و تنها کمتر از ۸ درصد از کل اثرات زیست‌محیطی در محل دفن زباله به دلیل انباشته شدن آن است [۷۶]. می‌توان گفت که اصلی‌ترین عاملی که از طریق گروه تأثیر سمیت انسانی به تأثیرات محیط‌زیست کمک می‌کند، کیفیت هضم مواد ورودی و مقدار آن است؛ بنابراین، با در نظر گرفتن و تغییر در دفع هضم نهایی، می‌توان تأثیرات کلی محیط زیستی را کاهش داد. جالب‌توجه است، سمیت انسانی تنها گروه از دسته‌های تأثیر است که منجر به اثرات کلی در خط لجن نمی‌شود. این اتفاق به دلیل مقادیر کافی فلزات سنگین و سایر آلاینده‌های سمی موجود در طی فعالیت هضم بی هوازی است [۷۷]. علاوه بر این، برای سمیت انسانی، برخی از تأثیرات جزئی از تصفیه اضافی آب که بسیار آلوده است در نظر گرفته می‌شود و به این معنی است که می‌تواند به‌عنوان منبع اضافی برای بازیابی منابع استفاده شود [۷۸،۷۹]. بقیه دسته‌های تأثیر (به‌عنوان‌مثال، تشعشات یونیزه، اشغال زمین‌های کشاورزی، تخریب فلزات و فسیل‌ها، اسیدی شدن زمین، فرسایش آب شیرین و تخریب ازن) از الگوی مشابهی پیروی می‌کنند. برای همه سناریوهای ارزیابی چرخه حیات در محدوده خط لجن، نتیجه کلی را می‌توان به‌عنوان اثرات اجتناب شده ذکر کرد. عوامل اصلی دفع لجن و برق و بار تصفیه‌خانه فاضلاب در میزان کمتری (با حداکثر ۲۰ درصد برای اسیدی شدن زمینی و کمتر برای سایر دسته‌های ضربه) هستند. تأثیرات زیست‌محیطی (اشغال زمین‌های کشاورزی، تخریب فلزات و فسیل‌ها، تخریب ازن) از اثرات زیست‌محیطی جلوگیری می‌کند، زیرا خط تصفیه فاضلاب منجر به اثرات زیست‌محیطی بالقوه در تمام گروه‌های تأثیر می‌شود، درحالی‌که خط تصفیه لجن باعث جلوگیری از اثرات زیست‌محیطی که بیشتر برای دسته‌های تأثیرات (به‌جز سمیت انسانی) است. به‌طورکلی، می‌توان گفت که خط تصفیه فاضلاب اثر مضر بیشتری نسبت به خط تصفیه لجن در محیط‌زیست دارد و هرچه مقیاس آن بزرگ‌تر باشد، برخلاف خط تصفیه لجن، اثرات بالقوه زیست‌محیطی بزرگ‌تر خواهد بود. هضم بی‌هوازی با تأثیر در مسمومیت انسان به دلیل دفع نهایی لجن (دفع لجن) از خط تصفیه لجن، بر محیط تأثیر منفی می‌گذارد. درعین‌حال، تولید هضم نیز اثر مثبتی دارد که از طریق منابع (کود) و بازیابی انرژی (برق و گرما) حاصل می‌شود و همچنین به دلیل تصفیه اضافی آب (بار تصفیه‌خانه فاضلاب) که ناشی از خط تصفیه لجن است [۷۵].

منابع

1. Singh, R.P., et al., *Management of urban solid waste: Vermicomposting a sustainable option.* Resources, conservation and recycling, 2011. **55**(7): p. 719-729.
2. Spinosa, L., et al., *Sustainable and innovative solutions for sewage sludge management.* Water, 2011. **3**(2): p. 702-717.

[38] SL-LCA: LCA performed within the boundaries of the sludge line

3. Aziz, N.I.H.A., M.M. Hanafiah, and S.H. Gheewala, *A review on life cycle assessment of biogas production: Challenges and future perspectives in Malaysia.* Biomass and Bioenergy, 2019. **122**: p. 361-374.
4. Yadav, M., et al., *Biological treatment of lignocellulosic biomass by Chaetomium globosporum: process derivation and improved biogas production.* International journal of biological macromolecules, 2019. **128**: p. 176-183.
5. Morero, B., E. Groppelli, and E.A. Campanella, *Life cycle assessment of biomethane use in Argentina.* Bioresource technology, 2015. **182**: p. 208-216.
6. Berglund, M. and P. Börjesson, *Assessment of energy performance in the life-cycle of biogas production.* Biomass and Bioenergy, 2006. **30**(3): p. 254-266.
7. Mezzullo, W.G., M.C. McManus, and G.P. Hammond, *Life cycle assessment of a small-scale anaerobic digestion plant from cattle waste.* Applied Energy, 2013. **102**: p. 657-664.
8. Esteves, E.M.M., et al., *Life cycle assessment of manure biogas production: A review.* Journal of Cleaner Production, 2019. **219**: p. 411-423.
9. Fantin, V., et al., *Environmental assessment of electricity generation from an Italian anaerobic digestion plant.* Biomass and Bioenergy, 2015. **83**: p. 422-435.
10. Ioannou-Ttofa, L., et al., *Life cycle assessment of household biogas production in Egypt: Influence of digester volume, biogas leakages, and digestate valorization as biofertilizer.* Journal of Cleaner Production, 2021. **286**: p. 125468.
11. Wang, Y., et al., *Life cycle assessment of large-scale and household biogas plants in northwest China.* Journal of Cleaner Production, 2018. **192**: p. 221-235.
12. Singh, A.D., et al., *Life-cycle assessment of sewage sludge-based large-scale biogas plant.* Bioresource technology, 2020. **309**: p. 123373.
13. Slorach, P.C., et al., *Environmental sustainability of anaerobic digestion of household food waste.* Journal of environmental management, 2019. **236**: p. 798-814.
14. Ding, A., et al., *Life cycle assessment of sewage sludge treatment and disposal based on nutrient and energy recovery: A review.* Science of The Total Environment, 2021: p. 144451.
15. Kan, S., et al., *Assessment of energy efficiency for the life cycle of large and medium-sized methane project.* Kezaisheng Nengyuan/Renewable Energy Resources, 2015. **33**(6): p. 908-914.
16. Xiao, C., et al., *Life cycle and economic assessments of biogas production from microalgae biomass with hydrothermal pretreatment via anaerobic digestion.* Renewable Energy, 2020. **151**: p. 70-78.
17. Aziz, N.I.H.A. and M.M. Hanafiah, *Life cycle analysis of biogas production from anaerobic digestion of palm oil mill effluent.* Renewable Energy, 2020. **145**: p. 847-857.
18. Curran, M.A., *Life cycle assessment: a review of the methodology and its application to sustainability.* Current Opinion in Chemical Engineering, 2013. **2**(3): p. 273-277.
19. Thomassen, M.A., et al., *Life cycle assessment of conventional and organic milk production in the Netherlands.* Agricultural systems, 2008. **96**(1-3): p. 95-107.
20. Hospido, A., et al., *Environmental evaluation of different treatment processes for sludge from urban wastewater treatments: Anaerobic digestion versus thermal processes (10 pp).* The International Journal of Life Cycle Assessment, 2005. **10**(5): p. 336-345.
21. Sablayrolles, C., B. Gabrielle, and M. Montrejaud-Vignoles, *Life cycle assessment of biosolids land application and evaluation of the factors impacting human toxicity through plant uptake.* Journal of Industrial Ecology, 2010. **14**(2): p. 231-241.

22. Houillon, G. and O. Jolliet, *Life cycle assessment of processes for the treatment of wastewater urban sludge: energy and global warming analysis.* Journal of cleaner production, 2005. **13**(3): p. 287-299.
23. Tarpani, R.R.Z., et al., *Life cycle environmental impacts of sewage sludge treatment methods for resource recovery considering ecotoxicity of heavy metals and pharmaceutical and personal care products.* Journal of environmental management, 2020. **260**: p. 109643.
24. Dong, B., et al., *Changes of heavy metal speciation during high-solid anaerobic digestion of sewage sludge.* Bioresource Technology, 2013. **131**: p. 152-158.
25. Dąbrowska, L. and A. Rosińska, *Change of PCBs and forms of heavy metals in sewage sludge during thermophilic anaerobic digestion.* Chemosphere, 2012. **88**(2): p. 168-173.
26. Liu, Y., et al., *Evolution of heavy metal speciation during the aerobic composting process of sewage sludge.* Chemosphere, 2007. **67**(5): p. 1025-1032.
27. Verlicchi, P. and E. Zambello, *Pharmaceuticals and personal care products in untreated and treated sewage sludge: occurrence and environmental risk in the case of application on soil—a critical review.* Science of the Total Environment, 2015. **538**: p. 750-767.
28. McClellan, K. and R.U. Halden, *Pharmaceuticals and personal care products in archived US biosolids from the 2001 EPA national sewage sludge survey.* Water research, 2010. **44**(2): p. 658-668.
29. Appels, L., et al., *Principios y potencial de la digestión anaerobia de lodos activados por residuos*. Prog. Combustible de energía. Sci, 2008. **34**: p. 755-781.
30. Ma, T., H. Yang, and L. Lu, *Feasibility study and economic analysis of pumped hydro storage and battery storage for a renewable energy powered island.* Energy Conversion and Management, 2014. **79**: p. 387-397.
31. Abbasi, T., S. Tauseef, and S.A. Abbasi, *Biogas energy*. Vol. 2. 2011: Springer Science & Business Media.
32. Zeeman, G. and G. Lettinga, *The role of anaerobic digestion of domestic sewage in closing the water and nutrient cycle at community level.* Water Science and Technology, 1999. **39**(5): p. 187-194.
33. Gregson, N., et al., *Interrogating the circular economy: the moral economy of resource recovery in the EU.* Economy and society, 2015. **44**(2): p. 218-243.
34. Verstraete, W. and S.E. Vlaeminck, *ZeroWasteWater: short-cycling of wastewater resources for sustainable cities of the future.* International Journal of Sustainable Development & World Ecology, 2011. **18**(3): p. 253-264.
35. Vickers, N.J., *Animal communication: when i'm calling you, will you answer too?* Current biology, 2017. **27**(14): p. R713-R715.
36. Puyol, D., et al., *A mechanistic model for anaerobic phototrophs in domestic wastewater applications: photo-anaerobic model (PAnM).* Water research, 2017. **116**: p. 241-253.
37. McCarty, P.L., J. Bae, and J. Kim, *Domestic wastewater treatment as a net energy producer–can this be achieved?* 2011, ACS Publications.
38. Chernicharo, C., et al., *Anaerobic sewage treatment: state of the art, constraints and challenges.* Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, 2015. **14**(4): p. 649-679.
39. Winkler, M.K., R. Kleerebezem, and M.C. van Loosdrecht, *Integration of anammox into the aerobic granular sludge process for main stream wastewater treatment at ambient temperatures.* Water Res, 2012. **46**(1): p. 136-44.

40. Matassa, S., N. Boon, and W. Verstraete, *Resource recovery from used water: The manufacturing abilities of hydrogen-oxidizing bacteria.* water research, 2015. **68**: p. 467-478.
41. Batstone, D.J., et al., *Mathematical modelling of anaerobic digestion processes: applications and future needs.* Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, 2015. **14**(4): p. 595-613.
42. Martinez-Sosa, D., et al., *Anaerobic submerged membrane bioreactor (AnSMBR) for municipal wastewater treatment under mesophilic and psychrophilic temperature conditions.* Bioresource technology, 2011. **102**(22): p. 10377-10385.
43. Pintilie, L., et al., *Urban wastewater reclamation for industrial reuse: An LCA case study.* Journal of cleaner production, 2016. **139**: p. 1-14.
44. Pretel, R., et al., *Economic and environmental sustainability of submerged anaerobic MBR-based (AnMBR-based) technology as compared to aerobic-based technologies for moderate-/high-loaded urban wastewater treatment.* Journal of Environmental Management, 2016. **166**: p. 45-54.
45. Skouteris, G., et al., *Anaerobic membrane bioreactors for wastewater treatment: A review.* Chemical Engineering Journal, 2012. **198**: p. 138-148.
46. Smith, A.L., et al., *Navigating wastewater energy recovery strategies: a life cycle comparison of anaerobic membrane bioreactor and conventional treatment systems with anaerobic digestion.* Environmental science & technology, 2014. **48**(10): p. 5972-5981.
47. Wei, C.-H., et al., *Sustainable organic loading rate and energy recovery potential of mesophilic anaerobic membrane bioreactor for municipal wastewater treatment.* Bioresource technology, 2014. **166**: p. 326-334.
48. Ioannou-Ttofa, L., et al., *The environmental footprint of a membrane bioreactor treatment process through Life Cycle Analysis*. Sci Total Environ, 2016. **568**: p. 306-318.
49. Massara, T.M., et al. *Benchmarking of low environmental footprint biological processes for the treatment of industrial waste streams*. in *CYPRUS2016 4th International Conference on Sustainable Solid Waste Management*. 2016.
50. Foley, J.M., et al., *Life cycle assessment of high-rate anaerobic treatment, microbial fuel cells, and microbial electrolysis cells.* Environmental science & technology, 2010. **44**(9): p. 3629-3637.
51. Georgiopoulou, M., et al., *Selection of the best available technology for industrial wastewater treatment based on environmental evaluation of alternative treatment technologies: the case of milk industry*. Fresenius Environmental Bulletin, 2008. **17**(1): p. 111.
52. Wu, J.-G., et al., *Life cycle assessment of a wastewater treatment plant focused on material and energy flows.* Environmental management, 2010. **46**(4): p. 610-617.
53. O'Connor, M., G. Garnier, and W. Batchelor, *Life cycle assessment comparison of industrial effluent management strategies.* Journal of cleaner production, 2014. **79**: p. 168-181.
54. Meneses-Jácome, A., et al., *Sustainable Energy from agro-industrial wastewaters in Latin-America.* Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016. **56**: p. 1249-1262.
55. Vera, L., et al., *LCA based comparative study of a microbial oil production starch wastewater treatment plant and its improvements with the combination of CHP system in Shandong, China.* Resources, Conservation and Recycling, 2015. **96**: p. 1-10.
56. Hospido, A., M.T. Moreira, and G. Feijoo, *A comparison of municipal wastewater treatment plants for big centres of population in Galicia (Spain).* The International Journal of Life Cycle Assessment, 2008. **13**(1): p. 57-64.

57. Krzeminski, P., et al., *Membrane bioreactors–a review on recent developments in energy reduction, fouling control, novel configurations, LCA and market prospects.* Journal of Membrane Science, 2017. **527**: p. 207-227.
58. Yoshida, H., T.H. Christensen, and C. Scheutz, *Life cycle assessment of sewage sludge management: a review.* Waste Management & Research, 2013. **31**(11): p. 1083-1101.
59. Carballa, M., C. Duran, and A. Hospido, *Should we pretreat solid waste prior to anaerobic digestion? An assessment of its environmental cost.* Environmental science & technology, 2011. **45**(24): p. 10306-10314.
60. Peters, G.M. and H.V. Rowley, *Environmental comparison of biosolids management systems using life cycle assessment.* 2009, ACS Publications.
61. Hospido, A., et al., *Environmental assessment of anaerobically digested sludge reuse in agriculture: potential impacts of emerging micropollutants.* Water research, 2010. **44**(10): p. 3225-3233.
62. Mills, N., et al., *Environmental & economic life cycle assessment of current & future sewage sludge to energy technologies.* Waste Manag, 2014. **34**(1): p. 185-95.
63. Gourdet, C., et al., *In quest of environmental hotspots of sewage sludge treatment combining anaerobic digestion and mechanical dewatering: A life cycle assessment approach.* Journal of Cleaner Production, 2017. **143**: p. 1123-1136.
64. Li, H., et al., *Environmental and economic life cycle assessment of energy recovery from sewage sludge through different anaerobic digestion pathways.* Energy, 2017. **126**: p. 649-657.
65. Kirkeby, J.T., et al., *Environmental assessment of solid waste systems and technologies: EASEWASTE.* Waste Management & Research, 2006. **24**(1): p. 3-15.
66. White, P.R., M. Franke, and P. Hindle, *Integrated Solid Waste Management: A Lifecycle Inventory: A Lifecycle Inventory.* 1995: Springer Science & Business Media.
67. Dalemo, M., et al., *A study on problems of management of medical solid wastes in Dar es Salaam and their remedial measures RRAM Mato, GR Kassenga (Dar es Salaam, Tanzania)..... 1 ORWARE–A simulation model for organic waste handling systems. Part 1: Model.* Resources, Conservation and Recycling, 1997. **21**: p. 275-276.
68. Petersen, M. and H.T. Andersen, *Nyttiggørelse af returpapir–En samfundsøkonomisk analyse (Use of waste paper–An economic assessment).* Institut for miljøvurdering, Copenhagen, 2002.
69. Herrmann, I.T. and A. Moltesen, *Does it matter which Life Cycle Assessment (LCA) tool you choose?–a comparative assessment of SimaPro and GaBi.* Journal of Cleaner Production, 2015. **86**: p. 163-169.
70. Ciroth, A., J. Franze, and G. Berlin, *Life cycle costing in SimaPro.* GreenDelta TC, august, 2009.
71. Ciroth, A., S. Winter, and G. Berlin, *openLCA 1.4 overview and first steps.* GreenDelta, Berlin, 2014.
72. Acero, A.P., C. Rodríguez, and A. Ciroth, *LCIA methods.* Impact Assessment Methods in Life Cycle Assessment and Their Impact Categories.[Google Scholar], 2016.
73. Guinée, J.B. and E. Lindeijer, *Handbook on life cycle assessment: operational guide to the ISO standards.* Vol. 7. 2002: Springer Science & Business Media.
74. Goedkoop, M. and R. Spriensma, *The Eco-indicator 99: A damage oriented method for life cycle assessment.* Methodology report, 2001. **2**.
75. Lanko, I., et al., *Life cycle assessment of the mesophilic, thermophilic, and temperature-phased anaerobic digestion of sewage sludge.* Water, 2020. **12**(11): p. 3140.

76. Yu, Q., et al., *Comparative assessment on two full-scale food waste treatment plants with different anaerobic digestion processes*. Journal of Cleaner Production, 2020. **263**: p. 121625.
77. Riau, V., M.Á. De la Rubia, and M. Pérez, *Temperature-phased anaerobic digestion (TPAD) to obtain class A biosolids: a semi-continuous study*. Bioresource technology, 2010. **101**(8): p. 2706-2712.
78. Khan, E.U. and Å. Nordberg, *Membrane distillation process for concentration of nutrients and water recovery from digestate reject water*. Separation and Purification Technology, 2018. **206**: p. 90-98.
79. Quist-Jensen, C.A., et al., *Membrane crystallization for phosphorus recovery and ammonia stripping from reject water from sludge dewatering process*. Desalination, 2018. **440**: p. 156-160.
80. Naushad, M., Life cycle assessment of wastewater treatment. Life cycle assessment and green chemistry series. 2018, Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group. xvii, 305 pages.

Investigation of energy and environmental indicators of biogas-fired power plant (BIO-CHP) wastewater treatment plant south of Tehran using life cycle assessment (LCA)

Mohammad rahmati[1], Mjid rasouli[2*], Hosein haji agha alizadeh[3]

1. Master student of Biosystems Engineering Department, Bu-Ali Sina University (e-mail address Mohandesrahmati76@gmail.com)
2. Assistant Professor, Department of Biosystem Engineering, Bu-Ali Sina University (e-mail address m.rasouli@basu.ac.ir)
3. Associate Professor, Department of Biosystem Engineering, Bu-Ali Sina University

Abstract

With the acceleration of urbanization, the production of urban sludge is increasing rapidly. To minimize the environmental impact on the effluent of the wastewater treatment plant, perform environmental impact analysis and sustainability assessment in various wastewater treatment technical strategies, including wastewater sludge treatment, biogas from anaerobic digestion and energy production, based on life cycle direction. Environmental management is essential and is done internationally. The present study examines many articles in order to identify and investigate the processes in the treatment plant and the environmental effects of a biogas plant based on sewage sludge that has the greatest environmental impact on the biogas production system. The sewage sludge treatment process leads to the entry of heavy metals, pharmaceutical products and personal care into water and soil resources, as well as the production of a series of greenhouse gases into the atmosphere. In this study, while reviewing the maximum research at the global level, the methods used to analyze the results are presented and then, while defining the basic concepts, it expands the concepts. A variety of methods are available to assess environmental impacts that could potentially be used if biogas is produced. Life cycle assessment method was used to evaluate these effects and injuries in this study. The purpose of this study was to evaluate the life cycle and impact of a biogas plant based on municipal wastewater sludge. In general, life cycle assessment evaluates the results obtained from the inventory in nine categories of environmental impacts.

Key words: Anaerobic digestion - Life cycle evaluation - Renewable energies - Sewage sludge - Treatment plant

*Corresponding author: Majid Rasoli
E-mail: m.rasouli@basu.ac.ir