پژوهش در ایمنی، سلامت و محیط زیست / سال ۱۴۰۳/ دوره ۲/ شماره۲/ صفحه ۱-۱۳

پژوهش در ایمنی، سلامت و محیط زیست

فصلنامه علمی پژوهش در ایمنی، سلامت و محیط زیست

ارزیابی چرخه حیات در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب:چالش‌ها، راهبردها و دستورالعمل پیشنهادی

غلامرضا نبی بیدهندی [۱*]، سوده همایون [۲]

[۱] استاد، گروه مهندسی آب و فاضلاب، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

[۲]کارشناس ارشد، گروه مهندسی آب و فاضلاب ، دانشکده محیط زیست ، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

چکیده

دانش ارزیابی چرخه (LCA) رویکردی نوین در ارزیابی اثرات محیطزیستی جهت دستیابی به اهداف توسعه پایدار است. استفاده از ابزارهای LCA اطلاعات ارزشمندی را برای شناسایی و کاهش تأثیرات محیطزیستی فراهم کرده و به تصمیم‌گیری در جهت عملکرد پایدار یک سیستم یا فرآیند کمک می‌کند. تاکنون مطالعات ارزشمندی برای بهبود عملکرد محیطزیستی، اقتصادی و اجتماعی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب با استفاده از دانش LCA انجام گرفته است. در مطالعه حاضر با استفاده از روش مرور سیستماتیک اسناد موجود، به بررسی و تجمیع چالش‌ها و راهبردها در این حوزه پرداخته شده و در نهایت دستورالعمل پیشنهادی واحدی برای ارزیابی چرخه حیات تصفیه‌خانه‌های فاضلاب ارائه می‌شود. با توجه به معیارهای مدنظر در این پژوهش، مقالات بر اساس شاخص‌های ارزیابی بر روی تصفیه‌خانه فاضلاب شهری، بررسی معیارهای LCA و ادغام دانش ارزیابی چرخه حیات در تصفیه‌خانه فاضلاب شهری انتخاب شدند. مطالعه حاضر، مهم‌ترین نکات را برای کمک به توسعه و مدیریت تصفیه فاضلاب از طریق فرایند LCA ارائه کرده است، که از جمله آنها می‌توان به تشویق مطالعات در کشورهای در حال توسعه، تدوین دستورالعمل‌ها و چارچوب استاندارد، تعریف بهتر اهداف، محدوده، تابع عملکردی، فهرست چرخه حیات، استفاده مناسب از پایگاه‌های اطلاعاتی چرخه حیات ملی و منطقه‌ای، گنجاندن مرحله ساخت، تفسیر اثرات تغییر کاربری زمین و انتشار مستقیم گازهای گلخانه‌ای، اشاره کرد. دستورالعمل ارائه شده در این مطالعه از مهم ترین کاستی‌ها و اقدامات خوب شناسایی شده استخراج شده و هدف اصلی آن کمک به توسعه کاربرد LCA در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب و آغاز مسیری برای تهیه یک استاندارد یا پروتکل نهایی است .

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی

تاریخ دریافت: ۲۶ خرداد ۱۴۰۳

بازنگری: ۲۳ مهر۱۴۰۳

تاریخ پذیرش: ۰۷ آبان ۱۴۰۳

تاریخ انتشار: ۰۱ آبان ۱۴۰۳

*نویسنده مسئول:

ghhendi@ut.ac.ir

کلیدواژه‌ها:

تصفیه‌خانه فاضلاب

ارزیابی چرخه حیات

توسعه پایدار

دستورالعمل ارزیابی

مدیریت فاضلاب

مقدمه

ارزیابی چرخه حیات (LCA)

LCA رویکردی در ارزیابی اثرات محیطزیستی مرتبط با تمام مراحل چرخه عمر محصولات، فرآیندها یا خدمات است و طبق گفته نظام و همکاران [۱]. باید به منظور ایجاد فناوری منطبق بر محیطزیست جهت توسعه آینده، ارزیابی شود. در LCA، اثرات محیطزیستی از استخراج مواد خام تا دفع نهایی مواد، یعنی از گهواره تا گور ارزیابی می‌شود [۲]. بنابراین،LCAرویکردی است که اثرات محیطزیستی، اقتصادی و اجتماعی یک محصول یا خدمت را که در طول چرخه حیات خود ایجاد می‌کند، در نظر می‌گیرد [۳]. می‌توان از LCA به عنوان یک ابزار فنی برای شناسایی فرصت‌هایی جهت کاهش اثرات محیطزیستی از طریق در نظر گرفتن بار آلایندگی آن در طول تولید، مصرف و دفع نهایی استفاده کرد [۴]. استفاده از ابزارهای ارزیابی چرخه حیات اطلاعات ارزشمندی را برای شناسایی و کاهش تأثیرات محیطزیستی فراهم کرده و به تصمیم‌گیری در جهت عملکرد پایدار یک سیستم یا فرآیند کمک می‌کند [۵]. مطابق با استانداردهای ISO 14040:2006، چهار مرحله اصلی برای اجرای کامل یک فرایند ارزیابی چرخه حیات، مطابق شکل ۱، وجود دارد.

شکل ۱. مراحل اصلی اجرای کامل یک فرایند ارزیابی چرخه حیات

چشم‌انداز تاریخی رویکرد LCA

رویکرد ارزیابی چرخه حیات (LCA) برای اولین بار در دهه ۱۹۶۰ مطرح شد و از دهه ۱۹۹۰ مورد توجه محققین و سیاست‌گذاران علوم محیطی قرار گرفت. تاکنون اصلاحات مختلفی در طراحی و پیاده‌سازی دانش LCA صورت گرفته است. با این وجود، استراتژی‌های مرتبط با آن، همچنان در حال توسعه هستند [۶]. انجمن سم‌شناسی و شیمی محیطی[1] (SETAC) و آژانس حفاظت از محیطزیست ایالات متحده[2] (USEPA)، مطالعات وسیعی را در سطوح مختلف برای تدوین چارچوبی مشخص جهت تجزیه و تحلیل موجودی چرخه عمر[3] و ارزیابی تأثیر[4] انجام دادند. با تلاش جمعی و مستمر بخش‌های دیگری مانند اتحادیه اروپا، برنامه محیطزیست سازمان ملل متحد، مراکز مطالعاتی مختلف، اتحادیه جهانی ارزیابی چرخه حیات و سازمان استاندارد جهانی[5] (ISO)، یک چارچوب استاندارد برای LCA تعریف شده است [۷]. بر اساس چارچوب شکل‌گرفته، می‌توان هدف انجام LCA را به سه دسته اصلی ارزیابی مقایسه‌ای فرآیندها، ارائه چرخه حیات جایگزین برای یک فرآیند خاص و شناسایی بخش‌های بالقوه برای بهینه‌سازی یک فرآیند مشخص، طبقه‌بندی کرد [۸].

مواد و روش‌ها

روش تحقیق

این پژوهش با جستجو، دریافت و تجزیه و تحلیل متون مربوط به ارزیابی چرخه حیات در تصفیه‌خانه فاضلاب آغاز شد. مقالات مورد استفاده در این مطالعه مروری از بین چهار پایگاه داده معتبر زیر استخراج شدند. هر پایگاه داده، مزایا و معایب خاصی را دارد، بنابراین، استفاده از پایگاه‌های اطلاعاتی مختلف برای پوشش کافی و ارائه یک مطالعه مرور سیستماتیک و کارآمد توصیه می‌شود. در این مطالعه مروری، از چهار منبع پایگاه داده در جستجوی مقالات پژوهشی با استفاده از کلمات و عبارات کلیدی استاندارد مرتبط با موضوع اصلی تحقیق، ارزیابی چرخه حیات در تصفیه‌خانه فاضلاب، استفاده شد.

1.Web of science core collections (WoS) (https://apps.webofknowledge.com)
2. Science Direct (SD) (http://www.sciencedirect.com)
3. Scopus (http://www.scopus.com)
4. Google Scholar (GS) (http://scholar.google.com)

[1] Society of Environmental Toxicology and Chemistry
[2] US Environmental Protection Agency
[3] Life cycle inventory
[4] Impact assessment
[5] International standard organization

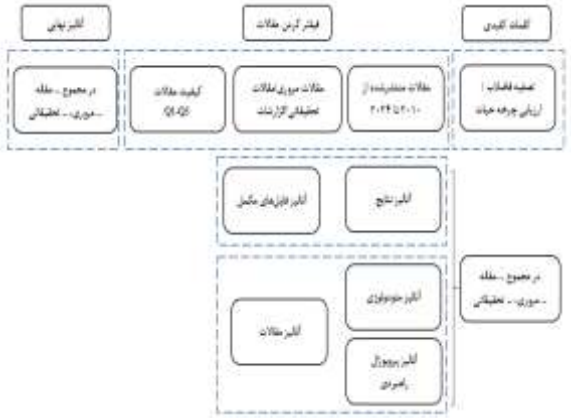
در این پژوهش، تنها مطالعات طبقه‌بندی شده با عنوان مقاله (تحقیقاتی و مروری)، فصل کتاب و گزارش انتخاب شدند. بررسی مقالات مروری منتخب نشان داد، تعدادی از آنها به ارزیابی کاربرد دانش چرخه حیات با روش‌های مختلف در انواع سیستم‌های تصفیه فاضلاب پرداختند. با این حال، هیچ مقاله‌ای هنوز به تدوین یک چارچوب جامع برای پیاده‌سازی ارزیابی چرخه حیات در تصفیه‌خانه فاضلاب شهری با تمرکز بر چالش‌ها و راهبردهای آن نپرداخته است. جستجوی نهایی سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۳ را در بر می‌گیرد. پس از جستجوی پایگاه داده‌ها، در مجموع ۶۵ مقاله مرتبط یافت شد. سپس ۲۰ مقاله به دلیل وجود موارد تکراری، عدم دسترسی کامل به متن و عدم تناسب کامل با موضوع تحقیق حذف شدند. تجزیه و تحلیل پس از بررسی اولیه مقالات مرتبط انجام شد. با توجه به معیارهای مدنظر در این پژوهش، مقالات بر اساس شاخص‌های زیر انتخاب شدند:

۱. این مطالعه بیشتر بر تصفیه‌خانه فاضلاب شهری متمرکز است.

۲. بررسی معیارهای ارزیابی چرخه حیات را فراهم می‌کند.

۳. ادغام دانش ارزیابی چرخه حیات در تصفیه‌خانه فاضلاب شهری را بررسی می‌کند.

مجموعه خاصی از کلمات کلیدی مرتبط در فرایند جستجو گنجانده شد: مجموعه ۱: ارزیابی چرخه حیات. مجموعه ۲: ارزیابی چرخه حیات، تصفیه فاضلاب، مدیریت تصفیه‌خانه فاضلاب، چارچوب، چالش و راهکار. عملگر AND بین کلمات کلیدی در مجموعه ۲ استفاده شد، در حالی که عملگر OR بین کلمات کلیدی درون مجموعه‌ها استفاده شد. مقالات بررسی شده در ۱۵ مجله مختلف منتشر شده است. اکثر مطالعات از سال ۲۰۱۰ به بعد انتخاب شدند، تا اطمینان حاصل شود که مطالعه با آخرین یافته‌های مربوط به این موضوع مرتبط است. برای مدل‌سازی چرخه حیات، متغیرهای کمی و کیفی فاضلاب و مصرف انرژی و ماده به عنوان ورودی در اکثر مطالعات مورد استفاده قرار گرفتند. متغیرهای ورودی مورد استفاده در مدل‌سازی چرخه حیات که در اینجا بررسی می‌شوند، در بخش‌های بعدی مورد بحث قرار می‌گیرند. بدیهی است، کشورهایی که با بحران آب و رشد تقاضا مواجه هستند، دانش کافی در این حوزه دارند، به اهمیت سرمایه‌گذاری در حوزه بازیافت منابع واقف هستند و ضرورت ارزیابی چرخه حیات را جدی می‌گیرند، تا از تأمین آب کافی با کیفیت مناسب اطمینان حاصل کنند.



شکل ۲. روش انتخاب و آنالیز مقالات در پژوهش حاضر

سوالات پژوهش

مطالعه مروری سیتماتیک حاضر با هدف پاسخگویی به سؤالات زیر انجام شد. یافتن جواب‌های منطقی برای سؤالات مطرح‌شده می‌تواند جهت‌گیری‌های مناسب را برای دستیابی به اهداف مطالعه حاضر یعنی شناسایی چالش‌ها و راهبردها و در نهایت تدوین چارچوب پیشنهادی برای ارزیابی مؤثر چرخه حیات در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب ترسیم کند. بنابراین، سؤالات اصلی مطالعه حاضر عبارتند از:

۱ .مهم‌ترین چالش‌های طراحی، پیاده‌سازی و نظارت بر ارزیابی چرخه حیات در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب کدامند؟

۲ .راهبردهای اصلی در طراحی، پیاده‌سازی و نظارت بر ارزیابی چرخه حیات در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب کدامند؟

۳ .یک چارچوب جامع برای تدوین دستورالعمل‌های کاربردی در فرایند ارزیابی چرخه حیات تصفیه‌خانه‌های فاضلاب متناسب با شرایط مکانی، زمانی، اجتماعی و اقتصادی چه مشخصه‌هایی دارد؟

نتایج و بحث

ارزیابی چرخه حیات تصفیه‌خانه‌های فاضلاب

طی ۵۰ سال گذشته، آگاهی جامعه جهانی در حفاظت از محیط‌زیست به ویژه در بحث منابع آب افزایش یافته است. در این رابطه، دستورالعمل شورای کمیسیون اروپا (۲۷۱/۱۹۹۱ EEC/در زمینه تصفیه فاضلاب شهری، هدف از تصفیه فاضلاب را حفاظت از محیط‌زیست در برابر اثرات نامطلوب تخلیه فاضلاب شهری و صنعتی عنوان کرد. آلاینده‌های موجود

در فاضلاب می‌توانند با انتشار گازهای گلخانه‌ای (GHGs) به هوا، دفع لجن حاصل از تصفیه فاضلاب به خاک و تخلیه پساب به منابع آبی، منتقل شده و اثرات منفی بر سلامت انسان و محیط پذیرنده وارد کنند [۹]. با توجه به پیچیدگی‌های موجود در فرایند تصفیه فاضلاب، ارزیابی تأثیرات محیط‌زیستی آنها مسأله‌ای چالش‌برانگیز است، و در نتیجه، یک رویکرد جامعی از گهواره تا گور برای تجزیه و تحلیل پیامدهای تصفیه‌خانه‌های فاضلاب بر محیط‌زیست نیاز است. برخی از اثرات محیط‌زیستی ناشی از بهره‌برداری تصفیه‌خانه‌های فاضلاب، شامل انتشار گازهای گلخانه‌ای، انتشار مواد مغذی به محیط آبی و انتشار فلزات سنگین، با اهداف توسعه پایدار سازمان ملل متحد برای مقابله با تغییرات اقلیمی، اتروفیکاسیون و اسیدی‌شدن محیط‌های آبی، در تضاد است [۱۰]. بنابراین، انجام ارزیابی چرخه حیات برای فناوری‌ها، محصولات یا فرآیندهای خاص جهت شناسایی اثرات محیط‌زیستی و استراتژی‌های کاهش احتمالی آن‌ها، بسیار مهم است. در حال حاضر، تأثیر یک سیستم تصفیه فاضلاب را می‌توان از طریق ابزارهای ارزیابی مختلف مانند روشLCA ، تحلیل‌های اقتصادی و اجتماعی ، ارزیابی اثرات زیست محیطی (EIA) و تجزیه و تحلیل سود خالص محیط‌زیستی (NEBA) ارزیابی کرد [۱۱-۱۳].

اقبال روزافزون به LCA به این دلیل است که این زمینه دانش چارچوب کاملی از ارزیابی را شامل هدف و دامنه، فهرست چرخه عمر، ارزیابی تأثیر چرخه عمر و تفسیر در بر می‌گیرد. در همین حال، تجزیه و تحلیل اقتصادی را می‌توان با استفاده از تجزیه و تحلیل هزینه و فایده(CBA) ، هزینه‌یابی چرخه عمر (LCC) و تجزیه و تحلیل فنی-اقتصادی (TEA) ارزیابی کرد [۱۴-۱۶]. معمولاً، ارزیابی‌های اقتصادی و اجتماعی را می‌توان با LCA ترکیب کرد تا یک ترکیب مؤثر برای تجزیه و تحلیل سیستمی در جهت عملکرد پایدار تصفیه‌خانه فاضلاب ایجاد کند.

LCA در تحقیقات مختلف برای تجزیه و تحلیل اثرات محیط‌زیستی تصفیه‌خانههای فاضلاب مختلف استفاده شده است، زیرا آنها تأثیرات قابل‌توجهی بر بدنه‌های آبی دریافت‌کننده داشته و هزینه‌های زیادی را بر آنها وارد می‌کنند [۱۷]. با این حال، دامنه ارزیابی به دلیل تنوع در تعریف مرزهای سیستم، ترکیب فاضلاب‌ها و نوع آلاینده‌های موجود، بسیار چالش برانگیز است. گزینه‌های مختلف فناوری تصفیه فاضلاب، عملکرد و تأثیرات متفاوتی بر محیط‌زیست دارند، که ممکن است در مراحل مختلف چرخه حیات تصفیه‌خانه‌ها اعمال شوند [۱۰].

مطالعات مختلفی ارزیابی چرخه حیات تصفیه‌خانه‌های فاضلاب را از جنبه‌های مختلفی بررسی کردند. بررسی‌های انجام‌گرفته نشان می‌دهد، از سال ۱۹۹۵ انتشار مقالات بین‌المللی جهت بررسی LCAتصفیه‌خانه‌های فاضلاب با تعیین فهرست موجودی، شرایط مرزی، واحد عملکردی و روش‌های ارزیابی تأثیر مختلف آغاز شد. روند مقالات تحقیقاتی نشان می‌دهد که LCA در دو دهه گذشته تا حد قابل توجهی تکامل یافته و شامل بهبود بیشتر و ارزیابی سیستماتیک می‌شود. بنابراین، در مطالعه حاضر بررسی گسترده‌ای از مطالعات LCA موجود در تصفیه خانه‌های فاضلاب، برای ارزیابی پیشرفت‌های اثرات زیست‌محیطی و مزایای LCA با هدف شناسایی چالش ها، راهکارها و ارائه چارچوب LCA در تصفیه خانه‌های فاضلاب انجام شد.

ارزیابی پایداری تصفیه‌خانه‌های فاضلاب با دانش چرخه حیات

جهان کنونی به سمت توسعه پایدار و اقتصاد دایره‌ای در حال حرکت است. در سال ۲۰۱۵، سازمان ملل ۱۷ هدف توسعه پایدار را تعیین کرد. یکی از این ۱۷ هدف بر آب و فاضلاب متمرکز است، که شامل حمایت از اجرای برنامه‌های مرتبط با آب و فاضلاب از جمله بهره‌وری آب، تصفیه فاضلاب، و فناوری‌های بازیافت و استفاده مجدد است [۱۰]. برخی از کشورهای در حال توسعه مانند چین برنامه‌ریزی‌هایی را برای بازیافت مواد، کربن و انرژی از تصفیه‌خانه‌های فاضلاب اجرا کردند، که می‌تواند در ایجاد اقتصاد دایره‌ای در حوزه آب و فاضلاب مؤثر بوده و حلقه‌های منابع را برای دستیابی به توسعه پایدار ببندد. بنابراین، مطالعات بیشتر جهت تصفیه فاضلاب پایدار در تصفیه‌خانه‌ها به کمکLCA ، به ویژه در کشورهای در حال توسعه، و در راستای دستیابی به اقتصاد دایره‌ای در صنعت فاضلاب بسیار مهم است [۱۸،۱۹].

بررسی‌های صورت‌گرفته در این مطالعه به وضوح نشان می‌دهد که فناوری‌های مختلفی برای بازیافت انرژی و مواد، بهبود کیفیت پساب و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، توسعه یافته است. نتایج مطالعات در حوزه بازیافت ماده و انرژی در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب نشان می‌دهد، استفاده ترکیبی از فناوری‌های موجود می‌تواند منجر به تصفیه فاضلاب با مصرف انرژی خنثی و کسب مزایای قابل توجه محیط‌زیستی شود [۲۰]. با این حال، چگونگی عملیات‌سازی ایده‌های مطرح‌شده، هنوز نیاز به ارزیابی سیستماتیک جنبه‌های محیط‌زیستی، اقتصادی و اجتماعی، با در نظر گرفتن عوامل تأثیرگذار محلی دارد. از آنجایی که فناوری‌های پیشرفته‌تری برای ارتقای تصفیه‌خانه‌های فاضلاب جهت بازیابی منابع (مانند آب، انرژی و مواد مغذی) نیاز است و به دلیل تدوین استانداردهای تخلیه سخت‌گیرانه‌تر، تجزیه و تحلیل اثرات زیست‌محیطی از جنبه‌های مختلف برای دستیابی به تصفیه فاضلاب پایدار ضروری است [۲۱]. این وضعیت نشان می‌دهد که

انتخاب یک ابزار ارزیابی جامع و کارآمد برای دستیابی به نتایج قانع‌کننده‌تر در تصفیه پایدار فاضلاب مهم است.

در اصل، تصفیه فاضلاب پایدار باید بتواند فاضلاب را در یک چشم‌انداز بلندمدت، در عین حفاظت از سلامت انسان و محیط‌زیست با حداقل استفاده از منابع، تصفیه کند. علاوه بر این، باید محصولات بازیابی مفیدی نیز تولید کند و از نظر اجتماعی، فنی و اقتصادی پایدار باشد. دلیل این امر این است که فاضلاب که قبلاً یک منبع آلایندگی دیده می‌شد، اکنون می‌تواند به منابع ارزشمند بازیافتی تبدیل شود. استفاده مجدد از آب، حذف و بازیابی مواد مغذی، و خودکفایی انرژی از جمله بخش‌های اصلی عملیات تصفیه فاضلاب هستند که با اهداف پایداری مطابقت دارند. همچنین، سایر عوامل محیطی مانند اتروفیکاسیون، انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلودگی ناشی از لجن باقیمانده باید به طور همزمان برای ارزیابی پایداری تصفیه فاضلاب در نظر گرفته شوند [۲۳-۲۲].

در مطالعه‌ای که کوتس و همکاران [۲۴]. انجام دادند، LCAبرای ارزیابی تأثیر تصفیه‌خانه‌های فاضلاب با درنظر گرفتن ارتقاء فناوری حذف فسفر به کار گرفته شد. بر اساس تجزیه و تحلیل مقایسه‌ای چرخه حیات برای دو سناریو حذف فسفر، حذف بیولوژیکی فسفر به عنوان بهترین روش تنها در صورت لزوم باید با فرآیند شیمیایی ادغام شود. در مطالعه‌ای دیگر، هائو و همکاران [۴]. که LCA فناوری بازیابی منابع (استفاده مجدد از آب، برق، حرارت و فسفر) را در چین مطالعه کردند، دریافتند که بازیافت انرژی حرارتی از سوزاندن لجن به طور قابل توجهی به ۴۰ درصد کل امتیاز بازیافت منابع کمک می‌کند. همچنین، بازیابی فسفر تنها ۶ درصد از کل فرآیند بازیابی منابع را شامل می‌شود. این بررسی نیاز به ترکیب حذف مواد مغذی و بازیابی منابع با استفاده از داده‌های محلی برای شناسایی بیشتر تأثیر و مزایای آنها برای محیط‌زیست و در عین حال بهبود روش LCA را نشان می‌دهد.

چالش‌های ارزیابی چرخه حیات در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب

علی‌رغم پیشرفت‌های کنونی در رویکرد تحلیلLCA ، هنوز بسیاری از چالش‌ها در این حوزه بررسی نشدند. جهت دستیابی سریع‌تر به اهداف این حوزه خصوصاً در کشورهای در حال توسعه، باید چارچوب LCA کشورهای توسعه‌یافته مطابق با دستور کار سال ۲۰۳۰ برای توسعه پایدار دنبال شود [۲۶]. برخی از چالش‌های اصلی که کشورهای در حال توسعه با آن مواجه هستند، عبارتند از توزیع جغرافیایی و زمانی، مطالعات ضعیف، فقدان اطلاعات کافی، کمیت و کیفیت پساب و لجن تولیدشده، عدم درک عمیق از پیشرفت روش‌های تصفیه، و تولید و انتشار آلاینده‌های نوظهور [۸].

بر اساس بررسی‌های صورت‌گرفته در مطالعه حاضر، LCAبه عنوان یک روش مؤثر و کارآمد برای اثرات محیط‌زیستی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب استفاده شده است. با این حال، LCA اعمال شده برای تصفیه خانه‌ها در مقایسه با سایر فرآیندهای تولید، به ویژه در کشورهای در حال توسعه، نسبتاً در آغاز راه قرار دارد. اینکه چگونه تصفیه‌خانه‌ها می‌توانند LCA را برای دستیابی به نتایج قابل اعتماد پیاده‌سازی کنند، هنوز به تحقیقات بیشتری نیاز دارد. همچنین، نحوه اجرای LCA در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب کشورهای در حال توسعه برای ارائه راهنمایی مناسب به سیاست‌گذاران و سرمایه‌گذاران همچنان چالش برانگیز است.

بنابراین، ارتقاء تصفیه‌خانه‌های موجود با تمرکز بر حذف مواد مغذی و بازیابی منابع بسیار مهم است. به عنوان مثال، بازیابی انرژی و فسفر می‌تواند اثرات محیط‌زیستی دیگر و هزینه اقتصادی مصرف مواد شیمیایی و برق را در همان طرح تصفیه کاهش دهد. این مبادله بین انواع اثرات باید برای استراتژی‌های اجرایی آینده به سمت تصفیه‌خانه‌های کارآمدتر و پایدار شناسایی شود. دلیل این امر این است که برای دستیابی به پایداری واقعی، ارزیابی از دیدگاه یکپارچه موردنیاز است، که در آن اثرات محیط‌زیستی تصفیه‌خانه‌ها نباید از مزایای آنها فراتر رود [۲۷]. بنابراین، طراحی جامع برای ارتقا، و روشی برای ارزیابی اثرات محیط‌زیستی و اقتصادی برای ارائه اطلاعات مفید به سیاست‌گذاران و دست‌اندرکاران جهت اصلاح یا ارتقای تصفیه‌خانه‌ها نیاز است. از سوی دیگر، عدم وزن‌دهی اثرات محیط‌زیستی برای مراحل مختلف عملیات منجر به مشکلاتی در شناسایی جنبه‌های مهم‌تر می‌شود [۲۸]. بنابراین، بررسی تأثیرات محیط‌زیستی از دیدگاه جامع برای شناسایی همزمان نقاط ضعف و قوت ضروری است، تا اطلاعات مفیدی برای ارتقای تصفیه‌خانه‌های فاضلاب از دیدگاه اثرات فنی، محیط‌زیستی و اقتصادی ارائه شود.

توزیع جغرافیایی مطالعات ارزیابی چرخه حیات تصفیه‌خانه‌های فاضلاب

قبل از دهه ۲۰۰۰، رویکرد غالب LCA مبتنی بر ارزیابی مکان مستقل از عوامل جغرافیایی و زمانی بود [۱۰]. بررسی‌ها نشان داد که برخی از مطالعات، از داده‌های ثانویه یا داده‌های شبیه‌سازی شده برای انجام تجزیه و تحلیل LCA به دلیل فقدان داده‌های اولیه استفاده می‌کنند که منجر به نتایج با قابلیت اعتماد کمتر یا عدم‌قطعیت بالاتر، اما تا حدودی معتبر می‌شود. همچنین، حدود ۵۵ درصد مطالعات در این حوزه بر اساس

داده‌های حاصل از بهره‌برداری در سایت بوده، در حالی که باقی مطالعات بر اساس تخمین‌ها، داده‌های شبیه‌سازی موجود، گزارش‌های قبلی و سوابق مطالعاتی به دلیل در دسترس بودن محدود پایگاه‌های داده قابل اعتماد انجام شدند. دلیل دیگر استفاده از منابع داده ثانویه این است که اندازه‌گیری‌ها در محل که به وضوح می‌تواند عدم‌قطعیت داده‌ها را کاهش دهد، اغلب امکان‌پذیر نیست، چراکه فراهم‌آوری داده‌ها اغلب فرآیندی هزینه‌بر و زمان‌بر است.

تجزیه و تحلیل توزیع جغرافیایی در LCA نشان داد که تنها مطالعات کمی در کشورهای در حال توسعه مانند هند، مصر، تایلند و مالزی انجام شده است. در نتیجه، توزیع مطالعات با توجه به سیستم‌های مدیریت فاضلاب ارزیابی‌شده توسط LCA تنها مختص چند منطقه مطالعه شده است و ممکن است قابلیت تعمیم به مناطق دیگر با شرایط جغرافیایی متفاوت را نداشته باشد. اشکال این سیستم تجزیه و تحلیل این است که کشور دیگری در منطقه‌ای متفاوت با دما یا ارزش اقتصادی متفاوت، نمی‌تواند به طور معنی‌داری به نتایج تأثیر موجود اشاره کند. این وضعیت نشان می‌دهد که پایگاه‌های اطلاعاتی مناسبی برای مطالعات تحلیل LCA در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه، وجود ندارد. رنو و همکاران [۲۹]. گزارش کردند که عوامل خاص مکانی برای دسته‌بندی‌های تأثیر مختلف به دلیل اثر جابجایی آلاینده‌ها، متغیری حیاتی هستند. بنابراین، انتخاب داده مناسب برای تجزیه و تحلیل LCA به ویژه زمانی که عوامل محلی مانند تغییر فصل، در تجزیه و تحلیل برای ارائه نتایج قابل اعتماد در نظر گرفته شوند، بسیار ضروری است.

برای غلبه بر این محدودیت‌ها، پس از سال ۲۰۰۰ روندی به سمت وابسته کردن LCA به مکان، با در نظر گرفتن فاکتورهای مشخصه‌یابی خاص مکان مانند اتروفیکاسیون، تأثیر سمیت و پتانسیل اسیدی‌شدن ایجاد شد، که دلیل آن این است که انتشارات ممکن است تأثیر قوی بر این دسته‌های تأثیر منطقه‌ای و محلی داشته باشند. برای عوامل دیگری مانند گرمایش کره زمین و تخریب لایه اوزون، فاکتورهای مشخصه توجیه‌پذیر هستند، زیرا مکان انتشار، هیچ تأثیری بر اثر جابجایی آلاینده ندارد [۳۰]. بنابراین، شناسایی عوامل مشخصه که بر کشورهای مختلف با عوامل جغرافیایی، اقلیمی و اقتصادی متفاوت تأثیر می‌گذارند، به میزان قابل‌توجهی مهم است. تحلیل این موضوع این ابهام را ایجاد می‌کند که چگونه اهمیت معیارهای منطقه‌بندی و پایگاه داده بر نتایج LCA تأثیر می‌گذارد.

یوشیدا و همکاران [۳۱]. اثرات سه پایگاه داده مختلف شامل دیتابیس انتشار و انتقال آلودگی اروپا(EPRTR) ، داده‌های حد مجاز تخلیه دانمارک و داده‌های جمع‌آوری‌شده از تصفیه‌خانه فاضلاب در دانمارک را بر نتایج LCA مطالعه کردند. نتایج مطالعه نشان داد که نتایج LCA به شدت به ورودی داده در محل بستگی دارد، و داده‌های جمع‌آوری شده در تصفیه‌خانه قابل‌اعتمادترین نتایج LCA را ارائه می‌دهد. با این وجود، همچنان به بهبودهایی مانند گسترش پوشش مواد و جمع‌آوری جزئیات بیشتر از انرژی و مصرف مواد شیمیایی نیاز است. تحلیل‌های صورت‌گرفته در این بخش، به خوبی نشان می‌دهد که داده‌های برداشت‌شده از محل یا داده‌های اولیه، کلید دستیابی به نتایج LCA قابل اعتماد است.

بررسی‌های صورت گرفته در این مطالعه نشان می‌دهد که تحقیقات متمرکز بر شرایط جغرافیایی و اثرات نوع داده (اولیه و ثانویه) بر نتایج LCA به ندرت در مطالعات مربوط به ارزیابی چرخه حیات در تصفیه‌خانه‌ها انجام گرفته است. یکی از این عوامل دسترسی یک پایگاه داده عمومی است که نیاز به استفاده از داده‌های اولیه محلی را کاهش می‌دهد. همچنین، مطالعات بسیار کمی با استفاده از LCA در کشورهای در حال توسعه انجام شده است. فقدان داده‌های اولیه و عدم ارائه مفاهیم تفکر چرخه حیات در کشورهای در حال توسعه احتمالاً دلایل اصلی تعداد محدود مطالعات در این کشورها است.

انجام LCA در بخش فاضلاب، نیازمند داده‌های انرژی و مواد، انتشار آلاینده‌ها و معیارهای طراحی شامل نوع سیستم تصفیه فاضلاب است که بایستی در فهرست چرخه حیات گنجانده و سپس تحلیل شوند. علاوه بر این، تأثیر فناوری تصفیه تا حد زیادی به عوامل محلی مانند موقعیت جغرافیایی، ویژگی فاضلاب، نوع و منبع انرژی، انتخاب گزینه‌های دفع لجن و پسماند، و پذیرش بازار محصولات حاصل از سیستم تصفیه مانند کود و منابع بازیافتی بستگی دارد [۳۲،۳۳]. بررسی‌ها در این مطالعه نشان می‌دهد که برخورداری از ورودی‌های مبتنی بر پایگاه داده اولیه و ثانویه با توجه به ویژگی‌های محلی از قبیل شرایط آب و هوایی مهم است. به عبارت دیگر، پایگاه داده بومی‌سازی شده می‌تواند موجودی داده‌ها را به عنوان یک معیار حفظ کرده و در واقع، منطقه‌بندی به عنوان یک گام مهم در جهت بهبود دقت، افزایش اطمینان و کاهش عدم‌قطعیت در نتایج LCA شناخته می‌شود.

چالش‌ها و راهبردهای بکارگیری LCA در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب

هدف از این مطالعه شناسایی چالش‌ها و راهبردهای بکارگیری LCA در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب و ارائه چارچوب کاربردی در این راستا بود. جدول ۱ چالش‌های اصلی، شکاف‌های تحقیقاتی و

خطوط بالقوه تحقیقات آینده در این حوزه را معرفی می‌کند. به منظور بیان اهمیت انجام این ارزیابی در ابعاد مختلف، درجه تأثیر چالش‌های شناسایی‌شده در رده‌های پایین، متوسط و بالا در این جدول طبقه‌بندی شد.

جدول ۱. چالش‌های اصلی، شکاف‌های تحقیقاتی و خطوط بالقوه تحقیقات آینده

چالش / شکاف	توضیحات	راهبردها و تحقیقات آینده	درجه تأثیر
توزیع جغرافیایی و زمانی			
جغرافیایی	تنوع کمتر مطالعات مؤثر در کشورهای در حال توسعه	تشویق مطالعات در کشورهای کمتر توسعه‌یافته، خصوصاً در حوزه تدوین چارچوب و استاندارد	زیاد
زمانی	افزایش تصاعدی LCA های مرتبط با تصفیه‌خانه‌های فاضلاب در پنج سال گذشته. انتظار می رود در سال های آینده نیز ادامه یابد.	توسعه دستورالعمل‌ها، چارچوب و استاندارد	زیاد
پارامترهای فنی			
پارامترهای کلیدی	مطالعات بررسی‌شده، کمبود اطلاعات دقیق در مورد پساب و لجن تولیدشده را نشان می‌دهد.	LCA های مربوط به تصفیه‌خانه‌های فاضلاب باید جریان ورودی، زمان ماند لجن، زمان ماند هیدرولیکی، اکسیژن بیولوژیکی ورودی و پساب، نیاز اکسیژن شیمیایی، فسفر کل و نیتروژن کل را بیان کنند.	متوسط
تکنولوژی‌ها	فقدان مطالعات متمرکز بر تصفیه پیشرفته و حذف آلاینده‌های نوظهور از فاضلاب	مطالعات بر روی تصفیه پیشرفته (مانند فرآیند اکسیداسیون پیشرفته) و آلاینده های نوظهور (مانند محصولات دارویی و مراقبت شخصی) باید توسعه یابند.	زیاد
هدف و محدوده			
تعیین تابع عملکردی	عمدتاً از حجم و تعاریف مختلف معادل شخص استفاده شود	وضوح بیشتر در تعریف تابع عملکردی و تجزیه و تحلیل نتایج با استفاده از بیش از یک تابع عملکردی	زیاد
مرحله ساخت	مرحله ساخت و ساز در اکثر مطالعات گنجانده نشده است.	گنجاندن مرحله ساخت و ساز باید برای تصفیه‌خانه‌های فاضلاب اجباری باشد.	زیاد
دفع/بازیافت لجن	مزیت اجتناب از کودهای شیمیایی یا اثر محتوای فلزات سنگین در نظر گرفته نمی شود.	این جنبه‌ها باید در محدوده‌های سیستم گنجانده شوند و در صورت عدم امکان، تأثیر آن در نتیجه‌گیری مطالعه بررسی شود.	متوسط
فهرست چرخه حیات			
مجموعه داده‌های ناقص	موجودی‌ها نشان داده نمی‌شوند، کمبود جزئیات وجود دارد، ترکیب داده‌های اندازه‌گیری‌شده یا نبودن منابع داده‌های پس‌زمینه. همه این حقایق باعث کاهش تکرارپذیری مطالعات شده است.	یک جدول موجودی چرخه عمر باید گنجانده شود و داده ها و منابع اولیه و پس زمینه را با جزئیات شرح دهد.	کم
نبود داده‌های مختص سایت	استفاده از پایگاه‌های اطلاعاتی عمدتاً آماده. عدم استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده مختص همان مطالعه. عدم تطبیق داده‌های موجود با شرایط کشورهای در حال توسعه.	افزایش تعداد پایگاه‌های اطلاعاتی خاص ملی یا منطقه‌ای. افزایش دسترسی باز یا کم‌هزینه برای پایگاه‌های داده و مطالعات فعلی	زیاد

جدول ۱. چالش‌های اصلی، شکاف‌های تحقیقاتی و خطوط بالقوه تحقیقات آینده

چالش / شکاف	توضیحات	راهبردها و تحقیقات آینده	درجه تأثیر
		اندازه‌گیری مستقیم و جمع‌آوری داده‌های مختص همان مطالعه	
ادامه جدول ۱- چالش‌های اصلی، شکاف‌های تحقیقاتی و خطوط بالقوه تحقیقات آینده			
عدم محاسبه انتشارات	نامشخص بودن میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای N_2O ،CH_4 ،CO_2	گنجاندن یک تعریف واضح از نحوه محاسبه داده‌های مصرف مواد، انرژی و انتشارات توسعه اندازه‌گیری‌های درجا یا، در صورت عدم امکان، استفاده از عوامل انتشار عمومی با تجزیه و تحلیل عدم قطعیت	زیاد
ارزیابی تأثیر			
تعداد کم تأثیرات	گرمایش کره زمین و اوتروفیکاسیون معمولاً محاسبه می‌شوند، اما تأثیرات دیگر مانند سمیت زمین (استفاده کشاورزی از لجن)، استفاده از زمین (تصفیه گسترده) یا استفاده از آب دیده نمی‌شود.	محاسبه گرمایش جهانی و اوتروفیکاسیون باید اجباری باشد و محاسبه سایر اثرات مانند سمیت های زیست محیطی، کاربری زمین یا استفاده از آب به شدت توصیه می‌شود.	کم
فاکتورهای مشخصه‌سازی نامربوط به سایت	اثرات مختص منطقه‌ای بسیار کمی برای کشورهای در حال توسعه موجود است و عموماً از داده‌های کشورهای در حال توسعه استفاده می‌شود.	در حال انجام مطالعات مختص منطقه‌ای برای انتشارات مختلف باید ادامه یابد و ادغام مؤثر در نرم‌افزارهای LCA باید انجام شود.	متوسط
فقدان مقادیر نرمال‌سازی و وزن‌دهی	مطالعات مجبور به استفاده از مقادیر نرمال‌سازی و وزن‌دهی هستند.	تشویق به محاسبه عادی‌سازی و وزن‌دهی ویژه ملی یا منطقه‌ای متناسب با تحولات	متوسط
تفسیر			
فقدان آنالیز عدم‌قطعیت	کمتر از یک‌چهارم مطالعات شامل هر نوع تحلیل عدم‌قطعیت است.	پارامترهای کلیدی مانند انتشار مستقیم گازهای گلخانه‌ای (با سطح عدم‌قطعیت بالا) و ترکیب انرژی باید با تجزیه و تحلیل عدم‌قطعیت (به عنوان مثال حساسیت و تجزیه و تحلیل مونت کارلو یا ماتریس شجره نامه) آنالیز شوند.	متوسط

پروپوزال راهبردی

شکل۳ چارچوب کلی پروپوزال تهیه شده را نشان می‌دهد که از مهم ترین کاستی‌ها و اقدامات خوب شناسایی شده استخراج شده است. هدف تدوین این چارچوب کمک به توسعه کاربرد LCA در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب و آغاز مسیری برای تهیه یک استاندارد یا پروتکل نهایی است.

شکل ۳. چارچوب کلی پروپوزال تهیه شده جهت کمک به توسعه کاربرد LCA در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب

همچنین، چک‌لیستی برای بهبود شفافیت در کارهای آینده در رابطه با ارزیابی چرخه حیات تصفیه‌خانه‌های فاضلاب ارائه شده است (جدول ۲). محققین می‌توانند این چک‌لیست را با محدوده و هدف تحقیقی که قصد انتشار آن را دارند، تطبیق دهند

جدول ۲ . چک لیست بهبود شفافیت در مطالعات آینده در رابطه با ارزیابی چرخه حیات تصفیه‌خانه‌های فاضلاب

اطلاعات	وضعیت
آیا مطالعه هدف را به وضوح نشان می‌دهد؟	
آیا مطالعه واحد عملکردی مورد استفاده را به وضوح بیان می‌کند؟	
آیا توصیف حداقلی از سیستم ارائه شده تا مشخص شود چگونه کار می‌کند، کارایی و ویژگی‌های جریان اصلی آن کدامند؟	
آیا مطالعه مشخص می‌کند که چه مراحلی از چرخه حیات (عملیاتی، ساخت و ساز، نگهداری و تخریب) ارزیابی می‌شود؟	
آیا مطالعه مشخص می‌کند که تصفیه لجن گنجانده شده است؟	
آیا مطالعه تمام نرم افزارهای مورد استفاده به عنوان رابط محاسبات را به وضوح نشان می‌دهد؟	
آیا مطالعه نوع ارزیابی چرخه حیات انجام‌شده (اسنادی یا پیامدی) را مشخص می‌کند؟	
آیا مطالعه نوع تخصیص یا روش مورد استفاده برای اجتناب از تخصیص را توضیح می‌دهد؟	
آیا مطالعه پایگاه داده و نسخه را نشان می‌دهد؟	
آیا مطالعه اولویت داده‌ها و کیفیت داده‌ها را نشان می‌دهد؟	
آیا مطالعه نشان می‌دهد کدام فرآیندها برای انطباق از پایگاه داده انتخاب شده و چگونه آنها را با واقعیت خود تطبیق داده؟	
آیا نوع ارزیابی چرخه حیات و نوع پایگاه داده (Consequential/Attributional) و نیز دلیل این انتخاب به وضوح بیان شده است؟	
آیا مطالعه داده‌های مورد استفاده و نحوه محاسبات برای کسب داده‌های مذکور را نشان می‌دهد؟	
آیا مطالعه روش ارزیابی تأثیر چرخه مطالعه استفاده شده و هر گونه تغییری را که در توصیف انجام شده است نشان می‌دهد؟	

شکاف تحقیقاتی و فرصت‌های مطالعاتی

این مطالعه فرصت‌های زیادی را مانند بهینه‌سازی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب و کاربرد روش‌شناسی در سیستم‌های بازیابی منابع برای اجرای LCA در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شناسایی کرد . همچنین می‌تواند با روش‌های دیگری مانند ارزیابی هزینه چرخه حیات و ارزیابی چرخه حیات اجتماعی برای توسعه ارزیابی‌های پایداری ترکیب شود. علاوه بر این، بررسی‌ها نشان می‌دهد، چارچوبی برای تقویت LCA در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب جهت توسعه بیشتر تجزیه و تحلیل محیط‌زیستی در سراسر جهان باید تدوین شود. یکی از گرایش‌های مطالعاتی شناسایی‌شده برای LCAدر تصفیه‌خانه‌های فاضلاب، استفاده از روش تحلیل پوششی داده‌ها (DEA) است که می‌توان آن را به دو گروه انرژی و محیطی تقسیم کرد. بررسی‌های صورت‌گرفته نشان می‌دهد، بسیاری از مطالعات منتخب ترکیبی از این روش‌ها را ارائه کردند. نکته مهم دیگر این است که محققین در حال حاضر روش‌های مختلف LCA را برای بهبود کیفیت نتایج یافت‌شده با هم ترکیب می‌کنند. بررسی‌ها نشان می‌دهد، مطالعاتی که داده‌های با حجم زیاد و ارزیابی چرخه حیات را در هم می‌آمیزند، می‌تواند یک جنبه مهم آینده برای این نوع تحلیل باشد.

با توجه به تأثیر قابل توجه ارتقاء فناوری بر محیط‌زیست و اقتصاد، مطالعات اندکی تأثیر ارتقاء تصفیه‌خانه‌ها را در مقایسه با تصفیه موجود ارزیابی کردند. با این وجود، تحقیقات در زمینه ارتقاء تصفیه فاضلاب با استفاده از LCA از نظر یکپارچه‌سازی فناوری و روش ارزیابی متفاوت و متناقض است و اکثر مطالعات موجود ارزیابی اقتصادی را بررسی نکردند. با این وجود، عمق این مطالعات به دلیل مرزهای سیستم‌های مختلف و نوع فناوری‌های بررسی‌شده و دسته‌های تأثیر مختلف، متفاوت است. در این مطالعات، تأثیر بازیابی مواد مغذی به ندرت در نظر گرفته شده، و تنها چند مطالعه از LCA بر بازیابی انرژی متمرکز شدند. با توجه به شکاف‌های تحقیقاتی موجود در زمینه ارزیابی چرخه حیات تصفیه‌خانه‌های فاضلاب، مطالعات بعدی بایستی بر آن متمرکز باشند، و به دلیل عدم سازگاری روش‌شناسی و شفافیت در روش‌های فعلی، تأکید اولیه بر نیاز به یک چارچوب قوی، شفاف و استاندارد برای ارزیابی فناوری پایدار است.

نتیجه‌گیری

ابزار LCA برای ارزیابی اثرات محیط‌زیستی و تأثیرات عملکرد تصفیه‌خانه‌های فاضلاب بسیار مفید است. مطالعات بررسی‌شده در این پژوهش نشان می‌دهد که LCA می‌تواند اثرات محیط‌زیستی فرآیند را با انتخاب یک الگوی تولید، پردازش و توزیع جایگزین، به شیوه‌ای پیچیده کاهش داده و ایمنی فرآیند و امنیت محیطی را همراه با سایر مزایای اضافه‌شده، مانند تصفیه بهینه، هزینه مقرون به صرفه، کاهش آلودگی و قابلیت استفاده مجدد از آب فراهم کند. بررسی دقیق و اجرای چالش‌های فوق، قابلیت اطمینان و دقت را تا حد زیادی افزایش می‌دهد. اگرچه پیشرفت‌های زیادی در روش‌های LCA انجام شده است، اما استانداردسازی آن در مقیاس محلی بسیار ضروری است. چنین توسعه استراتژیکی به عنوان یک مرجع پایه، صرف‌نظر از مسائل توزیع جغرافیایی و زمانی عمل می‌کند. این امر همچنین امکان ارزیابی مقایسه‌ای مستقیم گزینه‌های مختلف را فراهم می‌کند و کاربردهای عملی LCAs در فناوری تصفیه فاضلاب را گسترش می‌دهد.

در این بررسی سیستماتیک، تمرکز بیشتر بر کاستی‌های شناسایی شده است که می‌تواند شفافیت را افزایش دهد. بسیاری از جنبه‌های روش‌شناختی هنوز مبهم هستند و قابلیت مقایسه در آثار وجود ندارد. مهم‌ترین چالش شناسایی‌شده، کیفیت و در دسترس بودن داده‌ها بود که منجر به عدم‌قطعیت و استفاده از پایگاه‌هایی می‌شود که ممکن است داده‌های منطقه‌ای را به خوبی نشان ندهند. علاوه بر این، کیفیت داده‌های مورد استفاده در مطالعات باید با جدول زمانی آن مرتبط باشد و آنالیزها باید بر اساس روش‌شناسی دقیق انجام شوند. تعریف نحوه تخصیص منابع و نحوه محاسبه اثرات اجتناب‌شده در سیستم نیز یک مشکل رایج است. علاوه بر این، ایجاد و اتخاذ روش‌های LCIA که می‌تواند اثرات زیست‌محیطی را به صورت محلی نشان دهد، می‌تواند برای مطالعات آینده مفید باشد.

فیلترهای مورد استفاده برای بهبود کیفیت مواد انتخاب‌شده جهت تجزیه و تحلیل سیستم‌های تصفیه فاضلاب شهری منحصراً از محدودیت‌های اصلی این مطالعه نشأت می‌گیرد. نتایج نشان‌دهنده نیاز به ایجاد یک چارچوب خاص برای LCA تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری جهت تضمین مقایسه بین مطالعات و افزایش شفافیت است. این کار نقطه شروعی برای محققین در این زمینه است و با اتخاذ آن، تحقیقات آینده می‌تواند مختصرتر، شفاف‌تر و بر مهم‌ترین شکاف‌های موجود در مطالعات متمرکز شود.

این تحقیق مهم‌ترین مقالات را در ادبیات بررسی کرده و چندین نکته را برای کمک به توسعه و مدیریت تصفیه فاضلاب از طریق فرایند LCA ارائه کرده است، که از جمله آنها می‌توان به تشویق مطالعات در کشورهای در حال توسعه، تدوین دستورالعمل‌ها و چارچوب استاندارد، تعریف بهتر اهداف، محدوده، تابع عملکردی، فهرست چرخه حیات، استفاده مناسب از پایگاه‌های اطلاعاتی

چرخه حیات ملی و منطقه‌ای، گنجاندن مرحله ساخت، تفسیر اثرات تغییر کاربری زمین و انتشار مستقیم گازهای گلخانه‌ای، اشاره کرد.

References

1. Nizam, N.U.M.; Hanafiah, M.M.; Mahmoudi, E.; Halim, A.A.; Mohammad, A.W. The removal of anionic and cationic dyes from an aqueous solution using biomass-based activated carbon. Sci. Rep. 2021, 11, 8623.
2. Harun, S.N.; Hanafiah, M.M.; Noor, N.M. Rice Straw Utilisation for Bioenergy Production: A Brief Overview. Energies 2022, 15, 5542.
3. Dahiya, S.; Katakojwala, R.; Ramakrishna, S.; Venkata Mohan, S. Biobased products and life cycle assess-ment in the context of circular economy and sustainability. Mat. Circ. Econ. 2020, 2, 7.
4. Hanafiah, M.M.; Leuven, R.S.E.W.; Sommerwerk, N.; Tockner, K.; Huijbregts, M.A.J. Including the introduction of exotic species in life cycle impact assessment: The case of inland shipping. Environ. Sci. Technol. 2013, 47, 13934–13940.
5. Campos-Guzmán, V.; García-Cáscales, M.S.; Espinosa, N.; Urbina, A. Life Cycle Analysis with Multi-Criteria Decision Making: A review of approaches for the sustainability evaluation of renewable energy technologies. Renew. Sustain. Energy Rev. 2019, 104, 343–366.
6. Roy P, Nei D, Orikasa T, Xu Q, Okadome H, Nakamura N, Shiina T: A review of life cycle assessment (LCA) on some food products. J Food Eng 2009, 90:1–10.
7. ISO: International Organization for Standardization, 2006. ISO 14040:2006(E) environmental management – life cycle assessment – principles and framework. 2006.
8. Roberto Parra-Saldivar, Muhammad Bilal, Hafiz M.N. Iqbal, Life cycle assessment in wastewater treatment technology, Current Opinion in Environmental Science & Health, Volume 13, 2020, Pages 80-84, ISSN 2468-5844.
9. Campos, J.L.; Valenzuela-Heredia, D.; Pedrouso, A.; Del Río, A.V.; Belmonte, M.; Mosquera-Corral, A. Greenhouse Gases Emissions from Wastewater Treatment Plants: Minimization, Treatment, and Prevention. J. Chem. 2016, 2016, 3796352.
10. Rashid, Siti & Harun, Siti Norliyana & Hanafiah, Mm & Razman, Khalisah Khairina & Liu, Yongqiang & Tholibon, Duratul. (2023). Life Cycle Assessment and Its Application in Wastewater Treatment: A Brief Overview. Processes. 11. 10.3390/pr11010208.
11. Piao, W.; Kim, Y.; Kim, H.; Kim, M.; Kim, C. Life cycle assessment and economic efficiency analysis of integrated management of wastewater treatment plants. J. Clean. Prod. 2016, 113, 325–337.
12. Awasthi, M.K.; Sarsaiya, S.; Wainaina, S.; Rajendran, K.; Awasthi, S.K.; Liu, T.; Duan, Y.; Jain, A.; Sindhu, R.; Binod, P.; et al. Techno-economics and life-cycle assessment of biological and thermochemical treatment of bio-waste. Renew. Sustain. Energy Rev. 2021, 144, 110837.
13. Meneses, M.; Concepción, H.; Vrecko, D.; Vilanova, R. Life Cycle Assessment as an environmental evaluation tool for control strategies in wastewater treatment plants. J. Clean. Prod. 2015, 107, 653–661.
14. Escobar, N.; Laibach, N. Sustainability check for bio-based technologies: A review of process-based and life cycle approaches. Renew. Sustain. Energy Rev. 2020, 135, 110213.
15. Aziz, N.I.H.A.; Hanafiah, M.M. Application of life cycle assessment for desalination: Progress, challenges and future directions. Environ. Pollut. 2020, 268, 115948.
16. Rashid, S.S.; Liu, Y.Q.; Mokhtar, H.; Zainudin, M.R.; Muda, M.F. The review of toxicity emission from municipal wastewater treatment by life cycle assessment. Gading J. Sci. Technol. 2020, 5, 10–18.
17. Teodosiu, C.; Barjoveanu, G.; Sluser, B.R.; Popa, S.A.E.; Trofin, O. Environmental assessment of municipal wastewater discharges: A comparative study of evaluation methods. Int. J. Life Cycle Assess. 2016, 21, 395–411.
18. Shanmugam, K.; Gadhamshetty, V.; Tysklind, M.; Bhattacharyya, D.; Upadhyayula, V.K. A sustainable performance assessment framework for circular management of municipal wastewater treatment plants. J. Clean. Prod. 2022, 339, 130657.
19. Dahiya, S.; Katakojwala, R.; Ramakrishna, S.; Venkata Mohan, S. Biobased products and life cycle assess-ment in the context of circular economy and sustainability. Mat. Circ. Econ. 2020, 2, 7.
20. Singh, A., Kamble, S.J., Sawant, M., Chakravarthy, Y., Kazmi, A., Aymerich, E., Starkl, M., Ghangrekar, M., Philip, L., 2018. Technical, hygiene, economic, and life cycle assessment of full-scale moving bed biofilm reactors for wastewater treatment in India. Environ. Sci. Pollut. Res. Int. 25 (3): 2552-2569.
21. Razman, K.K.; Mohammad, A.W.; Hanafiah, M.M. Life cycle design and efficiency strategy for sustainable membrane technology. In Proceedings of the IOP Conference Series: Earth and Environmental Science; IOP Publishing: Bristol, UK, 2021; Volume 880, p. 012053.
22. Al-Anbari, M.A.; Altaee, S.A.; Kareem, S.L. Using Life Cycle Assessment (LCA) in Appraisal Sustainability Indicators of Najaf Wastewater Treatment Plant. Egypt. J. Chem. 2022, 65, 9.
23. Shanmugam, K.; Gadhamshetty, V.; Tysklind, M.; Bhattacharyya, D.; Upadhyayula, V.K. A sustainable performance assessment framework for circular management of municipal wastewater treatment plants. J. Clean. Prod. 2022, 339, 130657.
24. Coats, E.R.;Watkins, D.L.; Kranenburg, D. A Comparative Environmental Life-Cycle Analysis for Removing Phosphorus from Wastewater: Biological versus Physical/Chemical Processes. Water Environ. Res. 2011, 83, 750–760.
25. Hao, X.; Wang, X.; Liu, R.; Li, S.; Van Loosdrecht, M.C.; Jiang, H. Environmental impacts of resource

recovery from wastewater treatment plants. Water Res. 2019, 160, 268–277.
26. Teodosiu, C.; Barjoveanu, G.; Sluser, B.R.; Popa, S.A.E.; Trofin, O. Environmental assessment of municipal wastewater discharges: A comparative study of evaluation methods. Int. J. Life Cycle Assess. 2016, 21, 395–411.
27. 36. Zang, Y.; Li, Y.; Wang, C.; Zhang, W.; Xiong, W. Towards more accurate life cycle assessment of biological wastewater treatment plants: A review. J. Clean. Product. 2015, 107, 676–692.
28. Lin, Y.; Guo, M.; Shah, N.; Stuckey, D.C. Economic and environmental evaluation of nitrogen removal and recovery methods from wastewater. Bioresour. Technol. 2016, 215, 227–238.
29. Renou, S.; Thomas, J.; Aoustin, E.; Pons, M. Influence of impact assessment methods in wastewater treatment LCA. J. Clean. Prod. 2008, 16, 1098–1105.
30. Gallego, A.; Rodríguez-Lado, L.; Hospido, A.; Moreira, M.T.; Feijoo, G. Development of regional characterization factors for aquatic eutrophication. Int. J. Life Cycle Assess. 2009, 15, 32–43.
31. Yoshida, H.; Clavreul, J.; Scheutz, C.; Christensen, T.H. Influence of data collection schemes on the Life Cycle Assessment of a municipal wastewater treatment plant. Water Res. 2014, 56, 292–303.
32. Rashid, S.S.; Liu, Y.Q.; Zhang, C. Upgrading a large and centralised municipal wastewater treatment plant with sequencing batch reactor technology for integrated nutrient removal and phosphorus recovery: Environmental and economic life cycle performance. Sci. Total Environ. 2020, 749, 141465.
33. Razman, K.K.; Mohammad, A.W.; Hanafiah, M.M. Life cycle design and efficiency strategy for sustainable membrane technology. In Proceedings of the IOP Conference Series: Earth and Environmental Science; IOP Publishing: Bristol, UK, 2021; Volume 880, p. 012053.

Research in safety, health and environment/ 2024/ Vol.2/ No.2/ 1-13

Research in safety, health and environment

Life cycle assessment in wastewater treatment plants: challenges, strategies and suggested guidelines

Gholamreza Nabi Bidhendi[1]*, Soodeh Homayoun[2]

[1] Professor, Field of Water and Wastewater Engineering, Environment College, University of Tehran, Tehran, Iran
[2]Author, Master Expert, Field of Water and Wastewater Engineering, Environment College, University of Tehran, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: scientific

Received: 15 June 2024

Received in revised form: 12 September 2024

Accepted: 28 October 2024

Published: 22 October 2024

*Correspondence:

ghhendi@ut.ac.ir

Keywords:

Wastewater treatment plant

life cycle assessment

sustainable development

assessment guidelines

wastewater management

ABSTRACT

According to the criteria considered in this research, the articles were selected based on the evaluation indicators on the urban sewage treatment plant, the review of LCA criteria and the integration of life cycle assessment knowledge in the urban sewage treatment plant. The present study has presented the most important points to help the management of wastewater treatment through the LCA process, which include encouraging studies in developing countries, developing guidelines and standard frameworks, better defining goals, Scope, performance function, life cycle inventory, appropriate use of national and regional life cycle databases, inclusion of construction phase, interpretation of land use change impacts and direct greenhouse gas emissions. The guidelines presented in this study are extracted from the most important deficiencies and good practices identified, and its main goal is to help develop the application of LCA in the WWTPs and start a path to prepare a final standard or protocol.