2023, Vol.10, No.2, Pages 27 to 34
Journal of Water and Sustainable Development

سال دهم، شماره ۲، ۱۴۰۲، صفحات ۲۷ تا ۳۴
نشریه آب و توسعه پایدار

Article Type: Methodologies

نوع مقاله: روش‌شناسی

Introduction of Life Cycle Techniques in Evaluating Water Distribution Systems

M. Jafari[1], J. Soltani[2*], S. M. Hashemy Shahdany[2], M. J. Monem[3]

1, 2- MSc Student and Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Technology (Aburaihan), University of Tehran, Tehran, Iran. 3- Professor, Department of Water Engineering and Management, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

*(Corresponding Author Email: jsoltani@ut.ac.ir)

Received: 22-01-2023 Revised: 14-03-2023
Accepted: 14-03-2023 Available Online: 21-09-2023

معرفی کاربردهای تکنیک چرخه عمر در ارزیابی سامانه‌های توزیع آب

مینو جعفری[۱]، جابر سلطانی[۲*]، سیدمهدی هاشمی شاهدانی[۲]، محمد جواد منعم[۳]

۱، ۲- به‌ترتیب دانشجوی کارشناسی ارشد علوم و مهندسی آب - سازه‌های آبی و دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده فناوری کشاورزی (ابوریحان)، دانشگاه تهران، تهران، ایران. ۳- استاد گروه مهندسی و مدیریت آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

*(نویسنده‌ی مسئول، E-Mail: jsoltani@ut.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۰۲ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۲/۲۳
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۲۳ تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۶/۳۰

Abstract

Our generation is facing the daunting challenges of climate change and growing pressure on the environment; Challenges caused by human activities. Considering these environmental conditions and their relationship with social and economic challenges, to achieve the United Nations sustainable development goals, comprehensive and strong tools are required to make decisions to identify the solutions supporting sustainable development in the best way. Decisions should have a systematic perspective, and consider the life cycle and all its related impacts. Life cycle assessment (LCA) is a tool possessing these characteristics. In this study, the life cycle assessment method is introduced first and then, several applications of this method in water distribution systems are examined using some articles. The review of previous studies showed that replacing the gravity transfer of water by pumping can reduce greenhouse gas emissions by 64-81%. Also, choosing the right type and diameter for the pipes of the water distribution network - which will reduce leakage from the network - will increase the life of the network and save up to 75% of costs. Finally, recycling the network after its useful life has significant positive environmental effects and can reduce the potential of human poisoning and pollution of natural resources by 60-88%.

Keywords: Life Cycle, LCA, Water Distribution Systems, Sustainable Development.

چکیده

نسل ما با چالش‌های دلهره‌آوری که تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی ایجاد شده مانند تغییر شرایط جوی و فشار رو به افزایش بر محیط‌زیست روبه‌رو است. با تأمل بر این شرایط محیط‌زیستی و ارتباط آن‌ها با چالش‌های اجتماعي و اقتصادي، برای رسیدن به هدف توسعه پایدار سازمان ملل، به ابزارهای جامع و قوی برای کمک به تصمیم‌گیری برای شناسایی راه‌حل‌هایی که به بهترین شکل از توسعه پایدار پشتیبانی می‌کنند، نیاز است. تصمیمات باید یک چشم‌انداز سیستمی داشته باشند و چرخه عمر و کلیه تأثیرات مربوط به آن را در نظر بگیرند. ارزیابی چرخه عمر(LCA) ابزاری است که این خصوصیات را دارد. در این مطالعه، ابتدا روش‌شناسی ارزیابی چرخه عمر معرفی و سپس با مرور مقالات، چند کاربرد این روش در سامانه‌های توزیع آب بررسی می‌شود. بررسی پژوهش‌های پیشین نشان داد جایگزینی انتقال ثقلی آب با پمپاژ کردن آن، می‌تواند ۶۴ تا ۸۱ درصد باعث کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای شود. همچنین انتخاب جنس و قطر مناسب برای لوله‌های شبکه توزیع آب که کاهش نشت از شبکه را در پی خواهد داشت، موجب افزایش طول عمر شبکه و تا ۷۵ درصد صرفه‌جویی در هزینه‌ها خواهد شد. در نهایت بازیافت شبکه پس از عمر مفید، اثرات محیط‌زیستی مثبت قابل توجهی دارد و می‌تواند پتانسیل مسمومیت انسان و آلودگی منابع طبیعی را ۶۰ تا ۸۸ درصد کاهش دهد.

واژه‌های کلیدی: چرخه عمر، LCA، سامانه‌های توزیع آب، توسعه پایدار.

How to cite this article: Jafari, M., Soltani, J., Hashemy Shahdany, S. M., & Monem, M. J. (2023). Introduction of Life Cycle Techniques in Evaluating Water Distribution Systems. Journal of Water and Sustainable Development, 10(2), 27-34. doi: http://dx.doi.org/10.22067/jwsd.v10i2.2301-1206

مقدمه

باگذر از دوران نادیده گرفتن محیط‌زیست و توسعه بر مبنای بهره‌برداری بیش از حد و رشد اقتصادی، دوران تلاش در جهت توسعه با در نظر گرفتن شاخص‌های محیط‌زیستی و "توسعه پایدار" فرارسیده است. یک توسعه در صورتی پایدار خواهد بود که علاوه‌بر ملاحظات فنی، اجتماعی و اقتصادی، عدم تخریب سرزمینی که قرار است با بهره‌برداری از منابع آن بارور شود را نیز لحاظ نماید (مرادی و همکاران، ۱۳۸۹).

در سال‌های اخیر مشکلاتی نظیر گرم‌شدن زمین، نابودی اکوسیستم‌ها و کاهش منابع، بشر را به چاره‌اندیشی واداشته است. تلاش برای استفاده از تکنولوژی‌های سبز و تولید محصولات دوستدار محیط‌زیست از جمله اقداماتی است که برای بهبود این مسائل صورت می‌پذیرد و براین‌اساس تلاش‌ها در جهت کاهش آثار سوء بر محیط‌زیست می‌باشد. آلودگی‌هایی که یک محصول به محیط‌زیست وارد می‌کند فقط مربوط به مرحله استفاده از آن نیست بلکه سهم قابل توجهی از انتشار آلاینده‌ها در اکثر محصولات مربوط به مراحل تولید، حمل و نقل و یا دفع آنها است (Guinée و همکاران، ۲۰۱۱).

در حوزه آب، شناسایی و پایش اثرات اجرا و بهره‌برداری طرح‌های توسعه منابع آب ضروری است. به‌عنوان‌مثال، پیامدهای حاصل از خطرات و ضایعات ناشی از احداث یک سد، مخزن یا دریاچه بدون توجه به مسائل محیط‌زیستی، چنان جدی است که موجب از بین رفتن سرمایه ملی شده است که غیرقابل جبران می‌باشد (مرادی و همکاران، ۱۳۸۹).

نگرش‌های گوناگونی برای ارزیابی محیط‌زیستی طرح‌ها وجود دارد که در برگیرنده شاخص‌های محیط‌زیستی و اثرات اکولوژیکی است. در این میان ارزیابی چرخه عمر به‌عنوان ابزاری جهت محقق ساختن اهداف توسعه پایدار و افزایش آگاهی جامعه نسبت به مسائل محیط‌زیستی شناخته شده است. ارزیابی چرخه عمر[1] روشی است که به‌منظور تخمین صدمات و بارهای محیط‌زیستی مربوط به تمام مراحل تولید، بهره‌برداری و پایان عمر یک محصول، فرایند یا خدمت، طراحی و استانداردسازی شده است. هم صنعت و هم تجارت، سودمندی این روش را برای حفظ منابع طبیعی و کاهش مصرف انرژی همگام با کمینه‌سازی آلودگی، پسماند و هزینه‌ها به رسمیت شناخته‌اند (Racoviceanu و همکاران، ۲۰۰۷).

معرفی ارزیابی چرخه عمر

بنا به تعریف سازمان استاندارد جهانی[2] در استاندارد ۱۴۳۴۳، ارزیابی چرخه عمر عبارت از گردآوری ورودی‌ها و خروجی‌های ناشی از یک محصول در طول چرخه عمر آن و ارزیابی پیامدهای محیط‌زیستی ناشی از آن می‌باشد.

ارزیابی چرخه حیات به‌عنوان یک ابزار ارزیابی برای تحلیل و بررسی ملاحظات محیط‌زیستی محصولات و خدمات مطرح شد که می‌تواند در روند فرایندهای تصمیم‌گیری برای توسعه پایدار دخیل باشد. این روش دارای دو وجه متمایز نسبت به سایر ابزارهای ارزیابی محیط‌زیستی است:

- همه مراحل حیات یک محصول (از گهواره تاگور)، کالا یا خدمت، از استخراج منابع تا فرآیند ساخت و پردازش، توزیع و حمل و نقل، مصرف تا بازیافت و دفع، با توجه به تمام جریان‌های مواد و انرژی مرتبط ارزیابی می‌شود.
- همه پیامدهای محیط‌زیستی مرتبط، هم ورودی‌ها (استفاده از منابع) و هم خروجی‌ها (انتشارات به هوا، آب و خاک) بررسی و محاسبه می‌شوند (میرابی و همکاران، ۱۳۹۶).

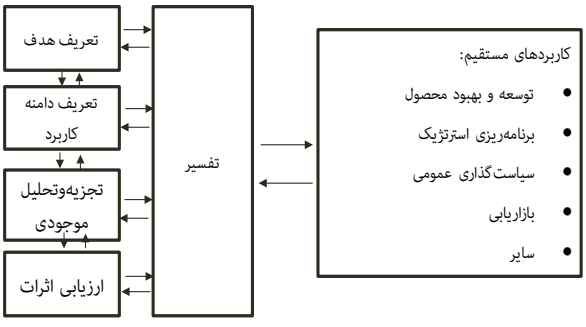
به همین دلیل به‌کارگیری روش‌های علمی ارزیابی محیط‌زیستی اثرات می‌تواند اطمینان کافی از رعایت سیاست‌ها و اهداف تعیین شده در طرح‌ها و فعالیت‌ها را در جهت تامین ضوابط، معیارها و قوانین، فراهم آورد (پناهنده و همکاران، ۱۳۹۳).

از زمان پیدایش روش ارزیابی چرخه عمر تاکنون مطالعات بسیاری جهت ارزیابی و بررسی اثرات محیط‌زیستی مرتبط با زمینه‌های مختلف ازجمله محصولات کشاورزی، لبنی، صنایع پتروشیمی، فولاد و سیماسازی وصنایع چوب و کاغذ صورت گرفته است.

Baumman و Tillman (۲۰۰۴) ارزیابی چرخه عمر را یکی از روش‌های قابل اعتماد برای تجزیه و تحلیل اثرات محیط‌زیستی در طول چرخه عمر یک محصول و بخشی از فرایند تصمیم‌گیری برای حرکت به سمت محصولات سازگار با محیط‌زیست عنوان نمودند. Klöpffer و Curran (۲۰۱۴) ارزیابی چرخه عمر را ابزار علمی-مقایسه‌ای سامانه‌های تولید معرفی کرده و اظهار داشت از روش ارزیابی چرخه عمر می‌توان اثرات محیط‌زیستی بالقوه یک محصول را محاسبه و میزان تفاوت در اثرات در نتیجه اعمال تغییرات مانند تغییر در مواد اولیه یا مراحل و نحوه ساخت و یا طراحی محصول را بررسی کرد.

به‌طورکلی، ارزیابی چرخه عمر، تعدادی ویژگی تعیین‌کننده داردکه آن را قادر می‌سازد به سؤالاتی بپردازد که هیچ ابزار ارزیابی دیگری قادر به پرداختن به آن‌ها نیست. به‌منظور درک بهتر، مراحل ارزیابی چرخه عمر در شکل (۱) ارائه شده است.برای بررسی اثرات محیط‌زیستی محصولات یا خدمات در قالب روش ارزیابی چرخه عمر، ابتدا لازم است مراحل استفاده از این روش در چارچوب استانداردهای بین‌المللی مورد توجه قرار گیرد. چارچوب ارزیابی چرخه عمر مطابق استاندارد جهانی شامل گام‌های زیر است:

۱- تعریف هدف و دامنه کاربرد
۲- تجزیه و تحلیل موجودی‌ها (سیاهه چرخه عمر[3])
۳- ارزیابی اثرات چرخه عمر[4]
۴- تفسیر نتایج



شکل ۱- چارچوب ارزیابی چرخه عمر در استاندارد ISO ۱۴۰۴۰ (Klöpffer و Curran، ۲۰۱۴)

۱- تعریف هدف و دامنه کاربرد

این گام، شامل سه بخش تعیین هدف پژوهش، مرزهای سیستم و واحد عملکرد سیستم است. در این مرحله، محصول از منظر مرزها، واحد عملکردی و اینکه این ارزیابی به چه پرسش‌هایی پاسخ خواهد داد، تعریف می‌شود. ارزیابی چرخه عمر، بر مبنای محاسبه و مقایسه پیامدهای محیط‌زیستی ناشی از مقدار معینی از محصول یا خدمتی که ثمره کار سیستم است، انجام می‌شود و این مقدار معین، واحد عملکرد نامیده می‌شود. همچنین مرزهای سیستم در مطالعات مختلف متفاوت است؛ زیرا انتخاب مرزهای سیستم، وابسته به هدف مطالعه است. مرز سیستم می‌تواند تولید[۵]، استفاده یا بهره‌برداری[۶] تا عمر مفید و سناریو دفع[۷] (شامل دورانداختن، از کار انداختن و استفاده مجدد یا بازیافت) را دربرگیرد (Hauschild و همکاران، ۲۰۱۸).

۲- تجزیه‌وتحلیل موجودی (سیاهه چرخه عمر)

این گام شامل شناسایی و کمّی نمودن کلیه منابع مورد استفاده (اعم از انرژی، آب، مواد خام و فرآوری‌شده)، کلیه مواد منتشرشده به محیط‌زیست (مانند انتشار آلاینده‌ها به هوا، خاک و آب) و ضایعات ناشی از تولید و مصرف محصول است. کمیت و کیفیت داده‌های جمع‌آوری شده در این مرحله، به هدف مطالعه، مرز سیستم، بودجه و زمان بستگی دارد. منبع و مرجع جمع‌آوری اطلاعات نیز نقش بسیار مؤثری در اعتبار و کامل بودن داده‌ها دارد. به‌طورکلی داده‌ها را از یک یا چند منبع همچون اندازه‌گیری مستقیم، اندازه‌گیری آزمایشگاهی، اسناد دولتی و صنعتی، گزارش‌های تجاری، منابع اطلاعاتی ملی، سیاهه‌های محیط‌زیستی، مشاوران، پایگاه‌های داده، منابع علمی و قضاوت‌های مهندسی استخراج یا تهیه نمود (میرابی و همکاران، ۱۳۹۶).

۳- ارزیابی اثرات چرخه عمر

در این گام، مقصود از ارزیابی اثرات چرخه عمر، درک و ارزیابی مقدار و اهمیت پیامدهای بالقوه محیط‌زیستی ناشی از محصول نهایی می‌باشد. در این مرحله، تاثیرات بالقوه ناشی از مصرف منابع محیطی و تولید آلاینده‌ها بر انسان و طبیعت ارزیابی می‌شود (Hauschild و همکاران، ۲۰۱۸).

۴- تفسیر نتایج

گام پایانی در ارزیابی چرخه عمر، تفسیر نتایج حاصل شده است که در آن، داده‌ها تبدیل به یک سری از نشانگرها و سپس براساس اثرات محیط‌زیستی طبقه‌بندی شده، کمّی‌سازی می‌شوند (Hauschild و همکاران، ۲۰۱۸).

نقاط قوت و محدودیت‌های ارزیابی چرخه عمر

نقطه قوت اصلی ارزیابی چرخه عمر، جامع بودن آن از نظر دورنمای چرخه عمر و مسائل محیط‌زیستی است. این امر می‌تواند مقایسه اثرات محیط‌زیستی محصول را که از صدها فرآیند تشکیل شده است، فراهم آورد و هزاران مورد استفاده از منابع و تولید گازهای گلخانه‌ای را که در زمان‌ها و نقاط مختلف اتفاق می‌افتد، حساب کند. بااین‌حال جامع‌بودن نیز یک محدودیت است؛ زیرا مدل‌سازی سامانه محصول و اثرات محیطی نیاز به ساده‌سازی دارد. یکی دیگر از نقاط قوت در زمینه ارزیابی‌های مقایسه‌ای این است که ارزیابی چرخه عمر از اصل "بهترین برآورد" پیروی می‌کند؛ این امر به‌طورکلی امکان مقایسه بی‌طرفانه را فراهم می‌آورد. محدودیت مربوط به پیروی از اصل "بهترین برآورد" این است که مدل‌های ارزیابی چرخه عمر مبتنی بر عملکرد متوسط فرایندها هستند و از در نظر گرفتن خطرات حوادث نادر اما بسیار مشکل‌ساز مانند ریختن روغن سایت‌های صنعتی در دریا یا تصادفات پشتیبانی نمی‌کنند. در نتیجه، به‌عنوان‌مثال، انرژی هسته‌ای در ارزیابی چرخه عمر کاملاً سازگار با محیط‌زیست است زیرا ریسک ناچیز یک فاجعه ویرانگر، مانند مواردی که در چرنوبیل، اوکراین یا فوکوشیما ژاپن اتفاق افتاد، در نظر گرفته نمی‌شود (Klöpffer و Curran، ۲۰۱۴).

نکته حائز اهمیت این است که اگرچه ارزیابی چرخه عمر می‌تواند مشخص کند چه چیزی برای محیط‌زیست بهتر است، اما نمیتواند به شما بگوید که آیا "به اندازه کافی خوب" است یا خیر. بنابراین با استناد به ارزیابی چرخه عمر نمی‌توان گفت یک محصول از نظر محیط‌زیستی به طور مطلق قابل اطمینان است اما می‌توان مشخص کرد که یک محصول دارای اثرات محیط‌زیستی کمتری نسبت به محصول دیگر است (میرابی و همکاران، ۱۳۹۶).

خصوصیات فوق به‌این معنی است که ارزیابی چرخه عمر مناسب برای پاسخ به برخی از سؤالات و نامناسب برای پاسخ به برخی دیگر است. در ادامه نمونه سؤالاتی که ارزیابی چرخه عمر می‌تواند یا نمی‌تواند پاسخ دهد، ارائه شده است:

• نمونه سؤالاتی که ارزیابی چرخه عمر می‌تواند پاسخ دهد:

۱- مناسب‌ترین کیسه برای حمل مواد غذایی کدام است؟ کاغذی، پارچه‌ای یا پلاستیکی؟

۲- چگونه می‌توان اثرات محیط‌زیستی یخچال را با کمترین تلاش به حداقل رساند؟

۳- از نظر محیط‌زیستی، پلاستیک‌ها باید سوزانده شوند یا بازیافت؟
۴- آیا شستن ظرف‌ها به‌صورت دستی با محیط‌زیست سازگارتر است یا استفاده از ماشین ظرفشویی؟
۵- آیا اتومبیل‌های برقی نسبت به موتورهای احتراق داخلی معمولی سازگار با محیط‌زیست هستند؟

• نمونه سؤالاتی که ارزیابی چرخه حیات نمی‌تواند پاسخ دهد:
۱- آیا برای کاهش انتشار ذرات باید مالیات بر روی خودروهای دیزلی قدیمی افزایش یابد و از این طریق هزینه بیمارستان را برای درمان بیماری‌های ریوی کاهش دهد؟
توضیح: ارزیابی چرخه عمر نمی‌تواند برای مقایسه مضرات اجتماعی مالیات‌های بالاتر با مزایای آلودگی کمتر استفاده شود.
۲- آیا تولید گازهای گلخانه‌ای فعلی از یک کارخانه خاص منجر به تمرکز آلاینده‌های بالاتر از آستانه نظارتی در اکوسیستم‌های آبزی مجاور می‌شود؟
توضیح: ارزیابی چرخه عمر برای ارزیابی تأثیرات منبع انتشار منفرد بر اکوسیستم‌های محلی طراحی نشده است و هیچ اطلاعاتی در مورد آستانه‌های نظارتی ندارد (Klöpffer و Curran، ۲۰۱۴).

سازمان‌های پژوهشی در زمینه ارزیابی چرخه عمر

• سازمان بین‌المللی استاندارد، استانداردهای مدیریت محیط‌زیستی، سری‌های ISO ۱۴۰۰۰ را به‌عنوان بخشی از استاندارد بین‌المللی در ارزیابی چرخه عمر توسعه داده است.
• سازمان حفاظت محیط‌زیست[۸] ایالات متحده آمریکا، در حال توسعه کار بر روی توسعه روش ارزیابی چرخه حیات در دسته‌های مختلف می‌باشد.
• اتحاد جهانی مراکز ارزیابی چرخه عمر، شامل: مرکز مرجع بین دانشگاهی کانادا برای بررسی چرخه حیات، مرکز آمریکایی برای ارزیابی چرخه عمر، مرکز تحقیقات ارزیابی چرخه عمر ژاپن و مرکز ارزیابی چرخه عمر دانمارک، کمیسیون اروپا (بسترهای نرم‌افزاری اروپایی در ارزیابی چرخه عمر)، که از تفکر چرخه عمر در توسعه کالاها و خدمات با ارجاع داده‌ها و روش‌های توصیه شده، پشتیبانی می‌کند بسترهای مورد نیاز برای کسب‌وکارهای خصوصی و مقامات دولتی را نشان می‌دهد (Hauschild و همکاران، ۲۰۱۸).

مروری بر تحقیقات پیشین

در این پژوهش، تلاش شده است تا تعدادی از مرتبط‌ترین مقالات و تحقیقات صورت گرفته با روش چرخه عمر در ارزیابی سامانه‌های توزیع آب طی ۲۰ سال گذشته (از ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۲) جمع‌آوری و بررسی شود. Tanji و همکاران (۲۰۰۳) از ارزیابی چرخه عمر، که یک چارچوب رایج برای ارزیابی اثرات محیط‌زیستی تولیدات کارخانه است، برای ارزیابی اثرات محیط‌زیستی کانال‌های آبیاری از طریق بار محیطی خروجی، مانند انرژی یا دی اکسید کربن، استفاده کردند. بنابراین ارزیابی چرخه عمر آب آبیاری را می‌توان به‌عنوان ۱) محصول یا ۲) منابع ورودی تنظیم کرد. براساس نتایج این تحقیق، استفاده از ارزیابی چرخه عمر برای آب آبیاری می‌تواند کمک کند تا تأثیر محیط‌زیستی کربن دی اکسید تخمین زده شود که برای کاهش خطر گرمایش جهانی مفید است. بررسی کانال‌های آبیاری یک شبکه در ژاپن طی یک دوره ۳۰ ساله نشان داد یک کانال با ورودی آب به‌وسیله نیروی ثقل مقدار کربن تولیدی ناشی از دی اکسید کربن، ۲/۲ تن بر هکتار و برای یک کانال با ورودی از طریق هد پمپاژ این مقدار ۶ تن بر هکتاراست. بنابراین ارزیابی چرخه عمر می‌تواند برای ارزیابی عملکرد سامانه آبیاری استفاده شود (Tanji و همکارن، ۲۰۰۳).
باتوجه‌به مشکل فرسودگی شبکه‌های توزیع آب شهری در سراسر جهان، به‌منظور تدوین سیاستی برای جایگزینی شبکه موجود با شبکه‌ای با عمرمفید بالاتر و نیز مقرون‌به‌صرفه، Ambrose و همکاران (۲۰۰۸) رویکرد LICAN را برای هزینه‌یابی کل عمر معرفی کردند و یک مطالعه موردی فرضی را برای نشان دادن اهمیت چنین رویکردی انجام دادند. براساس این رویکرد، مجموعه‌ای از شبکه‌های لوله با استفاده از مواد مختلف لوله (پی وی سی[۹]، چدن داکتیل[۱۰] و پلی اتیلن[۱۱]) برای تعیین هزینه کل عمر آن‌ها، با در نظر گرفتن هزینه‌های نصب، نگهداری و تعمیر مدل‌سازی شدند. نتایج نشان داد بسیاری از مواد لوله‌های معاصر که مورد استفاده قرار می‌گیرند، مانند چدن داکتیل و پی وی سی ممکن است در طولانی مدت هزینه‌های قابل توجهی را به همراه داشته باشند. این مواد برخلاف پیش‌بینی‌های مربوط به لوله‌های پلی‌اتیلن، نرخ شکست نسبتاً بالاتر و نیز نرخ نشت بالاتر دارند که می‌تواند منجر به هزینه‌های نگهداری قابل توجه و از دست رفتن مقادیر بیشتر آب در طول عمر شبکه لوله شود. بااین‌حال، بر اساس داده‌های مربوط به هزینه‌ها و شکست لوله‌ها، شبکه‌های پلی‌اتیلن هزینه‌های بسیار کمتری را در طول عمر خود نشان دادند که به دلیل نرخ شکست و تلفات آب پایین، در بلندمدت تا ۷۵ درصد منجر به صرفه‌جویی در هزینه‌ها خواهد شد (Ambrose و همکاران، ۲۰۰۸).
Friedrich و همکاران (۲۰۰۹) با دو هدف انجام شد: ۱- ایجاد اطلاعات در مورد مشخصات محیط‌زیستی چرخه عمر آب، از تصفیه تا توزیع، جمع‌آوری و دفع (ازجمله بازیافت)، در بافت شهری eThekwini، در آفریقای جنوبی، به‌عنوان منطقه مورد مطالعه ۲- هدف دیگر این مطالعه مقایسه پیامدهای محیط‌زیستی برای تأمین آب آشامیدنی قابل شرب در مقابل آب بازیافتی برای صنعت در این منطقه بود. در این راستا، یک سری ارزیابی چرخه عمر محیطی انجام و امتیازات محیط‌زیستی برای فرآیندهای مربوط به آن محاسبه شد. براساس نتایج حاصل از ارزیابی چرخه عمر مشخص شد بیشترین سهمی که بین ۳۷ تا ۴۶ درصد در شاخه‌های مختلف

متغیر است، متعلق به فرآیند لجن فعال است که در تصفیه پساب استفاده می‌شود. اما در شرایطی که کل سامانه در نظر گرفته شد و شامل تلفات در شبکه توزیع آب آشامیدنی بود، فرآیند توزیع بیشترین سهم را دارد که بین ۳۲ تا ۴۸ درصد در شاخه‌های مختلف بود. همچنین مشخص شد بازیافت، اثرات محیط‌زیستی مثبت قابل توجهی دارد که مهمترین آن کاهش پتانسیل مسمومیت انسانی به میزان ۸۸ درصد است (Friedrich و همکاران، ۲۰۰۹).

Herstein و Filion (۲۰۱۱) چرخه عمر جنس لوله‌های رایج مورد استفاده در شبکه‌های توزیع آب را ارزیابی کردند. در این مقاله اثرات محیط‌زیستی اقتصادی مرتبط با تولید لوله‌های پی وی سی و چدن داکتیل، مخازن فولادی و تولید برق برای پمپاژ در بهینه‌سازی شبکه توزیع آب بررسی شده است. از الگوریتم ژنتیک رتبه‌بندی نامغلوب[۱۲] برای ایجاد راه‌حل‌های بهینه پارتو در جهت حل مشکل گسترش شبکه معیار «Anytown» استفاده شده است.

در ادامه جواب‌های پارتو بهینه شبکه «Anytown» با رویکرد چرخه عمر ورودی-خروجی اقتصادی[۱۳] و معیارهایی در مورد انتشار آلاینده‌های جوی، استفاده از انرژی تجدیدناپذیر و انتشار آلاینده‌های محیط‌زیستی ارزیابی شد. یافته‌های اصلی نشان داد فعالیت‌های تولید لوله‌های چدن داکتیل و پلی وینیل کلراید و تولید برق (برای پمپاژ) اثرات محیط‌زیستی مخرب‌تری نسبت به تولید مخازن فولادی و فعالیت‌های ساخت‌وساز در شبکه «Anytown» دارند.

مطابق نتایج چرخه عمر ورودی-خروجی اقتصادی، تولید لوله چدن داکتیل اثرات زیر را در پی دارد:

(۱) انتشار مونوکسیدکربن ناشی از حمل‌ونقل کامیون و تجارت عمده فروشی

(۲) آسیب به زمین و منابع زیرزمینی از فعالیت‌های معدن فلز

از طرفی طبق نتایج، تولید لوله‌های پی‌وی‌سی با موارد زیر مرتبط است:

(۱) انتشار مونوکسید کربن از حمل‌ونقل کامیون

(۲) انتشار هوای سمی از بخش تولید مواد پلاستیکی و رزین

(۳) انتشار سمی زمین و زیرزمینی از استخراج فلزات و تولید رزین

(۴) استفاده از گاز طبیعی برای مواد پلاستیکی و ساخت رزین (Herstein و Filion، ۲۰۱۱).

Du و همکاران (۲۰۱۳) تجزیه‌وتحلیل چرخه عمر را برای بررسی و مقایسه شش نوع متداول کاربرد جنس‌های مختلف لوله آب و فاضلاب شامل؛ پلی‌وینیل‌کلرید، چدن داکتیل، چدن، پلی‌اتیلن با چگالی بالا[۱۴]، بتن و بتن مسلح انجام دادند. اهداف آن‌ها عبارت بود از:

(۱) مقایسه مواد شش لوله از نظر پتانسیل گرمایش جهانی از طریق چهار فاز: تولید لوله، حمل‌ونقل، نصب و استفاده.

(۲) تعیین منبع (های) اولیه تفاوت در نتایج ارزیابی چرخه عمر

(۳) بررسی اثربخشی معیارهای انتخاب اندازه لوله بر پتانسیل گرمایش جهانی.

بررسی نتایج براساس هریک از اهداف فوق نشان داد:

برای قطر لوله ≥۶۱ سانتی‌متر، پتانسیل گرمایش جهانی بر اثر ساخت لوله، حمل‌ونقل و نصب لوله‌های چدن داکتیل بزرگترین در بین شش ماده بود. نتایج همچنین نشان داد قطر بهینه‌ای وجود دارد که پتانسیل گرمایش جهانی طول عمر را به حداقل می‌رساند. بااین‌حال، اندازه لوله بهینه براساس پتانسیل گرمایش جهانی مشابه قطر لوله انتخاب شده براساس هزینه اقتصادی به تنهایی بود که نشان می‌دهد ارزیابی چرخه عمر سامانه‌های توزیع آب و جمع‌آوری فاضلاب تغییرات عمده‌ای در معیارهای انتخاب اندازه لوله ایجاد نمی‌کند (Du و همکاران، ۲۰۱۳).

Hendrickson و Horvath (۲۰۱۴) ردپای گازهای گلخانه‌ای موجود، عناصر رایج سیستم توزیع آب را با استفاده از ارزیابی چرخه عمر، کمی کردند. نتایج نشان داد ۸۱٪ از گازهای گلخانه‌ای ناشی از انرژی پمپاژ است که در آن بخش بزرگی از این انتشارات ناشی از نشت توزیع است و ۲۷۰ میلیارد لیتر از تلفات آب روزانه را در ایالات متحده تشکیل می‌دهد (Hendrickson و Horvath، ۲۰۱۴).

Barjoveanu و همکاران (۲۰۱۴) از ارزیابی چرخه عمر به‌منظور ارزیابی سامانه خدمات آبرسانی در شهر Iasi در کشور رومانی استفاده کردند. مراحل در نظر گرفته شده در این ارزیابی شامل برداشت، انتقال، تصفیه و توزیع آب و همچنین جمع‌آوری، تصفیه و تخلیه فاضلاب است. طبق نتایج برای سامانه نامبرده، اثرات مراحل قبل از رسیدن آب به مرحله مصرف، بیشتر از مراحل بعد از مصرف می‌باشد که عمدتاً به دلیل تلفات زیاد آب در سامانه توزیع است. بااین‌حال مراحل بعد از مصرف نیز همچنان بر بسیاری از اثرات محیط‌زیستی مانند یوتریفیکاسیون و آلودگی آب‌های سطحی مؤثر هستند. راهکارهای ارائه شده برای بهبود عملکرد این سامانه در راستای حفظ محیط‌زیست عبارت است از: تغییر در منابع آب، بهبود سامانه توزیع و ارتقاء تصفیه‌خانه فاضلاب می‌باشد (Barjoveanu و همکاران، ۲۰۱۴).

Hasegawa و همکاران (۲۰۱۶) بهینه‌سازی استراتژی‌های جایگزینی سامانه‌های توزیع آب شهری برای محاسبه هزینه چرخه عمر[۱۵] و کل انتشار گازهای گلخانه‌ای را از هر دو دیدگاه اقتصادی و محیط‌زیستی مهم دانسته و اظهار داشتند تحقیقات متعددی با در نظر گرفتن سناریوهای متفاوت این موضوع را بررسی کرده‌اند اما پیش از این سناریوی کاهش جمعیت در نظر گرفته نشده است.

این مطالعه پیشنهاد می‌کند ارزیابی‌های چرخه عمر سیستم های توزیع آب شهری را در شرایط کاهش جمعیت طولانی مدت مستمر و سودمندی کوچک‌سازی لوله‌ها برای برآورده کردن پیش‌بینی‌های کاهش جمعیت در آینده بررسی کند.

از طریق ارزیابی چرخه عمر سامانه های توزیع آب شهری و تحلیل حساسیت نرخ تنزیل اجتماعی[۱۶]، این مطالعه نشان داد:

(۱) طول عمرکوتاه‌تر پمپ مفید است، بنابراین، نظارت مکرر بر خروجی پمپ مربوط به کاهش تقاضای آب است.

(۲) برای ارزیابی هزینه چرخه عمر، لوله‌ها باید در پاسخ به کاهش جمعیت کوچک شوند، اما برای کاهش انتشار کل گازهای گلخانه‌ای، حفظ قطر فعلی یا کوچک کردن متوسط قطرها پیشنهاد می‌شود.
(۳) نه تنها نرخ تنزیل اجتماعی بالاتر، بلکه کاهش جمعیت نیز به نفع قطرهای کوچکتر در دوره اولیه است زیرا قطر لوله‌های کاندید محاسبه شده در دوره اولیه بزرگتر از دوره آخر است.
Jocanovic و همکاران (۲۰۱۹) در تحقیقی چند رشته‌ای، یک مدل ارزیابی چرخه عمر/ هزینه چرخه عمر را برای ارزیابی هزینه‌ها، مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای در طول چرخه عمر واحد پمپ در سامانه‌های توزیع آب آشامیدنی توسعه دادند. روش ارائه شده شامل پایش پمپ، موتور و درایو فرکانس متغیر به‌عنوان یک سامانه (واحد پمپ)، از طریق مراحل چرخه عمر آن‌ها است، که این مراحل شامل: مرحله ساخت، مرحله بهره‌برداری، و مرحله دفع در پایان چرخه عمر آن‌ها می‌باشد.مدل توسعه یافته همچنین فرایندهای دیگری مانند تعمیر و نگهداری، آزمایش و بازسازی واحد پمپ را تجزیه‌وتحلیل می‌کند. نمایش روش ارائه شده با استفاده از واحد پمپ یک سامانه توزیع آب شهری عامل در سناریوهای مختلف، به‌منظور نشان دادن کاربرد مناسب این مدل انجام شد. نتایج به‌دست آمده نشان داد کاربرد واحدهای پمپ از نظر مصرف انرژی قابل توجیه است و ۹۳ تا ۹۴ درصد انرژی مصرف شده و هزینه‌های چرخه عمر مربوط به هزینه‌های عملیاتی پمپ است، درحالی‌که بقیه مربوط به عملیات کمکی است. یافته‌ها نشان داد کشورهای مختلف می‌توانند قیمت‌های متفاوتی برای انرژی الکتریکی و انتشار گازهای گلخانه‌ای داشته باشند که به منبع انرژی الکتریکی بستگی دارد. در نهایت، نتایج بهره برداری از واحد پمپ در توزیع آب آشامیدنی برای نشان دادن تأثیر چنین نیروگاهی بر سطوح مختلف مصرف انرژی، انتشار گازهای گلخانه‌ای و هزینه چرخه حیات استفاده شده است (Jocanovic و همکاران، ۲۰۱۹).
Xue و همکاران (۲۰۱۹) اثرات محیط‌زیستی و اقتصادی چرخه عمر سامانه‌های آب و فاضلاب شهری را در منطقه سینسیناتی به‌عنوان یک مطالعه موردی ارزیابی کرد. دامنه این مطالعه شامل کل سامانه‌های آب و فاضلاب شهری از شروع آب خام برای آب آشامیدنی تا تصفیه و دفع فاضلاب است. ارزیابی چرخه عمر مشخص کرد بهره‌برداری و نگهداری از سامانه‌های توزیع آب آشامیدنی سهم عمده‌ای در مصرف انرژی (۴۳٪) و پتانسیل گرمایش جهانی (۴۱٪) دارد. تخلیه فاضلاب از تصفیه‌خانه فاضلاب در بیش از ۸۰٪ از کل یوتروفیکاسیون دخالت دارد. همچنین تجزیه و تحلیل هزینه‌ها نشان داد هزینه کار و تعمیر و نگهداری برای جمع‌آوری فاضلاب با ۱۹٪ و هزینه برق برای توزیع آب آشامیدنی با ۱۳٪ بیشترین سهم را دارند. طبق نتایج آنالیز حساسیت، اثرات محیط‌زیستی چرخه عمر، نسبت به انتخاب منابع تولیدکننده برق و مصرف برق، از سایر پارامترهای ورودی مانند دوزهای شیمیایی و طول عمر زیرساخت‌ها، حساس‌تر است. ارزیابی چرخه عمر نشان داد استفاده از منابع انرژی پاک‌تر، کاهش مصرف برق، طراحی پیکربندی سامانه با اهداف مناسب، بازیابی منابع و تمرکززدایی از استراتژی‌های موثر برای کاهش تأثیرات محیط‌زیستی و اقتصادی سامانه‌های آب شهری است (Xue و همکاران، ۲۰۱۹).
Hajibabaei و همکاران (۲۰۲۰) در پژوهشی یک مجموعه داده جامع از چرخه عمر به‌منظور ارزیابی بارهای محیط‌زیستی مرتبط با مراحل ساخت و نوسازی شبکه‌های توزیع آب جمع‌آوری نمودند. هدف از این پژوهش کشف اثرات داده‌های اولیه و ثانویه بر نتایج ارزیابی چرخه عمر براساس تحلیل عدم‌قطعیت‌ها بوده است. نتایج حاکی از اهمیت لحاظ فرآیندهای مربوط به ساخت‌وساز جاده‌ای، به خصوص برای لوله‌های پلاستیکی کوچک تا متوسط بود. اگرچه انرژی حاصل از سوزاندن لوله‌های پلاستیکی تا حدی اثرات پایان عمر آن‌ها را جبران می‌کند اما این فرآیندهای مربوط به سوزاندن، تأثیر قابل توجهی بر گرمایش جهانی می‌گذارند. در نهایت این مطالعه نشان داد بدون درنظرگرفتن تمامی اطلاعات شناخته شده نیز ارزیابی چرخه عمر برای شبکه‌های توزیع آب قابل اعتماد است. همچنین این مقاله پشنهاداتی را ارائه داده است که بهتر است در فرآیند جمع‌آوری داده روی کدام داده‌ها تمرکز شود (Hajibabaei و همکاران، ۲۰۲۰).
Sheefa و همکاران (۲۰۲۲) با اشاره به اینکه برای یک رویداد آلودگی با نمک یا سایر آلودگی‌های تغلیظی در یک سامانه توزیع آب، باز کردن شیرهای آتش نشانی برای شستشوی سیستم در حال حاضر یک روش ضد آلودگی پذیرفته شده است اما تمام آب شستشوی آلوده به محیط اطراف شیرهای آتش‌نشانی تخلیه می شود و اثرات محیط‌زیستی را تحمیل می‌کند. بنابراین استفاده از یک حوضچه مهار برای گرفتن آب آلوده را یکی از جایگزین‌های ضد آلودگی سامانه معرفی کردند. برای کاهش اثرات محیط‌زیستی شستشوی نمک از یک سامانه توزیع آب، یک مطالعه ارزیابی چرخه عمر مقایسه‌ای برای هر دو گزینه شستشوی معمولی و شستشوی آب آلوده به یک حوضچه مهار انجام شد. این کار با استفاده از نرم‌افزار SimaPro برای هر دو گزینه ضدعفونی انجام و اثرات با استفاده از روش IMPACT ۲۰۰۲+ ارزیابی شده است. نتایج حاکی‌از آن بود که اثرات محیط‌زیستی را می‌توان تا ۲۵ درصد برای مناطق روستایی، ۶۹ درصد برای جاده‌های شهری، ۶۱ درصد برای چمن‌های شهری و ۶۴ درصد برای کاربری مختلط کاهش داد. علاوه‌براین، آنالیز حساسیت دو متغیر حساس را نشان داد که منجر به این یافته شد که تغییر ۱۰ درصدی در زمان مورد نیاز برای رفع آلودگی سامانه منجر به تغییر ۱۰ درصدی در اثرات محیط‌زیستی و تغییر ۱۰٪ در مساحت زمین در معرض تخلیه آب آلوده منجر به تغییر ۸٪ در اثرات محیط‌زیستی می‌شود (Sheefa و همکاران، ۲۰۲۰)
حاجی بابایی و همکاران (۱۳۹۵) اثرات محیط‌زیستی ناشی از تولید، حمل و نصب لوله‌های پی‌وی‌سی، پلی‌اتیلن با وزن مخصوص بالا، سیمانی الیاف‌دار و چدن نشکن را بررسی کردند. همچنین در فرآیند

نصب، با در نظر گرفتن ترانشه مختص هر لوله، مقایسه‌ای بین اثرات محیط‌زیستی انواع ترانشه‌ها نیز صورت گرفته است. نتایج این تحقیق نشان داد درمجموع سه فاز تولید، حمل و نصب، لوله‌های چدن نشکن بیشترین و لوله‌های پی‌وی‌سی کمترین اثرات محیط‌زیستی را به خود اختصاص می‌دهند (حاجی بابایی و همکاران، ۱۳۹۵).

جمع‌بندی و بحث

در روش ارزیابی چرخه عمر با کمی‌سازی انتشارات ناشی از یک محصول، فرایند یا خدمت که به محیط وارد می‌شوند، تمام اثرات محیط‌زیستی در طول چرخه عمر آن قابل بررسی است. این روش جامع و کل‌نگر می‌تواند با شناسایی پارامترهای اصلی تولید کننده آلودگی، طراحان را برای طراحی متناسب‌تر با شرایط محیط‌زیستی و مدیران را به یافتن راهی برای کاهش آلودگی اجرای پروژه‌های عمرانی رهنمون کند. به‌کارگیری تکنیک چرخه عمر در شبکه‌های توزیع آب هنوز رایج نیست؛ اما مطالعات معدود صورت گرفته، یا حول محور اثرات لوله و پمپاژ بوده‌اند و یا در خصوص معرفی روشی بر پایه ارزیابی چرخه عمر برای شرایطی خاص انجام شده است. نتایج به‌دست آمده از تمامی پژوهش‌ها حاکی‌از آن است که استفاده از این روش در این حوزه مفید و مؤثر بوده و با وجود نیاز به پارامترهای ورودی زیاد قابلیت گسترش دارد. همچنین مشخص شد کشورهای توسعه یافته بسیار بیشتر از کشورهای در حال توسعه، به ارزیابی محیط‌زیستی محصولات و خدمات خود با استفاده از روش چرخه عمر پرداخته‌اند که باتوجه‌به دغدغه‌مندتر بودن کشورها نسبت به مسائل محیط‌زیستی و همچنین جدید بودن روش ارزیابی چرخه حیات، این امر قابل پیش‌بینی است. در مطالعات به‌کارگیری ارزیابی چرخه عمر در حوزه آب، می‌توان دریافت که ۱- در آبرسانی بیشترین تلفات مربوط به توزیع است؛ ۲- بازیافت اجزاء سازنده شبکه‌ها در پایان عمر آن‌ها می‌تواند تا بیش از ۸۰ درصد از اثرات سوء محیط‌زیستی آن‌ها بکاهد.

پیشنهادات

- از نرم‌افزارهای موجود (به‌عنوان مثال SimaPro, Gabi, Umberto, Open LCA) برای ارزیابی گزینه‌های بهبود عملکرد شبکه‌ها استفاده شود.
- به جز شبکه‌های توزیع آب شهری، بیشتر به حیطه کشاورزی پرداخته شود.
- سناریوهای دفع اجزاء سازنده شبکه پس از پایان عمر آن‌ها بیشتر مورد توجه قرار گیرد.
- اثربخشی راهکارهای بهبود عملکرد سامانه‌های توزیع آب توسط روش چرخه عمر مقایسه شود.

پی‌نوشت

1-International Organization for Standardization
2-Life Cycle Assessment
3-Life Cycle Inventory
4-Life Cycle Impact Assessment
5-Assembly
6-Life cycle
7-Disposal scenario
8-Environmental Protection Agency
9-Poly vinyl chloride
10-Ductile Iron
11-Polyethylene
12-Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II
13-Economic input-output
14-High-density polyethylene
15-Life cycle cost
16-Social discount rate

منابع

پناهنده، محمد، عابدین‌زاده، نیلوفر، روانبخش، مکرم. (۱۳۸۹). ارزیابی اثرات زیست محیطی کارخانه کمپوست شهر یزد. علوم و تکنولوژی محیط زیست، ۱۲(۳)، ۸۷-۱۰۰.

حاجی بابایی، محسن، نظیف، سارا، واحدی زاده، سجاد. (۱۳۹۵). مقایسه اثرات زیست‌محیطی ناشی از ساخت و اجرای انواع لوله‌های شبکه توزیع آب با استفاده از روش ارزیابی چرخه حیات. علوم و مهندسی آب و فاضلاب، ۱(۱)، ۳۷-۴۸. doi: 10.22112/jwwse.2017.51057

مرادی، محراب، ساداتی پور، سیدمحمدتقی، شریفلو، ناصرمنصور، و زعیم‌دار، مژگان. (۱۳۸۹). بررسی اثرات زیست‌محیطی سد پلرود و ارائه راهکارهای کاهنده جهت کاهش اثرات. پژوهش های علوم و فنون دریایی، ۵(۲)، ۲۳-۳۲.

میرابی، مریم، بنی‌اسدی، حسن، سرگزی، حامد. (۱۳۹۶). ارزیابی زیست‌محیطی گزینه‌های تصفیه لجن فاضلاب: هاضم بی‌هوازی و روش‌های گرمایی، چهارمین کنفرانس بین‌المللی برنامه‌ریزی و مدیریت محیط زیست، تهران.

Ambrose, M., Burn, S., DeSilva, D., & Rahilly, M. (2008). Life cycle analysis of water networks. In Plastics Pipe XIV: Plastics Pipes Conferences Association. Budapest, Hungary.

Barjoveanu, G., Comandaru, I. M., Rodriguez-Garcia,

Herstein, L. M., & Filion, Y. R. (2011). Life-cycle assessment of common water main materials in water distribution networks. Journal of Hydroinformatics, 13(3), 346-357. https://doi.org/10.2166/hydro.2010.127

Jocanovic, M., Agarski, B., Karanovic, V., Orosnjak, M., Ilic Micunovic, M., Ostojic, G., & Stankovski, S. (2019). LCA/LCC model for evaluation of pump units in water distribution systems. Symmetry, 11(9), 1181. https://doi.org/10.3390/sym11091181

Klöpffer, W., & Curran, M. (2014). Background and Future Prospects in Life Cycle Assessment. LCA Compendium – The Complete World of Life Cycle Assessment. Springer Dordrecht. New York, United States. https://doi.org/10.1007/978-94-017-8697-3_1

Racoviceanu, A. I., Karney, B. W., Kennedy, C. A., & Colombo, A. F. (2007). Life-cycle energy use and greenhouse gas emissions inventory for water treatment systems. Journal of infrastructure systems, 13(4), 261-270. https://doi.org/10.1061/(ASCE)1076-0342(2007)13:4(261)

Rodriguez-Garcia, G., Hospido, A., & Teodosiu, C. (2014). Evaluation of water services system through LCA. A case study for Iasi City, Romania. The International Journal of Life Cycle Assessment, 19, 449-462. https://doi.org/10.1007/s11367-013-0635-8

Sheefa, D. E., Handler, R. M., & Barkdoll, B. D. (2022). Eco-efficiency analysis of water distribution system flushing into a containment Pond. Journal of Environmental Management, 321, 115987. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115987

Tanji, H., Yoshida, K., & Soumura, H. (2003). Issues of life cycle assessment for irrigation, IWMI Books. Reports H033366. International Water Management Institute. Colombo, Sri Lanka.

Xue, Z., Liu, H., Zhang, Q., Wang, J., Fan, J., & Zhou, X. (2019). The impact assessment of campus buildings based on a life cycle assessment–life cycle cost integrated model. Sustainability, 12(1), 294. https://doi.org/10.3390/su12010294

G., Hospido, A., & Teodosiu, C. (2014). Evaluation of water services system through LCA. A case study for Iasi City, Romania. The International Journal of Life Cycle Assessment, 19, 449-462. https://doi.org/10.1007/s11367-013-0635-8

Baumann, H., & Tillman, A. M. (2004). The hitch hiker's guide to LCA. Studentlitteratur. Lund, Sweden. DOI: http://dx.doi.org/10.1065/lca2006.02.008

Du, F., Woods, G. J., Kang, D., Lansey, K. E., & Arnold, R. G. (2013). Life cycle analysis for water and wastewater pipe materials. Journal of Environmental Engineering, 139(5), 703-711. https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000638

Friedrich, E., Pillay, S., & Buckley, C. A. (2009). Environmental life cycle assessments for water treatment processes–A South African case study of an urban water cycle. Water Sa, 35(1). DOI: 10.4314/wsa.v35i1.76710

Guinee, J. B., Heijungs, R., Huppes, G., Zamagni, A., Masoni, P., Buonamici, R., ... & Rydberg, T. (2011). Life cycle assessment: past, present, and future. https://doi.org/10.1021/es101316v

Hajibabaei, M., Hesarkazzazi, S., Lima, M., Gschösser, F., & Sitzenfrei, R. (2020). Environmental assessment of construction and renovation of water distribution networks considering uncertainty analysis. Urban Water Journal, 17(8), 723-734. https://doi.org/https://doi.org/10.1080/1573062X.2020.1783326

- Hasegawa, K., Arai, Y., Koizumi, A., & Inakazu, T. (2016). Life cycle assessment of a water distribution system in a context of depopulation. In Conference: IWA World Water Congress an Australiand Exhibition 2016. Brisbane, Queensland, Australian.

Hauschild, M. Z., Rosenbaum, R. K., & Olsen, S. I. (2018). Life Cycle Assessment, Theory and Practice. Springer Cham. Berlin, Germany. https://doi.org/10.1007/978-3-319-56475-3

Hendrickson, T. P., & Horvath, A. (2014). A perspective on cost-effectiveness of greenhouse gas reduction solutions in water distribution systems. Environmental Research Letters, 9(2), 024017. DOI 10.1088/1748-9326/9/2/024017