2023, Vol.10, No.1, Pages 67 to 76
Journal of Water and Sustainable Development

سال دهم، شماره ۱، ۱۴۰۲، صفحات ۶۷ تا ۷۶
نشریه آب و توسعه پایدار

Article Type: Technical paper

نوع مقاله: فنی و ترویجی

Application of Life Cycle Assessment on Water and Environment

H. Shafaei[1], K. Esmaili[2*]

1,2- Ph.D. Candidate and Associate Professor, Department of Water Science and Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

*(Corresponding Author Email: esmaili@um.ac.ir)

Received: 17-11-2022 Revised: 29-01-2023
Accepted: 12-04-2023 Available Online: 20-06-2023

کاربرد ارزیابی چرخه عمر بر آب و محیط‌زیست

حسنا شفائی[۱]، کاظم اسماعیلی[۲*]

۱و۲- به ترتیب دانشجوی دکترا و دانشیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

*(نویسنده مسئول، E-Mail: esmaili@um.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۲۶ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۱/۰۹
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۱/۲۳ تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۳/۳۱

Abstract

One of the goals of life cycle assessment is environmental decision-making regarding cleanup of contaminated sites, contaminated water, and water restoration with different methods. Water shortage problems are becoming more serious due to the decrease in rainfall, increase in population, the reduction of water resources and lack of legal framework for water management. Therefore, a proper analysis of the effects and results of the methods used for water purification, groundwater polluting factors, and various water supply processes is necessary, and one of the tools that can perform such an analysis is life cycle assessment. (LCA) is based on a complete understanding of the system from real data. In this research, the analysis of life cycle assessment of wastewater treatment processes, desalination, water footprint has been done considering different water sources. The results of this analysis showed that the most studied topic in the evaluation of the life cycle of wastewater treatment and the most studied type of wastewater was urban wastewater. The least studied subject was river engineering. Among different countries, Iran's share of life cycle assessment studies on water management is the lowest, and due to the importance of life cycle assessment and the environmental impact of various methods and processes on the supply of water needed in the agricultural, drinking and industrial sectors, attention is paid and it requires more studies in this field.

Keywords: Sustainable Development, Modeling, Water Footprint, Wastewater Treatment.

چکیده

یکی از اهداف ارزیابی چرخه عمر، تصمیم‌گیری محیط‌زیستی در مورد پاک‌سازی محل‌های آلوده، آب‌های آلوده و احیای آب با روش‌های مختلف است. مشکلات کمبود آب به دلیل کاهش بارندگی، افزایش جمعیت، کاهش منابع آب و عدم وجود چارچوب قانونی برای مدیریت آب جدی‌تر می‌شود. بنابراین، تجزیه و تحلیل مناسب آثار و نتایج روش‌های مورد استفاده جهت تصفیه آب، عوامل آلوده‌کننده آب‌های زیرزمینی و فرآیندهای مختلف تأمین آب مورد نیاز، لازم بوده و یکی از ابزارهایی که می‌تواند چنین تحلیلی را انجام دهد، ارزیابی چرخه عمر (LCA) است که براساس درک کامل سیستم از داده‌های واقعی به‌دست آمده است. در این پژوهش به تحلیل ارزیابی چرخه عمر بر فرآیندهای تصفیه فاضلاب، نمک‌زدایی و ردپای آب با در نظر گرفتن منابع آبی مختلف پرداخته شده است. نتایج این تحلیل نشان داد بیشترین موضوع مورد بررسی در ارزیابی چرخه عمر تصفیه فاضلاب و بیشترین نوع فاضلاب مورد مطالعه فاضلاب شهری بوده است. کمترین موضوع مورد بررسی مهندسی رودخانه بود. در بین کشورهای مختلف سهم ایران از مطالعات ارزیابی چرخه عمر بر مدیریت آب، کمترین تعداد بوده و باتوجه‌به اهمیت موضوع ارزیابی چرخه عمر و تأثیر محیط‌زیستی روش‌ها و فرآیندهای مختلف بر تأمین آب مورد نیاز در بخش‌های کشاورزی، شرب و صنعت توجه و انجام بیشتر مطالعات در این زمینه را می‌طلبد.

واژه‌های کلیدی: توسعه پایدار، مدل‌سازی، ردپای آب، تصفیه فاضلاب.

HomePage: https://jwsd.um.ac.ir
How to cite this article: Shafaei H. and Esmaili K. 2023. Application of Life Cycle Assessment on Water and Environment. Journal of Water and Sustainable Development, 10(1): 67-76. doi: http://dx.doi.org/10.22067/jwsd.v10i1.2211-1189

مقدمه

ارزیابی اثرات محیط‌زیستی[1] (EIA) یک ابزار پشتیبانی تصمیم‌گیری محیط‌زیستی است و هدف از آن تعیین اثرات بالقوه محیط‌زیستی، اجتماعی و بهداشتی حاصل از یک اقدام توسعه‌ای پیشنهادی است. ارزیابی اثرات محیط‌زیست به توسعه‌دهندگان و مجریان پروژه کمک می‌کند قبل از تصمیم‌گیری، از پیامدهای احتمالی تصمیمات خود مطلع شوند. به‌عبارت‌دیگر هدف آن تسهیل تصمیم‌گیری آگاهانه، شفاف و در عین حال تلاش برای جلوگیری و کاهش اثرات نامطلوب بالقوه از طریق در نظر گرفتن گزینه‌ها، مکان‌ها یا فرآیندهای جایگزین است (Wood، ۲۰۰۲). ارزیابی اثرات محیط‌زیستی را در یک تعریف مختصرتر می‌توان "رویکردی در جهت توسعه، به واسطه ارزیابی قبلی" بیان نمود. تاریخچه ارزیابی و اهمیت قانونی آن به اواخر دهه ۱۹۶۰میلادی باز می‌گردد. در این سال‌ها دولت ایالات متحده آمریکا ارزیابی را به‌عنوان مجوز اجرای پروژه‌های عمرانی پذیرفت و سازمان‌ها و مؤسسات موظف شدند قبل از اجرای هر پروژه اثرات محیط‌زیستی آن را بـــررسی نمایند. براین‌اساس چنانچه پروژه‌ای دارای احتمال پدید آوردن اثرات سوء بر محیط‌زیست باشد، ناگزیر به تهیه گزارش اثرات محیط‌زیستی می‌باشد. پس از تصویب این قانون در آمریکا و بعد در کنفرانس استکهلم سال ۱۹۷۲، کشورهای مختلف جهان بنا به قوانین و ارزش‌های اجتماعی خویش قوانین مشابهی را مورد تصویب قرار دادند که به تدریج در طی زمان تکمیل و گسترده‌تر شد. در ایران ارزیابی اثرات محیط‌زیستی درعین‌حال که موضوع و مفهوم جدیدی است ولی به لحاظ سابقه تاریخی می‌توان نشانه‌ها و احکامی را با عناوین دیگر و به شکل ساده‌تر در قوانین و مقررات محیط‌زیست قبلی جستجو نمود. در قوانین سابق کشور، اصطلاح متداولی تحت عنوان ارزیابی اثرات محیط‌زیست (EIA) وجود نداشت و حتی انجام مراحل ارزیابی نیز در شکل و مفهوم حاضر در مقررات قانونی گذشته پیش‌بینی نشده بود. برای نخستین بار در سال ۱۳۵۴ در آیین‌نامه جلوگیری از آلودگی هوا مصوب ۵۴/۴/۲۹ کمیسیون‌های مجلسین وقت، صدور پروانه تأسیس هر نوع کارخانه یا کارگاه و توسعه آنها موکول به رعایت مقررات و ضوابط حفاظت و بهسازی محیط‌زیست شده بود.

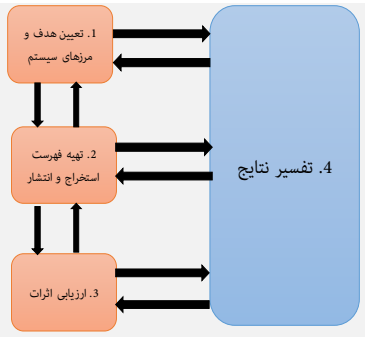
اهداف و ضرورت تحقیق

هدف از انجام این پژوهش مطالعه کاربرد و جایگاه ارزیابی چرخه عمر در مباحث مختلف ازجمله علوم و مهندسی آب در ایران و سایر کشورهای جهان و افزایش آگاهی و دانش مورد نیاز برای حل مسائل و چالش‌های موجود در حوزه آب و محیط‌زیست است.

ارزیابی چرخه عمر(LCA)

ارزیابی چرخه عمر[2] روشی است که هدف آن کمی کردن اثرات بالقوه محیط‌زیستی ناشی از فعالیت‌های انسانی در طیف وسیعی از مسائل محیط‌زیستی (تغییراقلیم، اثرات تنفسی انسان، کاربری زمین و غیره) در کل چرخه عمر یک محصول است. دو دهه ۱۹۷۰-۱۹۹۰، دهه‌های مفهوم ارزیابی چرخه عمر با رویکردها، اصطلاحات و نتایج بسیار متفاوت بود. در این دوره کمبود واضحی از بحث علمی بین‌المللی و بسترهای تبادل برای ارزیابی چرخه عمر وجود داشت. در سال ۲۰۰۲، برنامه محیط‌زیست سازمان ملل متحد[3] (UNEP) و انجمن سم شناسی و شیمی محیطی[4] (SETAC)یک مشارکت بین‌المللی چرخه عمر را راه‌اندازی کردند که به‌عنوان ابتکار چرخه عمر شناخته می‌شود. در دوره ۲۰۰۰-۲۰۱۰ تقاضا برای ارزیابی چرخه عمر افزایش یافت. دهه ۲۰۱۰-۲۰۲۰ دهه تحلیل پایداری چرخه عمر[5] (LCSA) است. مفهوم انجام بررسی دقیق از چرخه عمر یک محصول یا فرآیند، مفهومی جدید است که در پاسخ به افزایش آگاهی محیط‌زیستی از سوی عموم مردم، صنعت و دولت‌ها پدیدار شده است. روش ارزیابی چرخه عمر ساختاری ثابت دارد و براساس استانداردهای بین‌المللی (ISO 14040) اجرا می‌شود. استاندارد ISO14040 به‌عنوان "تدوین و ارزیابی از ورودی تا خروجی و بررسی توانایی اثرات محیط‌زیستی از یک سیستم تولید در سراسر چرخه عمر"تعریف شد. هدف اصلی نوآوری چرخه عمر، عملی‌سازی تفکر چرخه عمر و بهبود ابزارهای حمایت‌کننده به واسطه داده‌ها و شاخص‌ها است. با بازبینی چهار استاندارد ایزو موجود، کمیته فنی ایزو در سال ۲۰۰۶ با ارائه دو استاندارد ایزو ۱۴۰۴۰ (۲۰۰۶) و ایزو ۱۴۰۴۴ (۲۰۰۶) به جمع‌بندی رسید. مقایسه بین محصولات با استفاده از مطالعه ارزیابی چرخه عمر شامل چهار مرحله است (شکل ۱):

- مرحله ۱: هدف تعیین این است که چگونه بخشی از چرخه عمر محصول، در ارزیابی قرار گرفته می‌شود و ارزیابی با چه هدفی انجام می‌شود. معیارهای مربوط به مقایسه سیستم و زمان‌های خاص در این مرحله توضیح داده شده است.
- مرحله ۲: در این مرحله، تجزیه و تحلیل، توصیفی از جریان مواد و انرژی در سیستم محصول و به‌ویژه تعامل آن با محیط، مواد خام مصرفی و انتشار به محیط را ارائه می‌دهد. تمام فرآیندهای مهم و جریان‌های انرژی و مواد فرعی در مرحله بعد توضیح داده می‌شود.
- مرحله ۳: جزئیات تجزیه و تحلیل برای ارزیابی تأثیر استفاده می‌شود. نتایج نشانگر همه دسته‌های تأثیر، در این مرحله به تفصیل آمده است. اهمیت هر دسته تأثیر با نرمال‌سازی و در نهایت با وزن دهی ارزیابی می‌شود.
- مرحله ۴: تفسیر چرخه عمر شامل بررسی انتقادی، تعیین حساسیت داده‌ها و ارائه نتایج است.

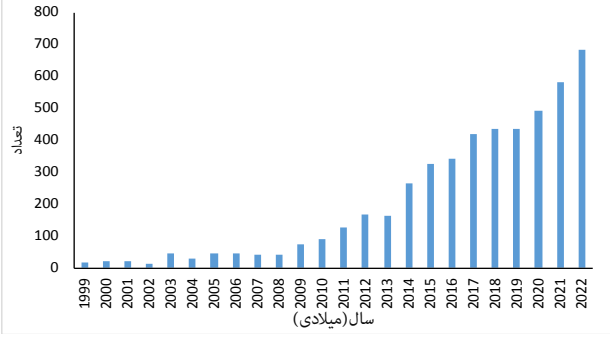


شکل ۱-مراحل ارزیابی چرخه عمر

انواع ارزیابی چرخه عمر به این شرح است:

- **گهواره تا گور**[۱۰]: ارزیابی کامل چرخه عمر از ساخت (گهواره) تا مرحله استفاده است. تمام نهادها، ورودی‌ها و خروجی‌ها برای تمام مراحل چرخه عمر در نظر گرفته می‌شوند.
- **گهواره تا ورودی**[۱۱]: شامل ارزیابی چرخه عمر جزئی محصول از استخراج منبع (گهواره) تا ورودی کارخانه (پیش از جابجایی به مصرف‌کننده) می‌باشد. مرحله کاربرد و مرحله دور ریز محصول، در این مورد حذف شده است.
- **گهواره تا گهواره**[۱۲]: نوعی ارزیابی از گهواره تا گور است که در آن مرحله پایان عمر محصول، فرآیند بازیافت است. از فرآیند بازیافت محصولات جدید و یکسان (مانند قوطی‌های آلومینیومی نوشیدنی از قوطی‌های بازیافتی)، یا محصولات مختلف (مانند عایق پشم شیشه از بطری‌های شیشه‌ای جمع‌آوری‌شده) منشأ می‌گیرد.
- **ورودی تا ورودی**[۱۳]: ارزیابی چرخه عمرجزئی می‌باشد که تنها به فرایند ارزش افزوده در کل زنجیره تولید، توجه می‌کند. واحد ورودی به ورودی را می‌توان در زنجیره تولید مناسب برای ایجاد یک ارزیابی گهواره تا ورودی کامل تلفیق نمود.
- **چاه تا چرخ**[۱۴]: به‌عنوان یک ارزیابی چرخه عمر ویژه مطرح است که از آن برای جابه‌جایی سوخت و وسایل نقلیه استفاده می‌شود. این آنالیز اغلب تحت عنوان چاه تا ایستگاه یا چاه تا مخزن و همچنین ایستگاه تا چرخ یا مخزن تا چرخ یا ورودی به چرخ طبقه‌بندی می‌شود.
- **ارزیابی چرخه عمر ورودی- خروجی اقتصادی**[۱۵]: شامل استفاده از داده‌های سطح بخش تلفیقی در این رابطه است که چگونه اغلب تأثیرات محیط‌زیست را می‌توان با هرکدام از بخش‌های اقتصاد، مرتبط ساخت و هرکدام از بخش‌ها، تا چه حد از بخش دیگر تأثیر می‌پذیرند.
- **ارزیابی چرخه عمر بر مبنای دیدگاه‌های اکولوژیکی:** ارزیابی چرخه عمر، موارد زیادی از رویکردها و استراتژی‌های مشابه با یک اکو LCA را شامل می‌شود و در آن محدوده بسیار گسترده‌ای از ارزیابی اکولوژیکی مطرح شده است. همچنین ارزیابی چرخه عمر می‌تواند برای مدیریت خردمندانه فعالیت‌های انسانی با درک تأثیرات مستقیم و غیرمستقیم بر روی منابع اکولوژیکی و همچنین اکوسیستم‌های محیطی به‌کار رود.

کاربرد هر نوع ارزیابی چرخه عمر باتوجه‌به مسئله و موضوع تحقیق، انتخاب و در نظر گرفته می‌شود. با مطالعه تحقیقات انجام شده در حوزه آب و محیط‌زیست نشان داده شد بیشترین نوع مورد استفاده از انواع ارزیابی چرخه عمر، گهواره تا گور می‌باشد. در این پژوهش تحقیقات انجام شده روی ارزیابی چرخه عمر در سال‌های بین ۱۹۹۹ تا ۲۰۲۲ از پایگاه‌های مختلف مانند ساینس دایرکت[۶] و گوگل اسکولار[۷]، پایگاه مجلات تخصصی نور[۸]، پایگاه اشپرینگر[۹] بررسی و مطالعه شد و همانطور که در شکل (۲) نشان داده شده روند صعودی این مطالعات نشان از توجه و اهمیت به موضوع ارزیابی چرخه عمر طی این سال‌ها دارد.



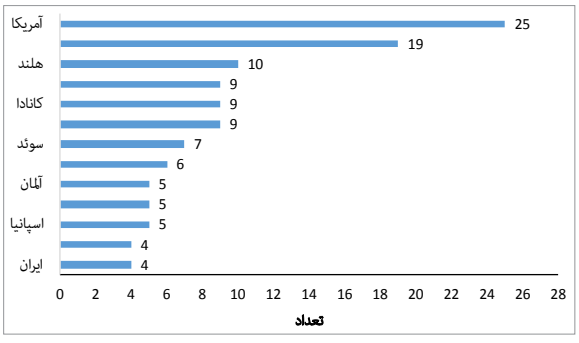
شکل ۲- تعداد مقالات منتشر شده در جهان با بحث ارزیابی چرخه عمر

فراوانی مطالعات انجام شده با استفاده از روش‌های ارزیابی چرخه عمر در موضوعات علمی مختلف در جدول (۱) ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود بیشترین فراوانی کاربرد ارزیابی چرخه عمر با مقدار و درصد به‌ترتیب ۲۹۰۳ و ۳۴/۲۹ درصد برای بحث انرژی انجام شده است. با مطالعه منابع مختلف در داخل کشور نتایج نشان داد از سال ۱۳۸۵ تا ۱۴۰۱ تعداد ۶۷ مقاله کنفرانسی و ۲۲ مقاله علمی پژوهشی با موضوع ارزیابی چرخه عمر در موضوعات مختلف علمی ازجمله تصفیه فاضلاب و محیط‌زیست منتشر شده است. با بررسی مطالعات انجام شده روی کاربرد ارزیابی چرخه عمر در کشورهای مختلف جهان نتایج نشان داد بیشترین مطالعات انجام شده مربوط به کشور آمریکا با ۲۵ مطالعه و کمترین آن برای کشور ایران به‌دست آمد. نتایج به‌دست آمده برای سایر کشورها در شکل (۳) نشان داده شده است.

در واقع ارزیابی چرخه عمر به‌عنوان یکی از روش‌های ارزیابی محیط‌زیست بعد از ارزیابی فنی و ارزیابی اقتصادی، تکمیل‌کننده ضلع سوم یک ارزیابی پایدار است. وابستگی شدید ارزیابی چرخه عمر به داده‌ها باعث شد تا نرم افزارهای ارزیابی چرخه عمر شکل بگیرد. فرآیندهای محیط‌زیستی، اغلب بسیار پیچیده و به هم مرتبط هستند و این موجب می‌شود تا مدل کردن چرخه عمر وابستگی شدیدی به داده داشته باشد.

جدول ۱- فراوانی مطالعات انجام شده روی ارزیابی چرخه عمر در موضوعات مختلف (۱۹۹۹-۲۰۲۲)

موضوع	فراوانی	درصد فراوانی
انرژی	۲۹۰۳	۳۴/۲۹
علوم محیطی	۲۷۸۷	۳۲/۹۲
مهندسی	۹۳۶	۱۱/۰۵
علوم اجتماعی	۴۵۷	۵/۳۹
علم مواد	۳۵۷	۴/۲۱
مهندسی شیمی	۳۳۴	۳/۹۴
علوم کشاورزی و زیستی	۲۸۹	۳/۴۱
علوم زمین	۲۳۰	۲/۷۱
شیمی	۹۸	۱/۱۵
علوم کامپیوتر	۷۵	۰/۸۸
تعداد کل	۸۴۶۶	۱۰۰



شکل ۳- فراوانی مطالعات ارزیابی چرخه عمر در کشورهای مختلف

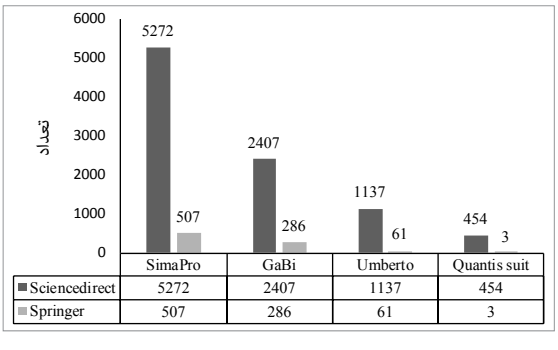
نرم‌افزارهای کاربردی برای ارزیابی چرخه عمر

نرم‌افزارهای مورد استفاده در ارزیابی چرخه عمر همراه با کاربردها، مزایا و معایب آنها در جدول (۲) معرفی شده است.

جدول ۲- معرفی نرم‌افزارهای کاربردی ارزیابی چرخه عمر، مزایا و معایب آنها

نرم‌افزار	سال/کشور ارائه دهنده	کاربرد	پایگاه داده	مزایا/معایب
SimaPro	شرکت پری هلند/۱۹۹۰	نرم‌افزار اقتصادی-برای ارزیابی محیط‌زیست محصولات و فرآیندها	پایگاه داده اکو اینونت (Eco invent) سوییس، پایگاه داده ورودی و خروجی ایالات متحده آمریکا، پایگاه داده ورودی و خروجی دانمارک، داده‌های صنعت، پایگاه داده Bu-wal 250، LCA Food، پایگاه داده ارزیابی چرخه عمر ایالت متحده آمریکا فرانکلین، IDEMAT 200	مزایا: انعطاف‌پذیر و آسان برای استفاده، نسخه چند کاربره، چندین روش ارزیابی تأثیر در دسترس است، حجم زیادی از داده‌ها گنجانده شده است، نتایج بسیار شفاف معایب: قیمت نسبتاً بالا و عدم پشتیبانی از سیستم عامل‌های غیر ویندوز
GaBi	شرکت بین‌المللی آلمانی (Profit Earth)/۱۹۸۹	برای ارزیابی چرخه عمر محصولات لبنی	پایگاه داده اختصاصی Gabi 4500، مجموعه داده دارد. از الگوریتم محاسباتی ترتیبی استفاده می‌کند	مزایا: پایگاه داده فراوانی جهت ایجاد مدل‌های چرخه عمر دارد. معایب: ساختار قیمت‌گذاری غیرشفافی دارد که مقایسه قیمت آن با سایر نرم‌افزارها را مشکل می‌کند
OpenLCA	سال ۲۰۰۶- توسط شرکت Greendelta	برای ارزیابی چرخه عمر (LCA) و ارزیابی پایداری	متن باز	به دلیل متن باز بودن، این نرم‌افزار، به‌طور رایگان و بدون هزینه‌های مجوز در دسترس همگان می‌باشد. برای اررزیابی چرخه حیات اجتماعی، سیاست تولید یکپارچه
Umberto	-	نرم‌افزاری قدرتمند برای مدل‌سازی گرافیکی چرخه عمر یک محصول و محاسبات تأثیرات کربنی آن بر روی محیط‌زیست است، در محاسبه میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای توسط یک محصول در طول چرخه عمر و اندازه‌گیری تمام گازهای گلخانه‌ای کاربرد دارد.	پایگاه داده ecoinvent پایگاه دادهcm. chemicals پایگاه داده estimol این نرم‌افزار از داده‌های نسخه ۲ و ۳ Ecoinvent و داده‌های Gabi بهره می‌گیرد.	مزایا: پشتیبانی بسیار خوبی از مشتریان دارد و محیطی با کاربری آسان دارد که استفاده از آن را جذاب کرده است معایب: عدم پشتیبانی از سیستم عامل‌های غیرویندوز توسط این نرم‌افزار باعث می‌شود تا سایر سیستم عامل‌ها از شبیه سازهایی استفاده کنند که از نظر سرعت و سایر مسائل مشکل آفرین است

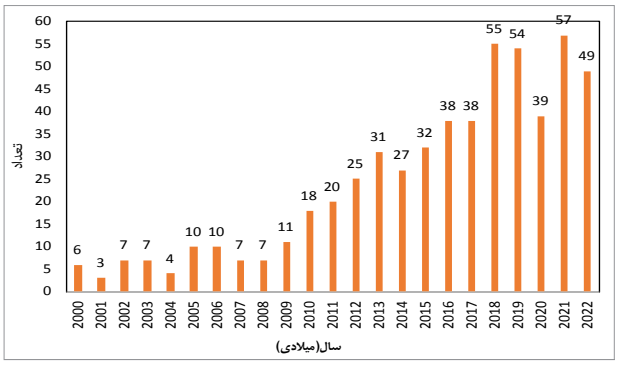
مقایسه‌ای بین نرم‌افزارهای کاربردی در ارزیابی چرخه عمر از نظر تعداد مقالات انجام شده برای سال‌های بین ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲ از طریق دو پایگاه اشپرینگر و ساینس دایرکت در شکل (۴) ارائه شده است. بیشترین تعداد مقالات در هر دو پایگاه مربوط به نرم‌افزار سیماپرو است. ازجمله مزایای نرم‌افزار سیماپرو عبارتند از: ۱) به راحتی چرخه‌های عمر پیچیده را به روشی سیستماتیک و شفاف، مدل‌سازی و تجزیه و تحلیل می‌کند.۲) اثرات محیط‌زیستی محصولات و خدمات خود را در تمام مراحل چرخه عمر اندازه‌گیری می‌کند.۳) نقاط مهم را در هر پیوند زنجیره تامین خود، از استخراج مواد خام گرفته تا تولید، توزیع، استفاده و دفع، شناسایی می‌کند. دکامین و همکاران (۱۳۹۸) ارزیابی چرخه عمر را به‌منظور مقایسه بارهای محیط‌زیستی گیاه زراعی سویا بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که اثرات محیط‌زیستی سویا عمدتا از کودهای شیمیایی، کود دامی، سوخت دیزل و برق برای آبیاری حاصل می‌شود. همچنین در این تحقیق نیز از نرم‌افزار SimaPro استفاده شد. در این تحقیق برای ارزیابی چرخه عمر و ردپای آب تنها عملیات کشاورزی و فرآیندهای مرتبط با آن در نظر گرفته شده است. همچنین نتایج این تحقیق نشان داد در طبقه اثر گرمایش جهانی، تولید برق ۴۴ درصد، تولید بذر به مقدار ۲۱ درصد و مصرف سوخت دیزل ۱۳ درصد بیشترین سهم را در این طبقه اثر از بین عواملی همچون آفت‌کش، قارچ‌کش، حمل و نقل نهاده، کود فسفات، علف‌کش، بذر و کود نیتروژنه به خود اختصاص دادند.



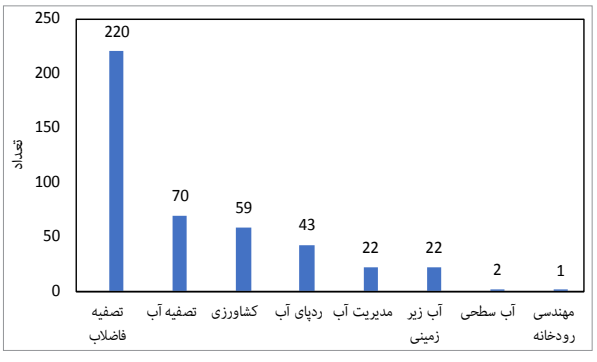
شکل ۴- تعداد مقالات برای هر یک از نرم‌افزارهای کاربردی در ارزیابی چرخه عمر

کاربرد ارزیابی چرخه عمر در حوزه آب و محیط‌زیست

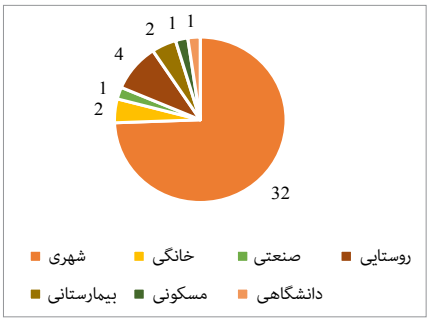
در حال حاضر تحقیقات فراوانی در مورد کمبود آب و مدل‌سازی ارزیابی تأثیر چرخه عمر این منبع، همراه با اثرات سلامتی و آسیب اکوسیستم مرتبط با کمبود آب وجود دارد. برخی از مقوله‌های تأثیر پیشنهادی در این روش‌ها شامل کفایت آب برای کاربران مختلف، کیفیت اکوسیستم، مصرف منابع و سلامت انسان است. همچنین اثرات محیط‌زیستی با شناسایی و کمی‌سازی انرژی و مواد مصرف‌شده و ضایعات رها شده به محیط در طول کل چرخه عمر ارزیابی می‌شود. آب شیرین به‌عنوان یک منبع، کارکردهای اساسی برای انسان و محیط‌زیست فراهم می‌کند. با استفاده از ارزیابی چرخه عمر اهمیت جهانی و منطقه‌ای منابع آب شیرین و دسترسی محدود آنها در سطح جهانی بهتر تشخیص داده شد (Stewart و Jolliet، ۲۰۰۴) و نیاز به ارزیابی مصرف منابع آب ناشی از تأثیرات اقتصادی، جمعیتی و تغییرات آب و هوایی را به وضوح بیان کرد (Jolliet و همکاران، ۲۰۰۳). تا به امروز هیچ استاندارد پذیرفته شده‌ای برای گزارش مصرف آب در ارزیابی چرخه عمر وجود ندارد (Koehler، ۲۰۰۸). رویکردهای چرخه عمر با ارائه اطلاعات بهتر باعث می‌شود تا این برنامه به‌عنوان استراتژی‌های ملی و بین‌المللی برای توسعه پایدار در نظر گرفته شود. شکل (۵) فراوانی تحقیقات انجام شده در حوزه آب را برای سال‌های بین ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲ نشان می‌دهد. نمودار ستونی هر یک از سال‌های مختلف نشان از توجه و توسعه ارزیابی چرخه عمر در این علم دارد. با بررسی تعداد پژوهش‌های انجام شده روی ارزیابی چرخه عمر و موضوعات مختلف مانند تصفیه فاضلاب و ... بین سال‌های ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۲، شکل (۶) نشان می‌دهد بیشتر مطالعات انجام شده بر موضوع تصفیه فاضلاب (۲۲۰ مقاله) متمرکز بود و کمترین درصد مطالعات انجام شده مربوط به مهندسی رودخانه است. در جدول (۳) تحقیقات انجام شده در موضوعات مختلف حوزه آب و ارزیابی چرخه عمر مطالعه شده است. ارزیابی چرخه عمر برای مقایسه فرآیندهای جایگزین تصفیه فاضلاب برای جوامع روستایی و شهری استفاده می‌شود. در کاربرد ارزیابی چرخه عمر در تصفیه فاضلاب نتایج مطالعات نشان داد رایج‌ترین نوع پساب در مقالات بررسی شده، پساب شهری است. از نظر نوع فرآیند به‌کار رفته در تصفیه فاضلاب بیشترین فرآیند مورد استفاده، لجن فعال بیولوژیکی بود (شکل ۷). در فرآیندهای تصفیه فاضلاب با کاربرد ارزیابی چرخه عمر در ابتدا هر یک از فناوری‌های مورد استفاده را در نظر گرفته و فاکتورها و فرآیندهای وابسته به هر فناوری شناسایی می‌شود. بنابراین انتخاب فناوری و شناسایی فاکتورهای مؤثر اولین مرحله است و در مرحله بعد مرز سیستم (مانند تولید مواد خام، ساخت و عملکرد) تعیین می‌شود.



شکل ۵- فراوانی مقالات بررسی ارزیابی چرخه عمر در حوزه علوم و مهندسی آب در سال‌های مختلف (۲۰۰۰-۲۰۲۲)

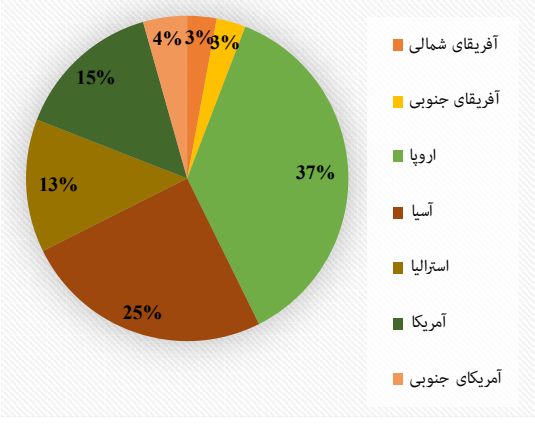


شکل ۶- تعداد مقالات ارزیابی چرخه عمر منتشر شده در بخش آب و عمران بین سال‌های ۱۹۹۹-۲۰۲۲



شکل ۷- فراوانی انواع فاضلاب مورد مطالعه در ارزیابی چرخه عمر تصفیه فاضلاب

یکی دیگر از مطالعات مهم انجام شده در حوزه آب و محیط‌زیست با استفاده از روش ارزیابی چرخه عمر، مطالعه نمک‌زدایی آب (آب‌زیرزمینی، دریا و ...) است. شکل (۸) توزیع جغرافیایی مطالعات ارزیابی چرخه عمر بر روی فناوری نمک‌زدایی را نشان می‌دهد. بیشتر مطالعات ارزیابی چرخه عمر در اسپانیا (۱۷ مطالعه) انجام شد. کشور اسپانیا به دلیل اینکه با تنش آبی روبه‌رو است و برخی از مناطق آن از کمبود آب رنج می‌برند، بزرگترین کشور در استفاده از روش نمک‌زدایی است. چندین تأسیسات نمک‌زدایی در این مناطق برای تامین آب آشامیدنی برای مصرف انسان ایجاد شده است. در این بررسی، ۱۲ مطالعه ارزیابی چرخه عمر از این مناطق وجود داشت که به عملکرد فرآیند نمک‌زدایی از نظر جنبه‌های محیط‌زیستی، اقتصادی و اجتماعی پرداختند. برای مدیریت کم آبی باید عوامل مهمی در رابطه با شرایط محلی ازجمله توپوگرافی، منابع مالی، ظرفیت فنی و نهادی و میزان کمبود آب در نظر گرفته شود (Karami، ۲۰۱۵). با در نظر گرفتن ارزیابی چرخه عمر در برنامه توسعه پایدار و سایر روش‌های ارزیابی پایداری به تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کند تا روندهای آینده در فناوری نمک‌زدایی را در چارچوب منطقی پایدار ارائه دهند.



شکل ۸- توزیع جغرافیایی مطالعات ارزیابی چرخه عمر در موضوع فرآیند نمک‌زدایی آب

با افزایش نگرانی‌ها در مورد کاهش منابع طبیعی و تخریب محیط‌زیست مطالعات در مورد فرایندها و روش‌های مختلف تصفیه آب و فاضلاب و نمک‌زدایی، باتوجه‌به پایداری محیط‌زیستی این فرآیندها در حال افزایش است. در کاربرد ارزیابی چرخه عمر، منابع آبی مختلفی مورد توجه محققان قرار گرفته و فرآیندهای مختلفی برای تصفیه این نوع منابع اتخاذ نموده‌اند. مطالعات انجام شده تصفیه فاضلاب و نمک‌زدایی آب بر روی منابع آبی و روش ارزیابی مختلف همراه با هدف و نتایج به‌دست آمده در جدول (۴) ارائه شده است. عوامل مختلفی در این مطالعات ازجمله نوع فرآیند، مصرف انرژی، تأسیسات به‌کار رفته در نظر گرفته شده است. Christensen و همکاران (۲۰۰۷) یک دسته اثر جدید "منابع آب‌زیرزمینی ناسالم" را در مدل LCA خود با عنوان ارزیابی محیط‌زیستی سیستم‌ها و فناوری‌های زباله جامد معرفی کردند تا اثر آلودگی غیرسمی نمک‌های شسته شده از محل‌های دفن زباله و پسماندهای مورد استفاده در ساخت‌وساز را در نظر بگیرند. فاکتورهای مشخصه مربوطه برای هر نمک محاسبه شد. آنها حجم آب زیرزمینی را که به دلیل آلودگی نمکی به‌ازای واحد جرمی نمک وارد آب‌زیرزمینی شده و در نتیجه برای آب آشامیدنی نامناسب است، بیان کردند. Hellweg و همکاران (۲۰۰۵) روشی را برای در نظر گرفتن لایه‌های عمیق خاک و آب‌های زیرزمینی برای شستشوی فلزات سنگین از محل‌های دفن زباله ارائه کردند. آنها محیط زیرسطحی را به سه بخش فرعی تقسیم کردند: خاک فوقانی، خاک عمیق و آب زیرزمینی و یک مدل وابسته به مکان را تنظیم کردند که زمان انتقال به آب‌های زیرزمینی را تابعی از نرخ نفوذ، جریان منافذ درشت و pH توصیف می‌کند. کاربرد ارزیابی چرخه عمر به منابع آب، تصفیه آب و فاضلاب و روش‌های مورد استفاده، نمک‌زدایی و ... خلاصه نمی‌شود. مطالعه ارزیابی چرخه عمر حتی در بحث تأسیسات تصفیه‌خانه‌ها و تجهیزات مورد استفاده برای احیای آب بررسی شده است. نمونه‌ای از این مطالعات در جدول (۵) آمده است.

جدول ۳- مطالعات انجام شده با روش‌های مختلف ارزیابی چرخه عمر در حوزه مدیریت آب

محقق	موقعیت مکانی	مرز سیستم	موضوع تحقیق	روش ارزیابی
Karami، (۲۰۱۵)	ایران	گهواره تا ورودی	نمک‌زدایی آب کشاورزی برای زمین با محصول گوجه فرنگی	SimaPro 7
Cherif و همکاران (۲۰۱۶)	تونس	گهواره تا ورودی	پمپاژ آب و نمک‌زدایی با استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر	GT PRO
Shahabi و همکاران (۲۰۱۷)	استرالیا	گهواره تا ورودی	نمک‌زدایی آب دریا	CML 2001
Opher و همکاران (۲۰۱۸)	برزیل	گهواره تا گهواره	بازچرخانی آب شهری	SimaPro v8.1
Ronquim و همکاران (۲۰۱۹)	برزیل	گهواره تا ورودی	تصفیه فاضلاب	GaBi, CML 2001
Al-Kaabi و Mackey (۲۰۱۹)	قطر	گهواره تا ورودی	نمک‌زدایی آب دریا به روش اسمز معکوس	GaBi

جدول ۴- کاربرد ارزیابی چرخه عمر در مطالعات تصفیه فاضلاب و نمک‌زدایی آب

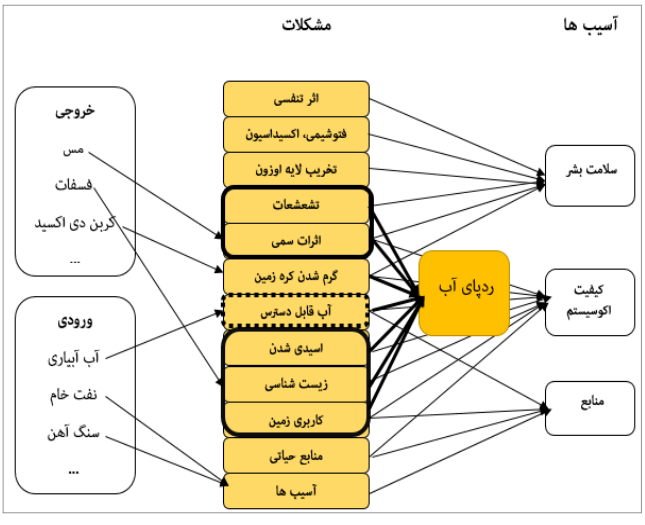
محقق	منبع آب	روش/نرم افزار LCA	اهداف و نتایج مطالعه
Sombekke و همکاران (۱۹۹۷)	آب‌زیرزمینی	LCAqua (بر مبنای SimaPro) Ecoindicator99	مقایسه مراحل تصفیه فاضلاب (شفاف‌سازی، فیلتراسیون، گندزدایی و جذب) بیشترین عامل تأثیرگذار روی هر یک از فرآیندها مصرف برق بود.
Mohapatra (۲۰۰۲)	آب‌زیرزمینی	Ecoindicator99 LCAqua (بر مبنای SimaPro)	مقایسه دو تصفیه‌خانه یکی با استفاده از روش‌های مرسوم و دیگری با اعمال روش دو مرحله RO. این دو نیروگاه اثرات مشابهی را به‌دست آورده‌اند، همچنین مصرف برق مهمترین جنبه محیط‌زیستی در هر دو تصفیه‌خانه بود.
Beavis و Lundie (۲۰۰۳)	-	CML Gabi	مقایسه جایگزین‌های ضد عفونی کننده در تصفیه فاضلاب
Friedrich و همکاران (۲۰۰۷)	رودخانه	CML Gabi	مقایسه تصفیه‌خانه با روش‌های مرسوم در مقابل تصفیه‌خانه با روش اولترافیلتراسیون.
Vince و همکاران (۲۰۰۸)	آب زیرزمینی/ دریا/آب سطحی	IMPACT2002+ Gabi	مدل‌سازی LCI مراحل تصفیه.
Raluy و همکاران (۲۰۰۴؛ ۲۰۰۵)	دریا/رودخانه	Eco-Indicator99 Eco-Points 97 CML SimaPro	مقایسه فناوری‌های نمک‌زدایی (تقطیر چند مرحله‌ای، تقطیر چند اثر و(RO تأثیر منابع مختلف انرژی (برق و گرما) بر تأثیرات فناوری‌های نمک‌زدایی بررسی شد.
Stokes و Horvath (۲۰۰۶)	رودخانه/ دریا/بارندگی/ آب بازیافتی	EIO-LCA(Economic) Input-Output WEST (Gabi)	تمرکز بر اثرات مصرف انرژی سیستم‌های تامین آب (نمک‌زدایی، انتقال و استفاده مجدد).
Stokes و Horvath (۲۰۰۹)	رودخانه/ دریا/بارندگی/ آب بازیافتی	EIO-LCA (Economic Input-Output) WEST (Gabi)	مطالعه مقایسه گزینه‌های مختلف نمک‌زدایی آب‌های زیرزمینی شور؛ بازیافت فاضلاب برای مصارف شرب
Igos و همکاران (۲۰۱۴)	آب تصفیه شده	+IMPACT۲۰۰۲	مقایسه دو تصفیه‌خانه از نظر زیرساخت نسبت به مراحل تصفیه و سهم زباله تولید شده مانند لجن و اثر آن بر محیط‌زیست. نتایج نشان داد در صورتی‌که المان‌های ساختمان تصفیه‌خانه فقط در طول ۱۵ سال استفاده شوند، تأثیرات زیرساختی می‌تواند بسته به روش ارزش‌گذاری و محل بین ۵ تا ۳۰ درصد افزایش یابد، اما برای یک عمر ۴۵ ساله ساختمان تصفیه‌خانه، اثرات آن به ۱۰ درصد کاهش می‌یابد.
Capa و همکاران (۲۰۲۲)	آب تصفیه شده	CML	بررسی ارزیابی محیط‌زیستی و اقتصادی بر مبنای ارزیابی چرخه عمر در تصفیه فاضلاب صنعتی و آب بازیافتی. نتایج ارزیابی چرخه عمرنشان داد، پتانسیل تخلیه غیرزیستی سوخت فسیلی (۱۴/۱ درصد)، پتانسیل گرمایش جهانی (۹/۶ درصد) پتانسیل اکوسمیت دریایی (۴۳/۹ درصد)، پتانسیل اکسیداسیون فتوشیمیایی (۹/۴ درصد)، پتانسیل اسیدی شدن (۱۶/۹ درصد) مؤثرترین عوامل در روش CML هستند.

جدول ۵- کاربرد ارزیابی چرخه عمر در تحلیل و برنامه‌ریزی تأسیسات آب

موقعیت مطالعه موردی	اهداف مطالعه و نتایج	محقق
ایتالیا	مقایسه اثرات تأسیسات آب	Tarantini و Ferri (۲۰۰۱)
سیدنی، استرالیا	مقایسه و پیش‌بینی پایداری نسبی اجزای تأسیسات آب تحت سناریوهای مختلف	Lundie و همکاران (۲۰۰۴)
بلژیک	تعیین اثرات محیط‌زیستی استفاده از یک متر مکعب آب از ایستگاه پمپاژ به تصفیه‌خانه‌فاضلاب	Lassaux و همکاران (۲۰۰۷)

ارزیابی چرخه عمر و ردپای آب[۱۶]

یکی از مطالعات مهم انجام شده در حوزه آب، ردپای آب است. ردپای آب کسری از تأثیرات مرتبط به استفاده از آب و اثر مقابل آن بر دسترسی به آب، انسان، اکوسیستم و همچنین تأثیرات مستقیم بر منابع آب و مصرف‌کنندگان است. این موارد با استفاده از ارزیابی چرخه عمر (به‌عنوان‌مثال، اوتروپیکاسیون آب شیرین، اسیدی شدن آب شیرین، سمیت انسانی، سمیت محیط‌زیستی) اندازه‌گیری می‌شوند. ردپای آب ممکن است به‌عنوان نتیجه یک ارزیابی مستقل یا به‌عنوان زیرمجموعه‌ای از نتایج یک ارزیابی محیط‌زیستی بزرگتر، مانند LCA ارائه شود. دستورالعمل‌های ارزیابی ردپای آب در سند فعلی ISO 14046 DIS2 (در تاریخ آوریل ۲۰۱۴) تعریف شده است (ISO، ۲۰۰۶). طبق این سند، «ردپای کمبود آب» و «ردپای در دسترس بودن آب» تنها اثرات مربوط به استفاده از آب را ارزیابی می‌کند، درحالی‌که ردپای آب همه اثرات مربوط به آب را ارزیابی می‌کند. ابراهیمی و همکاران (۱۳۹۷) به مطالعه ارزیابی چرخه عمر و ردپای آب در بخش تولید گیاهان زراعی به‌عنوان یکی از منابع مهم در انتشار آلاینده‌های محیط‌زیستی با استفاده از موادی مانند نانوسیلیس و نانوکلات پتاسیم پرداختند. در این تحقیق از نرم‌افزار SimaPro استفاده شد. با ارزیابی چرخه عمر مربوط به ردپای آب نتایج تحقیق آنها نشان داد بیشترین انتشار کربن دی اکسید در دور آبیاری با فواصل دو و چهار روز یکبار به‌دست آمد. اثرات در نظر گرفته شده در ارزیابی تأثیر چرخه عمر شامل تغییرات آب‌وهوایی، تخریب لایه ازن، اوتروفیکاسیون، اسیدی‌شدن، سمیت انسانی (سرطانی و غیر مرتبط با سرطان) با مواد معدنی تنفسی، تشعشعات یونی، سمیت محیط‌زیست، تشکیل ازن فتوشیمیایی، کاربری زمین و کاهش منابع است (شکل ۹). در مورد اثرات تغییر اقلیم و گرمایش زمین، در حال حاضر مطمئن‌ترین راه برای ارزیابی پایداری محیط‌زیست انجام تجزیه و تحلیل چرخه عمر است.



شکل ۹- اثرات در نظر گرفته شده در ارزیابی چرخه عمر از جنبه‌های مختلف آب و محیط‌زیست

عدم قطعیت، که ممکن است نادیده گرفته شود، یکی از عوامل کلیدی موثر بر قابلیت اطمینان نتایج ارزیابی چرخه عمر است. منابع متعدد عدم قطعیت در ارزیابی چرخه عمر به روش‌های مختلفی طبقه‌بندی می‌شوند، مانند عدم قطعیت پارامتر و مدل، انتخاب‌ها، تغییرپذیری مکانی، تغییرپذیری زمانی، تغییرپذیری بین منابع و اشیا و غیره. انواع عدم قطعیت در نتایج ارزیابی چرخه عمر به شرح زیر است (Bedford و Cooke، ۲۰۰۱؛ Bevington و Robinson ۲۰۰۲؛ Funtowiczو Ravetz، ۱۹۹۳؛ Hofstetter، ۲۰۰۰؛ Bedford و Cooke، ۲۰۰۱):

- خطاهای سیستماتیک و خطاهای تصادفی
- عدم قطعیت پارامتر، عدم قطعیت مدل، عدم قطعیت ناشی از انتخاب، تنوع مکانی، تنوع زمانی و تغییرپذیری بین منابع و اشیا
- عدم قطعیت داده، عدم قطعیت مدل و عدم قطعیت کامل
- تنوع آماری، قضاوت ذهنی، عدم دقت زبانی، تنوع، تصادفی ذاتی، اختلاف نظر و تقریب
- نادیده گرفتن فرآیندهای غیرخطی، فقدان داده‌های فرآیند، عدم وجود جزئیات مکانی در مورد انتشار
- عدم تعامل با سایر آلاینده‌ها، عدم مدل‌سازی متابولیت‌ها و هیچ اطلاعاتی در مورد حساسیت محیط دریافت‌کننده وجود ندارد
- عدم وجود اطلاعات در مورد خواص مواد

نتیجه‌گیری

در این مقاله پژوهش‌های انجام شده بر ارزیابی چرخه عمر در حوزه آب و محیط‌زیست در ایران و سایر کشورهای جهان بررسی شد. کاربرد ارزیابی چرخه عمر بر روش‌های مختلف تصفیه فاضلاب، نمک‌زدایی، آب‌زیرزمینی با معرفی نرم‌افزارهای مورد استفاده و

مقایسه نتایج به‌دست آمده ارائه شد. هر پژوهشگر باتوجه‌به هدف، مرحله و مسیر مورد نظر، هر یک از روش‌های ارزیابی چرخه عمر از جمله گهواره تا گور، گهواره تا گهوار و گهواره تا ورودی را به‌کار گرفته است. ازجمله پر کاربردترین نرم‌افزارها برای ارزیابی چرخه عمر، نرم‌افزار SimaPro است که به دلیل داشتن راهنمای قوی برای کاربران و تجزیه تحلیل نقاط ضعف و عدم نیاز به سخت افزار پیشرفته در تصفیه پسماند و سناریوهای بازیافت بسیار مورد توجه است.این دسته از مطالعات ارزیابی چرخه عمر در ایران و در حوزه علوم آب در چند سال اخیر مورد توجه قرار گرفته است و کاربرد آن در فرآیندهای تصفیه فاضلاب سبب انتخاب روش مناسب باتوجه‌به مسائل اقتصادی و محیط‌زیست می‌شود. در میان جایگزین‌های تامین آب، نم¬زدایی بیشترین میزان را داشت. بنابراین، طراحان، دست اندرکاران، مدیران و اپراتورهای آب و برق، ذی‌نفعان آب، و سیاست‌گذاران یا تصمیم گیرندگان باید تلاش‌های لازم را انجام دهند. علاوه‌براین، دانش و آموزش نیز برای به‌کارگیری یک رویه پایدار و معرفی معیارهای عملکرد محیط‌زیستی در فرآیند تصمیم‌گیری مهم هستند و ارزیابی چرخه عمر نشان‌دهنده اولین گام به سوی ارزیابی سیستماتیک و جامع عملکرد محیط‌زیستی در سیستم تامین آب شیرین است.نتایج ارزیابی چرخه عمر به محققان بینش عالی برای نوآوری، باتوجه‌به هدف تحقیق را ارائه می‌دهد. مانند هر روش علمی، همیشه محدودیت‌هایی وجود دارد که باید از آنها آگاه شد. در مورد ارزیابی چرخه عمر، این محدودیت‌ها عبارتند از: ۱) مطالعات مربوط به تولید محصول یا اجرای یک طرح محل وقوع آنها را در نظر نمی‌گیرد، که باید از طریق ارزیابی خطر جداگانه بررسی شود. ۲)کیفیت داده‌های موجود: بدیهی است که این مسئله اعتبار کل ارزیابی چرخه عمر را تعیین می‌کند. قابلیت اطمینان نمرات محیطی به مهارت متخصصان ارزیابی چرخه عمر به‌کار گرفته شده بستگی دارد. تصمیمات سرمایه‌گذاری به دلیل مدت زمانی که ارزیابی چرخه عمر طول می‌کشد به تعویق می‌افتد. برای غلبه بر این محدودیت‌ها، هماهنگ‌سازی مطالعات ارزیابی چرخه عمر با دستورالعمل‌های عمومی پذیرفته شده، تغییرات در مطالعات ارزیابی چرخه عمر را کاهش می‌دهد.

پی‌نوشت

1-EIA: Environmental Impact Assessment
2-LCA: Life Cycle Assessment
3-UNEP: United Nations Environment Program
4-SETAC: Society for Environmental Toxicology and Chemistry
5-LCSA: Life Cycle Sustainability Analysis
6-WWW.Sciencedirect.com
7-Google scholar.com
8-WWW.noormags.ir
9-WWW.Springer.com
10-Cradle to grave
11-Cradle to gate
12-Cradle to cradle
13-Gate to gate
14-Well to wheel
15-Life cycle cost analysis
16-Water Footprint

منابع

دکامین، م.، برمکی، م.، کانونی، ا. و موسوی مشکینی، س. م. ۱۳۹۸. ارزیابی اثرات محیط زیستی و ردپای آب گیاه زراعی سویا در مزارع اردبیل. فصلنامه علوم و تکنولوژی محیط زیست، ۲۱(۸): ۱۷۵-۱۸۴. 10.22034/jest.2020.21113.3011

ابراهیمی، م.، دستان، س. و یدی، ر. ۱۳۹۷. ارزیابی چرخه حیات ردپای اکولوژیک آب در تولید گندم تحت اثر رژیم های آبیاری با کاربرد نانوسیلیس و نانو کلات پتاسیم در منطقه بوشهر. نشریه علمی تولید گیاهان زراعی، ۱۱(۴): ۷۱-۸۸.

Al-Kaabi A.H. and Mackey H.R. 2019. Environmental assessment of intake alternatives for seawater reverse osmosis in the Arabian Gulf. Journal of Environmental Management, Vol.242: 22-30. doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.04.051

Beavis P. and Lundie S. 2003. Integrated Environmental Assessment of Tertiary and Residuals Treatment–LCA in the Wastewater Industry. Journal of Water Science Technology., 47(7): 109–116. DOI:10.2166/wst.2003.0678

Bedford T. and Cooke R. 2001. Probabilistic Risk Analysis: Foundations and Methods. Cambridge University Press: Cambridge. 1st ed. Cambridge, United Kingdom.

Bevington P. and Robinson D.K. 2002. Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences. McGraw-Hill Education. 3rd Edition. Boston, MA, USA.

Çapa S., Özdemir A., Günkaya Z., Özkan A. and Banar M. 2022. Environmental and economic assessment based on life cycle approaches for industrial wastewater treatment and water recovery. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.103002

Cherif H., Champenois G. and Belhadj J. 2016. Environmental life cycle analysis of a water pumping and desalination process powered by intermittent renewable energy sources. Renewable and Sustainable Energy Reviews 59: 1504e1513. doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.094.

Christensen TH., Bhander G., Lindvall H., Larsen AW., Fruergaard T., Damgaard A., Manfredi S., Boldrin A., Riber C. and Hauschild M. 2007. Experience with the

Motoshita M. Itsubo N. and Inaba A. 2008. Development of impact assessment method on health damages of undernourishment related to agricultural water scarcity. In Proceedings of the Eighth International Conference on EcoBalance.Tokyo, Japan.

Opher T., Friedler E. and Shapira A. 2018. Comparative life cycle sustainability assessment of urban water reuse at various centralization scales. International Journal Life Cycle Assess, 24: 1319e1332. 10.1007/s11367-018-1469-1

Raluy R.G., Serra L., Uche J. and Valero A. 2004. Life Cycle Assessment of Desalination Technologies Integrated with Energy Production Systems. Desalination, 167: 445–458. doi.org/10.1016/j.desal.2004.06.160

Raluy R.G., Serra L. and Uche J. 2005. Life Cycle Assessment of Desalination Technologies Integrated with Renewable Energies. Desalination, 183: 81–93.

Ronquim F.M., Sakamoto H.M., Mierzwa J.C., Kulay L., Seckler M.M. 2019. Ecoefficiency analysis of desalination by precipitation integrated with reverse. osmosis for zero liquid discharge in oil refineries. Clean. Prod, 250: 119547. doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119547

Shahabi M.P., Mchugh A., Anda M. and Ho G. 2017. A framework for planning sustainable seawater desalination water supply. Sci. Total Environ, 575: 826-835. 10.1016/j.scitotenv.2016.09.136

Stewart M. and Jolliet O.2004. User needs analysis and development of priorities for life cycle impact assessment. International. Journal LCA, 9: 153–160. doi.org/10.1007/BF02994189

Stokes J. and Horvath A. 2006. Life Cycle Energy Assessment of Alternative Water Supply Systems. International Journal L.C.A, 11 (5): 335 – 343.

Stokes J. and Horvath A. 2009. Energy and Air Emission Effects of Water Supply. Environ. Sci. Technol., 43: 2680–2687. 10.1021/es801802h

Tarantini M. and Federica F. 2001. LCA of Drinking and Wastewater Treatment Systems of Bologna City. Final results, in IRCEW Conference. Fortaleza, Brazil.

Vince F., Aoustin E., Bréant P., Marechal F. 2008. LCA tool for the environmental evaluation of potable water production. Desalination, 220(1-3): 37-56. https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.01.021

WOOD C. 2002. Environmental Impact Assessment: a Comparative Review. 2nd edition. Prentice Hall. Harlow, England.

use of LCA-modelling (EASEWASTE) in waste management. Journal of Waste Management Research, 25: 257–262. 10.1177/0734242X07079184

Friedrich E., Pillay S., Buckley C.A. 2007. The Use of LCA in the Water Industry and the Case for an Environmental Performance Indicator. Water SA, 33(4): 443–451. 10.4314/wsa.v33i4.52938

Funtowicz, S.O. and Ravetz, J.R. 1993. Science for the Post-Normal Age. Futures, 25: 739–755.

Hellweg S., Fischer U., Hofstetter TB. and Hungerbuhler K. 2005. Site-dependent fate assessment in LCA: transport of heavy metals in soil. Journal of Cleaner Production, 13(4): 341–361. doi.org/10.1016/j.jclepro.2003.10.003

Hofstetter P. 2000. Perspectives in Life Cycle Impact Assessment: A Structured Approach to Combine Models of the Technosphere, Ecosphere, and Valuesphere. International Journal of Life Cycle Assess, 5: 58. doi.org/10.1007/978-1-4615-5127-0

Igos E., Benetto E., Meyer R., Baustert P. and Othoniel B. 2019. How to Treat Uncertainties in Life Cycle Assessment Studies? International Journal Life Cycle Assess, 24: 794–807. doi.org/10.1007/s11367-018-1477-1

Jolliet O., Margni M., Charles R., Humbert S., Payet J., Rebitzer G. and Rosenbaum R. 2003. IMPACT 2002+: A new life cycle impact assessment methodology. Int J LCA 8, 324–330. doi.org/10.1007/BF02978505

Karami E. 2015. A Human Ecology Approach to Water Scarcity in the Context of the MENA Countries. Ecological Society of America 100th Annual Meeting, Baltimore, Maryland. 10.4236/jwarp.2013.54A008

Koehler A. 2008. Water use in LCA: managing the planet's freshwater resources. International Journal Life Cycle Assess, 13: 451–455. doi:10.1007/s11367-008-0028-6.

Lassaux S., Renzoni R. and Germain A. 2007. Life Cycle Assessment of Water from the Pumping Station to the Wastewater Treatment Plant. Internatinal Journal of L.C.A., 12(2): 118–126. doi.org/10.1065/lca2005.12.243

Lundie S., Peters G.M. and Beavis P.C. 2004. Life Cycle Assessment for Sustainable Metropolitan Water Systems Planning. Environ. Sci. Technol., 38: 3465–3473. doi.org/10.1021/es034206m

Mohapatra P.K. 2002. Improving Eco-Efficiency of Amsterdam Water Supply: a LCA Approach. Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua, 51(4): 217–227. 10.2166/aqua.2002.0019