



ریاست جمهوری
معاونت علمی، فناوری و اقتصاد دانش بنیان
سازمان توسعه فناوری های نانو و میکرو



الزامات و دستورالعمل ارزیابی چرخه حیات (LCA) تولید و استفاده از نانومواد

بر اساس استاندارد ملی شماره ۲۳۱۷۷



الزامات و دستورالعمل ارزیابی چرخه حیات (LCA) تولید و استفاده از نانومواد بر اساس استاندارد ملی شماره ۲۳۱۷۷

ستاد توسعه فناوری های نانو و میکرو گروه استاندارد و ایمنی فناوری نانو

www.nanostandard.ir

پایگاه اینترنتی

گروه استاندارد و ایمنی ستاد نانو

گردآوری و نظارت

۰۲۱۶۳۱۰۰

تلفن

دکتر افسانه شهبازی

با همکاری

nanosafety@nano.ir

پست الکترونیک

مهندس المیرا محزون

IranNationalStandard Committee

لینکداین

۱۴۰۳

سال انتشار

فهرست مطالب

۱	مقدمه	۲
۲	ارزیابی چرخه حیات	۳
۳	الزامات اجرای ارزیابی چرخه حیات در تولید و استفاده از نانومواد	۵
۴	تعریف چرخه حیات محصول در LCA	۷
۵	مراحل ارزیابی چرخه حیات تولید و استفاده از نانومواد بر اساس استاندارد ملی شماره ۲۳۱۷۷	۹
۵.۱	تعیین هدف و دامنه کاربرد	۱۰
۵.۲	تجزیه و تحلیل سیاهه چرخه حیات (LCI)	۱۰
۵.۳	ارزیابی اثرات چرخه حیات (LCIA)	۱۳
۵.۴	تفسیر چرخه حیات	۱۴
۶	گزارش دهی	۱۶
۷	معرفی نرم افزارهای اجرای LCA	۱۷
۸	منابع	۱۸



۱ < مقدمه

اهمیت حفاظت محیط‌زیست و پیامدهای احتمالی مرتبط با تولید و استفاده از نانومواد، لزوم توسعه روش‌هایی برای درک بهتر و شناسایی این پیامدها را افزایش داده است. یکی از فنون توسعه‌یافته برای این منظور، ارزیابی چرخه حیات (LCA)^۱ است.

در این گزارش، ارزیابی چرخه حیات تولید و استفاده از نانومواد بر اساس استاندارد شماره ۲۳۱۷۷ گام‌به‌گام بررسی شده است. این استاندارد، رهنمودهایی در خصوص الزامات و روش اجرای ارزیابی چرخه حیات تولید و استفاده از نانومواد ساخته شده (MNMs)^۲ را ارائه می‌دهد و از ساختار استاندارد ملی ایران شماره ۱۴۰۴۴ (سال ۱۳۸۶) پیروی می‌کند. علاوه بر این، مشابه استانداردهای ملی مرتبط، نمونه‌های عملی از نحوه کاربرد مراحل مختلف LCA را نشان می‌دهد.

در این گزارش، ابتدا به تعریف و اهمیت استفاده از LCA پرداخته شده و سپس چهار مرحله اصلی اجرای LCA با تمرکز بر تولید و استفاده از نانومواد معرفی شده است. برای مطالعه بیشتر و همچنین بررسی مثال‌های عملی هر بخش می‌توانید به متن استاندارد در وبگاه گروه استاندارد و ایمنی ستاد نانو (nanostandard.ir) مراجعه نمایید.

^۱ Life cycle assessment (LCA)
^۲ Manufactured nanomaterials

۲ ارزیابی چرخه حیات (LCA)

LCA یک ابزار مدیریتی است که پیامدهای محیط‌زیستی یک محصول (مانند نانومواد) یا خدمت (مانند استفاده از نانومواد) به صورت کمی در تمام مراحل حیات آن، از جمله استخراج منابع، تولید محصول نهایی، استفاده و مدیریت پس از دفع، مانند بازیافت، استفاده مجدد و دفع نهایی، را ارزیابی می‌کند. LCA چارچوب مشخصی برای اندازه‌گیری اثرات محیط‌زیستی ساخت و استفاده از نانومواد ارائه می‌دهد. ارزیابی چرخه حیات می‌تواند در موارد زیر کمک کند:

- ۱ شناسایی فرصت‌ها به منظور بهبود عملکرد محیط‌زیستی محصولات در نقاط مختلف چرخه حیات آن‌ها
- ۲ آگاهی دادن به تصمیم‌گیرندگان در صنایع، سازمان‌های دولتی یا غیردولتی (به عنوان مثال، به منظور برنامه‌ریزی راهبردی، اولویت بندی، طراحی یا طراحی مجدد محصول یا فرآیند)
- ۳ انتخاب شاخص‌های مرتبط با عملکرد محیط‌زیستی، از جمله فنون اندازه‌گیری
- ۴ بازاریابی (مانند اجرای یک طرح برچسب‌گذاری محیط‌زیستی^۱، ادعای محیط‌زیستی، یا ایجاد اعلامیه محیط‌زیستی محصول)
- ۵ بهبود مستمر در سازمان و امکان ردیابی پیشرفت محیط‌زیستی سازمان در طول زمان: سازمان می‌تواند با استفاده از نتایج LCA یک خط مبنا و پایه (کاملاً کمی) برای عملکرد محیط‌زیستی خود تعریف کند و از آن برای ارزیابی مداوم سازمان، تعیین اهداف محیط‌زیستی بلندمدت و برنامه‌های استراتژیک آتی سازمان استفاده کند. دنبال کردن روند بهبود مستمر با استفاده از داشبورد مدیریت محیط‌زیستی انجام خواهد شد.
- ۶ تصمیم‌گیری آگاهانه و دقیق: با استفاده از نتایج LCA سازمان می‌تواند با تضمین زیاد، تصمیم‌گیری صحیح و آگاهانه‌ایی در مورد طراحی محصول، انتخاب مواد و نوآوری‌های فرآیند، روش‌های حمل‌ونقل و فرمول‌بندی مجدد محصولات انجام دهد.
- ۷ زمینه‌سازی رسیدن به اقتصاد چرخشی: نتایج LCA به سازمان کمک می‌کند تا از مدل خطی اقتصادی به مدل چرخشی اقتصاد تغییر ماهیت دهد. هدف از اقتصاد چرخشی، کمینه کردن پسماندها و بیشترین استفاده از منابع است.
- ۸ تحلیل تطبیقی: با استفاده از نتایج LCA می‌توان از بین گزینه‌های انتخابی موجود، بهترین گزینه را که منجر به رسیدن به اهداف پایداری صنعتی سازمان می‌شود را انتخاب کرد.
- ۹ رعایت مقررات: نتایج LCA به سازمان کمک می‌کند تا بطور زود هنگام مناطقی از سازمان و یا فرایندهایی را که با قوانین محیط‌زیست مطابقت ندارد را شناسایی کند و اقدامات اصلاحی را قبل از بروز مشکلات قانونی انجام دهد. بنابراین ابزاری بسیار دقیق و مناسب و جامع گرانه‌ایی برای رسیدن به خودآگاهی از کل سازمان است.

اما LCA چندان ساده نیست و عوامل بی‌شماری در آن دخیل هستند. اینکه بدانید نانوماده در کدام مرحله از فرآیند تولید نقش داشته و از کجا می‌آید. کالاهای چگونه تولید می‌شوند، نانوماده یا کالای حاوی نانوماده چگونه حمل می‌شود و غیره. هدف از اجرای LCA تنها جمع‌آوری داده‌ها نیست، بلکه تسهیل در فرآیند تصمیم‌گیری با نگرشی همه‌جانبه است. به همین دلیل، همیشه با هدف خاصی طراحی می‌شود. به عنوان مثال، یکی از این اهداف می‌تواند ساخت نانومواد پایدارتر و با اثرات محیط‌زیستی کمتر باشد. شکل ۱، راهنمایی سریع برای درک بهتر LCA ارائه داده است.

راهنمای سریع ارزیابی چرخه حیات (LCA)

تاثیر محصول، شرکت یا خدمات شما بر محیط زیست چیست؟

LCA یک ابزار مدیریتی استانداردسازی شده بوسیله ISO 14044 برای اندازه گیری این تاثیر است!



مراحل چرخه حیات

۱. استخراج مواد خام
۲. ساخت و فرآوری
۳. حمل و نقل
۴. استفاده و خرده فروشی
۵. دفع زباله و مدیریت پسماند



چرا این سوال مهم است؟

- مدیریت** گرفتن تصمیم های پایدارتر
- توسعه محصول** توسعه محصولات پایدارتر
- زنجیره تامین** یافتن تامین کنندگان بهتر
- فروش و بازاریابی** اثبات ادعاهای پایدار

ارزیابی چرخه حیات در ۴ مرحله انجام می شود:

مرحله ۲ تجزیه و تحلیل سياهه چرخه حیات (LCI)

داده های خود را جمع آوری و ساختار دهید

چه داده هایی نیاز دارید؟ در این مرحله، تمام ورودی ها و فرآیندهایی را که می خواهید اندازه گیری کنید، جمع آوری می کنید. به عنوان مثال مواد اولیه و صورتحساب مواد، انرژی ای که مصرف می کنید و می خرید، داده های تامین کنندگان، تمامی ورودی ها و خروجی ها و سامانه ای که می خواهید اندازه گیری کنید

ساده ترین راه برای ساختار دادن به داده ها استفاده از نمودار جریان یا نمودار درختی است - از ورودی ها و فرآیندها تا خروجی ها و پسماندها.

مرحله ۱ تعریف هدف و دامنه کاربرد

چه چیزی را می خواهید اندازه بگیرید

محصول / شرکت / خدمتی را که می خواهید اندازه گیری کنید تعریف کنید
در چه سامانه ای اندازه گیری می کنید؟
کدام بخش از چرخه حیات؟ کدام دسته تاثیرات (CO₂, آب، ...)?
چه چیزی را مستثنی می کنید؟

شما نمی توانید یک LCA را با دیگری مقایسه کنید. مقایسه هدف و دامنه هر تحلیل مهم است! برای مقایسه بهتر، قوانین دسته بندی محصول (PCR) وجود دارد که نحوه تجزیه و تحلیل یک محصول یا صنعت خاص را مشخص می کند.

مرحله ۳ ارزیابی اثرات چرخه حیات (LCIA)

داده ها را به اثرات ترجمه کنید

با استفاده از پایگاه های داده چرخه حیات (مثل Ecoinvent) و مقالات علمی، مشخص کنید سياهه چرخه حیات شما چه اثراتی دارد.

تأثیرات را در مجموعه دسته ها خلاصه کنید - به عنوان مثال: پتانسیل گرمایش جهانی (CO₂).

مرحله ۴ تفسیر

همه این ها چه مفهومی دارد؟

میزان انتشار گازهای گلخانه ای چقدر است؟ محصولات شما چگونه با هم مقایسه می شوند؟ آیا می توانید آنها را بهبود بخشید؟ آیا می توانید فرآیندهای خود را بهبود بخشید؟ بزرگترین اهرم ها برای شما چیست؟

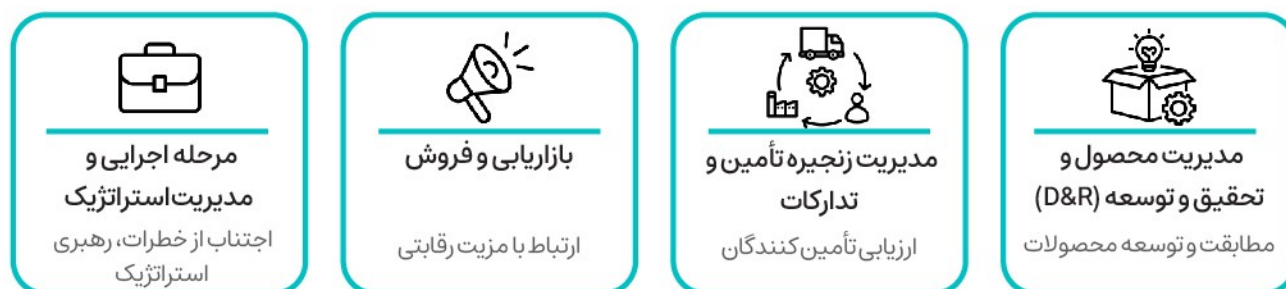
بر اساس نتایج تفسیر، گاهی لازم است به بخش تحلیل برگردید و جنبه های خاصی از ارزیابی را مجدد انجام دهید.

۳ الزامات اجرای ارزیابی چرخه حیات در ساخت و استفاده از نانومواد

۱.۳ بخش هایی که به LCA نیاز دارند

قبل از اینکه به نحوه عملکرد LCA بپردازیم، باید افرادی که به این ابزار نیاز دارند، را مشخص کنیم.

LCA یک تحلیل تخصصی است که پایه گذار هر استراتژی پایداری یا مسئولیت اجتماعی شرکت ها (CSR)^۱ می شود. این ابزار به ویژه در شرکت ها اهمیت دارد، زیرا تصمیم گیری ها معمولاً بر اساس داده هایی صورت می گیرد که قبلاً جمع آوری و اندازه گیری شده اند. طبق مطالعات، چهار بخش اصلی در شرکت ها وجود دارند که می توانند از داده های ارزیابی چرخه حیات بهره برداری کنند.



شکل ۲ بخش هایی که به LCA نیاز دارند

الف) مدیریت محصول / تحقیق و توسعه (R&D)

دو دلیل وجود دارد که چرا ارزیابی چرخه حیات می تواند برای مدیر محصول جالب باشد.

۱: رعایت مقررات

اغلب، شرکت ها برای ادامه فعالیت نیاز به رعایت مقررات دارند. در برخی کشورها، مناقصه های استاندارد برای پروژه های عمومی وجود دارد. این مناقصه ها از شرکت ها می خواهند که داده های محیط زیستی محصولات خود را ارائه دهند و شرکت ها باید برای به دست آوردن این داده ها یک ارزیابی چرخه حیات انجام دهند. برای مثال، شرکتی که آسفالت یک پروژه عمومی راه سازی را تأمین می کند، ممکن است برای شرکت در آن مناقصه، نیاز به ارائه ردپای محیط زیستی آن محصول داشته باشد. رعایت این مقررات، یا بهینه سازی محصولات موجود به منظور مطابقت آن ها در آینده، می تواند برای بخش محصول مهم باشد. در بخش بعد به الزامات اجرای LCA در ایران و قوانین این حوزه اشاره خواهیم کرد.

۲: توسعه محصول جدید

محصولات جدید باید تا حد امکان آلاینده کمی داشته باشند، که این امر می تواند به دلایل مختلفی مانند سیاست های شرکت، مقررات، تقاضای مشتری و... باشد. اما اغلب اوقات، کاهش آلاینده گی به سادگی به معنای بهره وری بیشتر در مصرف منابع است. بخش تحقیق و توسعه می تواند از نتایج LCA برای مقایسه دو نانوماده مختلف یا یک نانوماده با یک ماده غیرنانویی استفاده کند. با تحلیل نتایج این ارزیابی، می توان بررسی کرد که چگونه این مواد بر تأثیرات محیط زیستی محصول نهایی تأثیر می گذارند.

ب) مدیریت زنجیره تأمین / تدارکات

در بسیاری از صنایع، بیش از ۸۰ درصد از اثرات محیط زیستی به زنجیره تأمین مربوط می شود. این یعنی انتخاب منابع و تأمین کنندگان مختلف می تواند تأثیر زیادی بر ردپای محیط زیستی محصول داشته باشد. برای مدیران زنجیره تأمین، انتخاب تأمین کننده مناسب برای نانومواد اغلب یک تصمیم چالش برانگیز است که علاوه بر قیمت، عوامل دیگری نیز باید در نظر گرفته شوند. ارزیابی چرخه حیات

^۱ Corporate social responsibility (CSR) strategy

می تواند به کسانی که در مدیریت زنجیره تأمین یا تدارکات فعالیت می کنند، راهکارهای عملی ارائه دهد تا بدانند منابع خود را باید از کدام شرکت تأمین کنند.

پ) بازاریابی و فروش

امروزه بیش از ۸۰ درصد از مصرف کنندگان بر این باورند که شرکت ها باید به بهبود محیط زیست کمک کنند. برای بخش بازاریابی و فروش، این به معنای درک میزان پایداری محصولات شرکت و نحوه انتقال این پیام به مشتریان است. LCA مهم ترین گام در این مسیر است. بر اساس پژوهش های انجام شده، یک شرکت می تواند مشخص کند در چه جنبه هایی نسبت به رقبای خود برتری دارد و در چه جاهایی می تواند از فرصت ها برای پایدارتر شدن بهره برداری کند.

ت) مرحله اجرایی و مدیریت استراتژیک

برای اتخاذ تصمیمات استراتژیک در خصوص اینکه چگونه یک شرکت می تواند تأثیر مثبت بیشتری بر محیط زیست داشته باشد، لازم است که بالاترین سطوح مدیریتی وارد عمل شوند. به همین دلیل، هر LCA باید یک دیدگاه عملی را به سطح مدیریت عالی منتقل کند. نتایج ارزیابی چرخه حیات به محصولات از دیدی جامع تر نگاه می کند و مثلاً تنها به تأثیر نانومواد کربنی نمی پردازد. به همین دلیل است که LCA معمولاً دیدگاه هایی را ارائه می دهد که ممکن است در تحلیل های دیگر نادیده گرفته شوند. این یک فرصت بزرگ برای کل شرکت است.

۲.۳ الزامات اجرای LCA در ایران

در ایران تا کنون هیچ قانون خاصی که کارخانه ها و صنایع را به طور مستقیم ملزم به استفاده از ارزیابی چرخه حیات (LCA) کرده باشد، وجود ندارد. اما قوانین و سیاست های محیط زیستی موجود به ویژه در صنایع بزرگ و حساس، وجود دارد که می تواند صنایع را به طور غیرمستقیم به استفاده از LCA ترغیب کند. در ادامه به این موارد اشاره می کنیم:

قوانین محیط زیستی

- **قانون حفاظت از محیط زیست (مصوب ۱۳۴۷):** این قانون بر جلوگیری از آلودگی ها و اثرات محیط زیستی ناشی از فعالیت های صنعتی تأکید دارد. اگرچه به طور مستقیم از LCA نام نمی برد، ولی صنایع را ملزم می کند که اثرات منفی فعالیت هایشان را کاهش دهند. استفاده از LCA می تواند به صنایع کمک کند تا این الزامات را رعایت کنند.
- **قانون مدیریت پسماندها:** این قانون به مدیریت بهینه پسماندها و کاهش آلودگی ناشی از آن ها پرداخته است. LCA می تواند ابزاری برای ارزیابی و بهینه سازی فرآیندهای تولید و دفع پسماندها باشد.
- **قانون حمایت از محیط زیست در تولیدات صنعتی:** این قانون صنایع را تشویق می کند تا از فناوری های سبز و روش های پایدار در تولید استفاده کنند. LCA ابزار مناسبی برای ارزیابی پیامدهای محیط زیستی این فرآیندها است.

الزامات بین المللی و توافقات جهانی

- **ایران به برخی از کنوانسیون ها و توافقات بین المللی مانند توافق پاریس و کنوانسیون تغییرات اقلیمی پیوسته است.** این توافقات کشورهای عضو را ملزم به کاهش انتشار گازهای گلخانه ای و استفاده از تکنولوژی های پایدار می کند. چون LCA ابزاری برای کمی سازی پیامدهای محیط زیستی است، صنایع می توانند از آن برای بهبود فرآیندهای تولید خود استفاده کنند.

■ استاندارد ISO ۱۴۰۰۱ (مدیریت محیط زیستی) و ISO ۱۴۰۴۴ (LCA): بسیاری از شرکت‌ها برای اخذ گواهینامه‌های بین‌المللی کیفیت و مدیریت محیط زیستی، ملزم به استفاده از ارزیابی‌های محیط زیستی از جمله LCA هستند. این استانداردها در بسیاری از کشورها، به‌ویژه در صنایع بزرگ، توصیه یا الزام شده است.

■ توافقات ملی و برنامه‌های توسعه صنعتی پایدار

■ برنامه‌های توسعه صنعتی و سیاست‌های دولت: در سال‌های اخیر، دولت ایران توجه ویژه‌ای به توسعه صنعت پایدار داشته است. یکی از اصول این پایداری، ارزیابی اثرات محیط زیستی محصولات و فرآیندهای صنعتی است. بنابراین، صنایع ممکن است ملزم به استفاده از روش‌هایی مانند LCA برای ارزیابی پیامدهای محیط زیستی خود شوند.

■ سیاست‌های تشویقی و مالیاتی برای صنایع سبز: در صورتی که دولت مشوق‌های مالیاتی برای شرکت‌هایی که استانداردهای محیط زیستی را رعایت می‌کنند در نظر بگیرد، استفاده از LCA می‌تواند به صنایع کمک کند تا این استانداردها را اثبات کنند.

دستورالعمل‌های وزارت صنعت، معدن و تجارت

■ وزارت صنعت، معدن و تجارت ایران گاهی دستورالعمل‌هایی برای استفاده از فناوری‌های پاک و رعایت استانداردهای محیط زیستی صادر می‌کند. هرچند الزام مستقیمی برای استفاده از LCA در این دستورالعمل‌ها وجود ندارد، اما صنایع می‌توانند از این دستورالعمل‌ها برای بهبود فرآیندهای تولید و کاهش اثرات محیط زیستی خود بهره‌برداری کنند.

استانداردهای خاص صنایع و نانومواد

■ در صنایعی که در زمینه تولید نانومواد فعالیت می‌کنند، استانداردهای مرتبط با نانتکنولوژی و ایمنی نانومواد ممکن است به ارزیابی اثرات محیط زیستی اشاره داشته باشند. در این صنایع، استفاده از LCA می‌تواند به دقت اثرات محیط زیستی نانومواد در تمامی مراحل چرخه حیات آن‌ها را ارزیابی کند.

۴ چرخه حیات محصول در LCA

اگر بخواهیم چرخه حیات محصولات حاوی نانومواد را ارزیابی کنیم، ابتدا باید مراحل مختلف تشکیل دهنده چرخه حیات را بشناسیم. به طور کلی، چرخه عمر محصول (از گهواره تا گور) شامل پنج مرحله است: ۱. استخراج مواد خام ۲. ساخت و فرآوری ۳. حمل و نقل ۴. استفاده و خرده فروشی ۵. دفع زباله



شکل ۳ چرخه حیات محصول

۱.۴ مدل‌های مختلف چرخه حیات

مرز سیستم، مرز مطالعاتی که باید در ارزیابی چرخه حیات نانوماده قرار گیرند، را تعیین می‌کند. انتخاب مرز سیستم باید با هدف مطالعه سازگار باشد. معیارهای مورد استفاده در برقراری مرز سیستم باید شناسایی و تشریح شود. هرگونه تصمیم برای حذف مراحل چرخه حیات، فرایندها، ورودی‌ها یا خروجی‌ها باید به وضوح بیان شود و دلایل و لزوم حذف آن‌ها تشریح شود. به طور کلی معمولاً ۴ مدل چرخه حیات محصول وجود دارد که می‌توان برای ارزیابی چرخه حیات انتخاب کرد.

گهواره تا گور^۱

وقتی تاثیر نانوماده در طول ۵ مرحله چرخه حیات محصول تجزیه و تحلیل می‌شود، به آن گهواره تا گور می‌گویند. گهواره آغاز تولید محصول با تامین مواد اولیه نانویی است و گور، دفع نانوماده یا محصول حاوی نانوماده است. حمل و نقل به عنوان مرحله ۳ ذکر شده است، اما در واقع می‌تواند در بین تمام مراحل انجام شود.

گهواره تا دروازه^۲

مدل گهواره تا دروازه فقط یک محصول را ارزیابی می‌کند تا زمانی که از دروازه کارخانه خارج شود و قبل از اینکه به مصرف‌کننده منتقل شود. در واقع مراحل استفاده و دفع حذف شده است. تجزیه و تحلیل گهواره تا دروازه می‌تواند پیچیدگی ارزیابی چرخه حیات را به میزان قابل توجهی کاهش دهد و در نتیجه نتایج سریع‌تر، به خصوص در مورد فرایندهای داخلی، به دست می‌آیند.

گهواره تا گهواره^۳

گهواره تا گهواره مفهومی است که اغلب در اقتصاد دایره‌ای به آن اشاره می‌شود. در واقع یک مدل تغییر یافته از گهواره تا گور است، که مرحله دفع با یک فرآیند بازیافت جابه‌جا شده است و آن را برای محصول دیگری مجدداً قابل استفاده می‌کند و اساساً "حلقه را می‌بندد". به همین دلیل است که به آن بازیافت حلقه بسته نیز می‌گویند.

دروازه تا دروازه^۴

دروازه تا دروازه گاهی اوقات در چرخه حیات محصول که فرایندهای ارزش افزوده زیادی در میان راه دارند، استفاده می‌شود. برای کاهش پیچیدگی در ارزیابی، تنها یک فرآیند ارزش افزوده در زنجیره تولید ارزیابی می‌شود. این ارزیابی‌ها بعداً می‌توانند برای تکمیل یک ارزیابی چرخه حیات در سطح بزرگ‌تری به هم ارتباط داده شوند.

در مثال نانومواد ساخته‌شده و محصولات حاوی نانوماده، محدوده سامانه به‌طور مطلوب، باید کل چرخه حیات کاربرد نانوماده را مورد ملاحظه قرار داده و بنابراین مطالعات «گهواره تا گور» بر مطالعات «گهواره تا دروازه» ارجحیت خواهند داشت.



شکل ۴ مدل‌های مختلف چرخه حیات

- ۱ Cradle-to-grave
- ۲ Cradle-to-gate
- ۳ Cradle-to-cradle
- ۴ Gate-to-gate

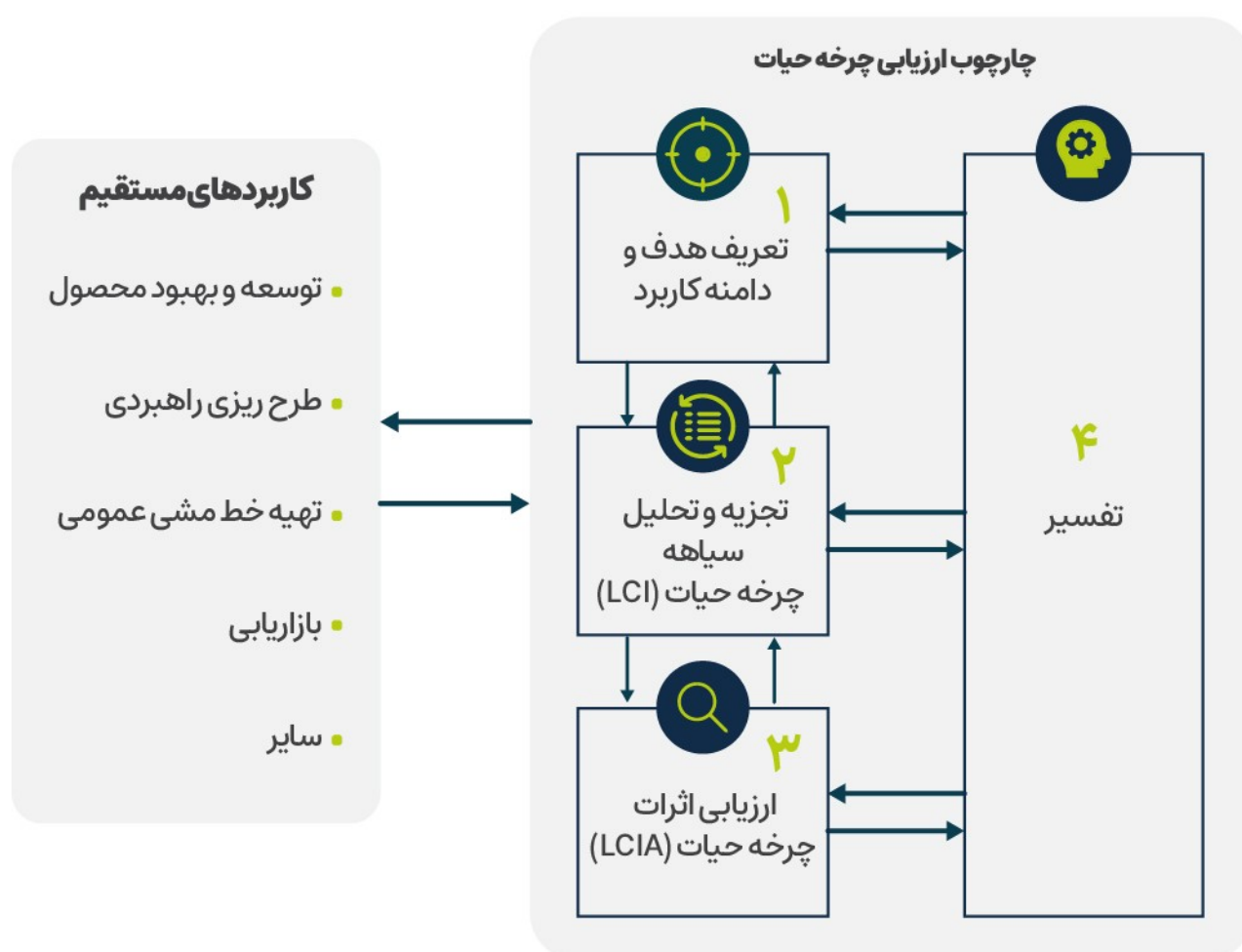
۵ مراحل اجرای ارزیابی چرخه حیات

در این گزارش مراحل و توضیحات ارزیابی چرخه حیات ساخت و استفاده از نانومواد بر اساس استانداردهای ایزو ۱۴۰۴۰ و ایزو ۱۴۰۴۴ و استاندارد ملی به شماره ۱۷۲۷۶ آورده شده‌اند. پیشنهاد می‌شود برای کسب اطلاعات بیشتر و آشنایی کامل با اصول، چارچوب و الزامات ارزیابی چرخه حیات به متن اصلی این استانداردها^۱ مراجعه کنید.

ارزیابی چرخه حیات شامل ۴ مرحله است:

۱. تعریف هدف و دامنه کاربرد^۲
۲. تجزیه و تحلیل سیاهه چرخه حیات (LCI)^۳
۳. ارزیابی اثرات چرخه حیات (LCIA)^۴
۴. تفسیر^۵

باید اضافه کرد، مرحله تفسیر یک LCA می‌تواند در کنار سایر مراحل انجام شود، حتی زمانی که ارزیابی هنوز به پایان نرسیده است. به خصوص زمانی که ارزیابی چرخه حیات پیچیده‌تر می‌شود، تفسیر مداوم نتایج به بهینه‌سازی تجزیه و تحلیل کمک می‌کند.



شکل ۵ مراحل ارزیابی چرخه حیات و رابطه بین آنها

^۱ www.Nanostandard.ir
^۲ Goal and scope definition
^۳ Life cycle inventory analysis (LCI)
^۴ Life cycle impact assessment (LCIA)
^۵ Interpretation

۱.۵ «مرحله یک: تعریف هدف و دامنه کاربرد»

در مرحله اول ارزیابی چرخه حیات، باید دقیقاً آنچه قرار است تجزیه و تحلیل شود را تعریف کرد. در این مرحله، «واحد کارکردی»^۱ تعریف می‌شود - محصول یا خدمات دقیقی که قرار است ارزیابی شود. واحد کارکردی، عملکرد کمی‌شده یک سامانه محصول برای استفاده به عنوان یک واحد مرجع است.

دلیل انجام ارزیابی چرخه حیات باید مشخص شود: آیا هدف داشتن اطلاعات محیطی موجود است یا طراحی محصول دوستدار محیط زیست یا پیروی از مقررات. زنجیره ارزش می‌تواند بسیار عمیق باشد. هر نانوماده ورودی واحد کارکردی، خودش در جایی تولید می‌شود. یک گام بسیار مهم، تصمیم‌گیری برای این است که چه مقدار داده اولیه باید جمع‌آوری شود.

همچنین، یک مدل مناسب چرخه حیات برای ارزیابی باید مشخص شود - آیا به پتانسیل پردازش و بازیافت پایان حیات (از گهواره تا گور یا - تا گهواره) نگاه می‌شود، یا فقط به اثرات تولید نگاه می‌شود (گهواره تا گهواره یا تا دروازه). همچنین، باید تصمیم گرفته شود که ارزیابی باید روی کدام دسته از تأثیرات متمرکز باشد و از کدام روش ارزیابی (LCIA) استفاده شود.

نانومواد ساخته‌شده اغلب خواص جدیدی از خود نشان می‌دهند که نیاز است در یک مطالعه LCA گنجانده شود تا خروجی و تفسیر جامع و در نتیجه منصفانه‌ای، از نتایج مطالعه LCA ارائه داده شود. به منظور حصول اطمینان از این جامعیت در مورد کارورزی با نانومواد ساخته‌شده در یک مطالعه LCA، تمام خواص ویژه نانومواد ساخته‌شده و محصولات نانوپدید باید به شکل کافی در عناصر مختلف بخش تعریف هدف و دامنه کاربرد گنجانده شوند.

هنگام تعریف هدف و دامنه کاربرد یک مطالعه LCA مرتبط با نانومواد ساخته‌شده یا محصولات نانوپدید باید به مسائل و نکات زیر به طور صریح پرداخته شود.^۲

- هدف مطالعه
- کارکرد و واحد کارکردی
- محدوده سامانه
- روش‌شناسی LCIA و انواع اثرات
- انواع و منابع داده
- الزامات کیفی داده
- مقایسه بین سامانه‌ها

۲.۵ «مرحله دو: تجزیه و تحلیل سیاهه چرخه حیات (LCI)»

تجزیه و تحلیل سیاهه چرخه حیات (LCI) که با عنوان‌های سیاهه نویسی یا فهرست نویسی هم شناخته می‌شود، اساساً مرحله جمع‌آوری داده‌های ارزیابی چرخه حیات است. در این مرحله به ورودی‌ها و خروجی‌های محیطی محصول یا خدمات توجه می‌شود.

سیاهه چرخه حیات یا همان فهرست ورودی‌ها و خروجی‌های چرخه حیات، شامل جمع‌آوری داده‌ها و انجام محاسبات به منظور کمی‌سازی ورودی‌ها و خروجی‌های چرخه حیات محصول می‌باشد. در واقع سیاهه به عنوان قلب روش ارزیابی چرخه حیات می‌باشد. جمع‌آوری صحیح و دقیق داده‌ها در این گام از ارزیابی چرخه حیات انجام می‌شود که البته نبود یا کمبود داده‌ها می‌تواند بزرگ‌ترین چالش در این فاز از LCA باشد.

^۱ functional unit

^۲ برای مطالعه توضیحات تکمیلی موارد زیر، به بند ۵ استاندارد "فناوری نانو-رهنموده‌هایی برای ارزیابی چرخه حیات - کاربرد استاندارد ملی ایران - ایزو شماره ۱۴۰۴۴: سال ۱۳۸۶ برای نانومواد ساخته‌شده" مراجعه شود.

داده‌های کمی و کیفی که در سیاهه وارد می‌شوند، باید برای هر فرآیندی که در مرز سیستم وارد شده است، جمع‌آوری شود. داده‌های جمع‌آوری شده، خواه اندازه‌گیری شده باشند خواه محاسبه یا برآورد شده باشند برای کمی کردن ورودی‌ها و خروجی‌های یک واحد فرآیند مورد استفاده قرار می‌گیرند. اگر داده‌ها از منابع عمومی جمع‌آوری شوند، باید مرجع آن‌ها مشخص شود. برای آن داده‌هایی که ممکن است برای نتیجه‌گیری مطالعه حائز اهمیت باشند، باید به تفصیل به فرآیند جمع‌آوری داده‌های مرتبط، مدت زمانی که داده‌ها جمع‌آوری می‌شوند و اطلاعات بیشتر درباره شاخص‌های کیفی داده‌ها اشاره شود.

در ساخت یک نانوماده ورودی‌ها و خروجی‌ها به شرح زیر است:

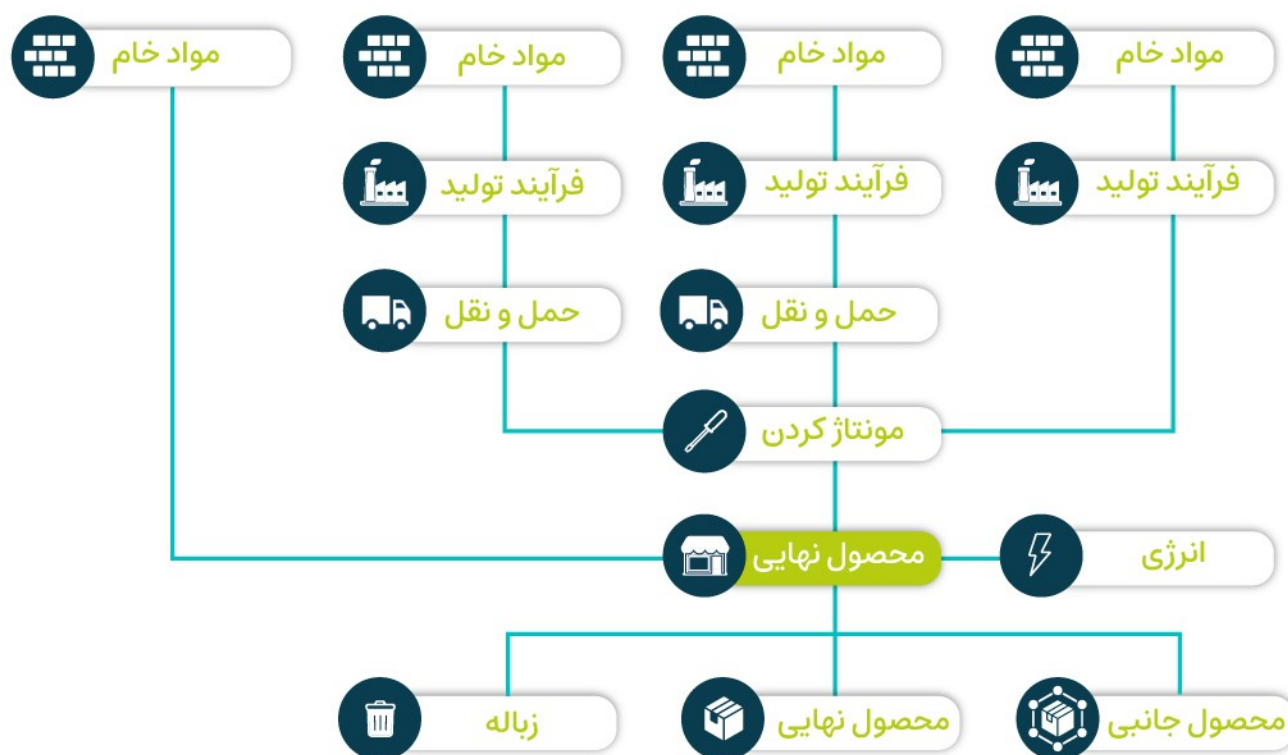
- مواد خام اولیه و مواد شیمیایی
- انواع انرژی و سوخت مصرفی
- آب مصرفی
- انتشارات آلاینده‌ها به هوا، زمین یا آب

این تحلیل می‌تواند بسیار پیچیده باشد زیرا فرآیندهای تولید و زنجیره تامین می‌توانند ساختارهای پیچیده‌ای داشته باشند. به همین دلیل است که مرحله تجزیه و تحلیل سیاهه چرخه حیات در ارزیابی چرخه حیات معمولاً بیشترین کار و زمان را از شرکت‌ها می‌گیرد.

مدل سازی LCI: مدل‌های جریان موجودی

جمع‌آوری همه داده‌های ورودی و خروجی در یک لیست یا جدول منجر به سردرگمی می‌شود. علاوه بر این، منجر به عدم توجه به زمینه‌های مهم نیز می‌گردد. به همین دلیل است که سیاهه یا فهرست چرخه حیات معمولاً با یک مدل جریان نشان داده می‌شود (شکل ۶).

مدل جریان به وضوح سیستم و واحدی را که در حال تجزیه و تحلیل آن هستیم و ورودی‌ها و خروجی‌ها را نشان می‌دهد. داده‌های درون مدل باید برای همه فعالیت‌هایی که در محدوده ارزیابی چرخه حیات هستند جمع‌آوری شود.



شکل ۶ مدل‌های جریان ارزیابی چرخه حیات

همانطور که در بالا اشاره شد، نانومواد ساخته شده اغلب خواص جدید و افزودنی را نشان می‌دهند که نیاز به شناسایی و جمع‌آوری در تجزیه و تحلیل LCI دارند تا متعاقباً اجازه داده شود که یک خروجی و تفسیر جامع و منصفانه از نتایج مطالعه LCI به دست آید. بنابراین، در سطح تجزیه و تحلیل LCI، باید اطمینان حاصل شود که تمام این خواص جدید / افزوده از نانومواد ساخته شده و محصولات نانوپدید به درستی جمع‌آوری و به شکل مناسب در مجموعه داده‌های LCI این مواد و محصولات، ادغام می‌شوند.

بنابراین، یک مشخصه‌یابی گسترده برای نانومواد ساخته شده لازم است. برای تسهیل مدل‌سازی مواجهه و سرنوشت محیط‌زیستی، لازم است به سوالات ویژه متعددی پاسخ داده شود. جنبه‌هایی که توصیه می‌شود مورد ملاحظه قرار گیرند شامل موارد زیر می‌شود:

- کدام سازوکارها / فرایندهای رهایش می‌توانند در مراحل متفاوت چرخه حیات تمیز داده شوند؟

- نرخ رهایش نانومواد ساخته شده در تولید، استفاده و دفع به چه میزان است؟

- دسترسی‌زیستی، سینتیک‌های زیستی، پایداری زیستی چه هستند؟

- کدام سنج / خواص ذره باید (الزامی / اختیاری) برای ارتباط مواجهه با سمیت شناخته شوند؟

درمیان این اطلاعات تکمیلی (علاوه بر داده‌های پایه همانند ترکیب عنصری)، سه ویژگی کلیدی ماده، برای یک مدل‌سازی جامع در زیر ارائه شده است:

الف- اندازه و شکل؛

ب- خواص انحلال / پراکنش (تحت تاثیر پردازش سطوح و پوشش‌ها)؛

پ- خواص سطحی و اطلاعات مربوط به پوشش (در صورت کاربرد).

اطلاعات مربوط به پتانسیل انبوهی و کلوخگی برای سرنوشت محیط‌زیستی و ارزیابی مواجهه مفید است. از اندازه‌گیری‌ها، داده‌های حاصل از متون علمی یا مدل‌سازی، این اطلاعات را می‌توان فراهم کرد.

مواجهه کارگر با نانومواد ساخته شده مستلزم توجه بیشتری است. مدل‌های فضاهای بسته که شامل مواجهه شغلی و مصرف‌کننده با نانومواد ساخته شده است، موضوعات پژوهش کنونی بوده که ارزیابی سمیت انسانی ایجاد شده از طریق استنشاق نانومواد ساخته شده را در فضاهای بسته تسهیل خواهد کرد. نفوذ مواد انتشار یافته به فضای باز (محیطی) می‌تواند در ابتدا در مرحله مصرف و دفع روی دهد. بعد از رهایش، «پیرشوندگی» نانومواد ساخته شده در طول چرخه حیات آن‌ها می‌تواند شکل فیزیکی-شیمیایی آن‌ها را تغییر دهد. باید تا حد ممکن برای ارتباط خواص نانومواد در نقاط مختلف در چرخه حیات به ارزیابی اثرات در مرحله بعدی، شکل فیزیکی-شیمیایی شرح داده شود. دانش مربوط به این خواص این اجازه را می‌دهد تا در نقاط مختلف در چرخه حیات آن‌ها، جرم به مساحت سطح و غلظت عددی تبدیل شود. غلظت عددی به عنوان یک سنج می‌تواند یک واحد اندازه‌گیری مناسب‌تر برای مدل‌سازی رهایش نانوذرات باشد، درحالی‌که مساحت سطح ممکن است بهترین توصیف‌کننده سمیت زیست‌بوم یا سمیت انسانی باشد.

در مرحله تجزیه و تحلیل سیاهه چرخه حیات (LCI) برای نانومواد باید به موارد زیر توجه کرد:^۲

■ جمع‌آوری داده‌های افزوده در مورد نانومواد ساخته شده

■ محاسبه داده

■ تجزیه و تحلیل با مدل‌های LCA در دسترس

■ تخصیص (هنگامی که بیش از یک محصول اقتصادی مناسب از یکی از مراحل فرایندهای تولید نانومواد ساخته شده و / یا محصولات نانوپدید^۳، حاصل می‌شود).

^۱ aging

^۲ برای کسب اطلاعات بیشتر و توضیحات تکمیلی موارد زیر، به بند ۶ استاندارد "فناوری نانو-رهنمودهایی برای ارزیابی چرخه حیات- کاربرد استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۱۴۰۴۴: سال ۱۳۸۶ برای نانومواد ساخته شده" مراجعه شود.

^۳ nano-enabled

۳.۵ «مرحله سه: ارزیابی اثرات چرخه حیات (LCIA)»

تا به حال آنچه را که نیاز است اندازه‌گیری و جمع‌آوری شود در فاز ۱ تعریف شده است. سپس داده‌ها در فاز ۲ جمع‌آوری و ساختار بندی شد. در مرحله ۳، باید ارزیابی شود که تأثیرات چقدر قابل توجه است که بر اساس جریان موجودی چرخه حیات از فاز ۲، انجام می‌شود. مرحله ارزیابی اثرات چرخه حیات یکی از گام‌های کلیدی در تحلیل LCA است که هدف آن تبدیل داده‌های خام مرحله (LCI) به اطلاعات معناداری درباره پیامدهای محیط زیستی است. این مرحله کمک می‌کند تا تأثیرات بالقوه محیط زیستی فعالیت‌ها یا محصولات بهتر درک شوند. نتایج این مرحله به صورت کمی (مانند میزان گازهای گلخانه‌ای معادل یا میزان آب مصرفی) ارائه می‌شود و کمک می‌کند تصمیم‌گیرندگان بفهمند کدام مراحل چرخه حیات یا کدام مواد، اثرات محیط زیستی بیشتری ایجاد می‌کنند. این اطلاعات در سیاست‌گذاری، طراحی محصول پایدارتر، و کاهش اثرات محیط زیستی استفاده می‌شود.

دسته بندی‌های متداول تأثیرات به شرح زیر است:

- تغییرات اقلیمی
- کاهش لایه اوزون
- اسیدی شدن
- غنی‌شدگی غذایی^۱ - آب‌های شیرین
- غنی‌شدگی غذایی - آب‌های دریایی
- غنی‌شدگی غذایی - خشکی
- تشکیل ازن فتوشیمیایی
- کاهش منابع غیرزیستی - مواد معدنی و فلزات
- کاهش منابع غیرزیستی - سوخت‌های فسیلی
- سمیت برای انسان
- سمیت محیط زیستی
- مصرف آب
- استفاده از زمین
- پرتوهای یون‌ساز^۲، سلامت انسان
- انتشار ذرات معلق

در حال حاضر روش‌های LCIA موجود شامل کارکردهای نانومواد نمی‌شوند. سرنوشت محیط زیستی، مواجهه و ارزیابی اثرات مواد شیمیایی متداول، ممکن است تا حدی برای نانومواد ساخته شده، برحسب خواص فیزیکی-شیمیایی نانومواد (برای مثال، برای فلزهای حل‌پذیر^۳)، کاربردی باشد. الحاقیه‌هایی^۴ در LCIA مورد نیاز است تا مشخصه‌های نانومواد همچون اصلاحات سطح برای افزایش قابلیت تحرک، پتانسیل استنشاق عمیق ریوی و فراهمی زیستی وابسته به سطح را توضیح دهد.

با نگاه به «رده‌های نقطه میانی»^۵ که رویکردی مسئله محور را اتخاذ می‌کند و اثرات را به مفاهیم محیط زیستی همچون تغییر اقلیم، سمیت زیست‌بوم، سمیت انسانی و غیره تبدیل می‌کند، روش اجرایی منسجمی لازم است تا شاخص‌های رده متفاوت با مسائل ویژه نانو وفق داده شوند. در این مرحله مهم است تا در ابتدا بر برجسته‌ترین رده‌های مربوط به پتانسیل اثرات نانومواد همچون سمیت انسانی و سمیت زیست‌بوم تمرکز شود.

^۱ Eutrophication
^۲ Ionizing radiation
^۳ Soluble metals
^۴ Amendments
^۵ Midpoint categories

۴.۵ «مرحله چهار: تفسیر»

همانطور که قبلاً ذکر شد، همیشه می‌توان نتایج را در طول ارزیابی تفسیر کرد. این بدان معنی است که تفسیر لزوماً نباید در پایان اتفاق بیفتد. اما با تمام داده‌های موجود، نتیجه‌گیری‌ها و توصیه‌ها مطمئن‌تر خواهد بود.
بر اساس استاندارد ایزو ۲۰۰۶:۱۴۰۴۴، تفسیر یک ارزیابی چرخه حیات باید شامل موارد زیر باشد:

- شناسایی مسائل مهم بر اساس فاز LCI و LCIA
- ارزیابی خود مطالعه، اینکه چقدر کامل است و با حساسیت و پیوستگی انجام شده است یا خیر
- نتیجه‌گیری‌ها، محدودیت‌ها و توصیه‌ها

نتایجی که از ارزیابی حاصل می‌شود:

کل کار با تعیین اهداف شروع شده است. اکنون، پس از اینکه نتایج زیادی در مورد محصول یا خدمات به دست آمده است، می‌توان با استفاده از آن‌ها نتیجه‌گیری را انجام داد، پاسخ به سؤالاتی مانند:

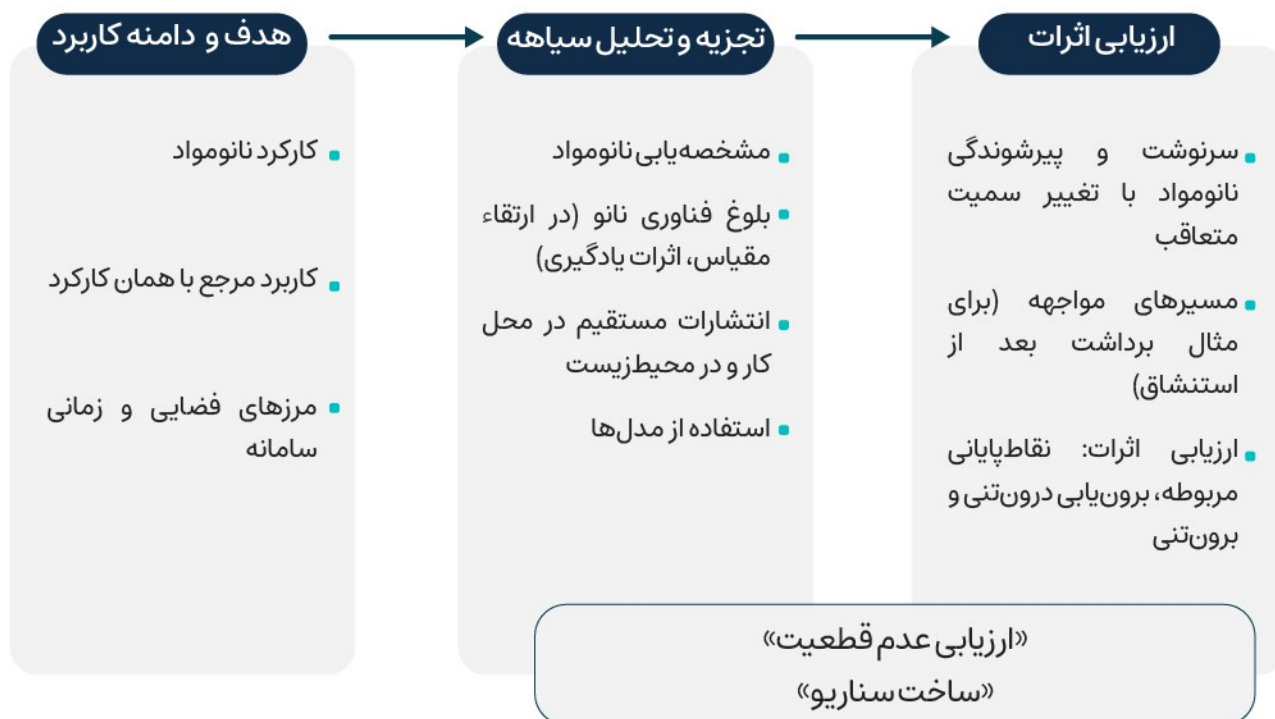
؟ میزان انتشار نانوماده چقدر است؟

؟ در مقایسه با سایر محصولات موجود در مجموعه چگونه است؟

؟ بزرگترین اهرم‌ها برای کاهش تاثیر نانوماده چیست؟

؟ آیا می‌توان در تولید آن کارآمدتر بود؟

در شکل ۷، خلاصه کوتاهی از بندهای ۴ تا ۶ استاندارد ملی شماره ۲۳۱۷۷ (عدم قطعیت، مرحله هدف و دامنه کاربرد و مرحله تجزیه و تحلیل سیاهه) برای بررسی در LCA نانومواد ساخته شده و محصولات نانوپدید ارائه شده است. تجزیه و تحلیل مطالعات LCA در زمینه کاربردهای نانو، چه شامل این موارد باشند یا اگر حداقل در مورد این موارد بحث کنند، ارزشمند است.



شکل ۷ جنبه‌های کلیدی انتخابی برای بررسی هنگام تفسیر یک مطالعه LCA ویژه نانوماده.

یک تفسیر انتقادی از مطالعات LCA می‌تواند براساس سوالات «بله و خیر» به ترتیب زیر انجام شود:

آیا از روش‌های استاندارد شده و پروتکل‌های هماهنگ سازی شده برای مشخصه یابی نانومواد استفاده شده است ؟

اگر نشده است: بررسی کنید که آیا روش‌های استاندارد شده یا پروتکل‌های هماهنگ سازی شده‌ای از قبل موجود هستند یا آیا روش‌های جایگزین بهینه‌تری استفاده می‌شود (در این خصوص مراجع ذی صلاح، همانند کمیسیون اروپا (EC)^۱ یا سازمان‌هایی مانند OECD اسناد مرتبطی را منتشر می‌کنند)؛

آیا مسیرهای مواجهه انسانی و محیط‌زیستی مرتبط، شناسایی و شرح داده شده‌اند ؟

اگر نشده است: بررسی کنید آیا دامنه کاربردی مطالعه LCA شامل مسیرهای مواجهه مرتبطی می‌شود که در ارزیابی مواجهه در نظر گرفته نشده باشد. توصیه می‌شود هر مسیر نادیده گرفته شده‌ای توجیه شده باشد؛

آیا فرایندهای دگرگونی در طول چرخه حیات نانومواد، در ارزیابی اثرات، مواجهه و سرنوشت محیط‌زیستی گنجانده شده است ؟

اگر نشده است: فرایندهای دگرگونی به ندرت در مطالعات LCA گنجانده می‌شوند. با وجود این، اگر سرنوشت، مواجهه و سمیت محصولات/مواد دگرگون شده به طور معناداری با محصول / ماده مادر متفاوت باشد، می‌توانند مرتبط باشند؛

آیا خواص فیزیکی- شیمیایی که می‌توانند بر فراهمی زیستی، سینتیک، و دُز داخلی تاثیرگذار باشد، به میزان کافی شرح داده شده است ؟

برای دسترسی به فهرستی از خواص مرتبط و سودمندی آن‌ها برای تفسیر مطالعه می‌توان به عنوان مثال به استاندارد CEN/TS ۱۷۰۱۰:۲۰۱۶ مراجعه کرد؛

آیا عامل تاثیر از مرتبط‌ترین حالت‌های عمل سمی^۲ در نظر گرفته شده است ؟

مطالعات سمیت اغلب فقط یک حالت عمل را در نظر می‌گیرند. به طور مطلوب، یک مجموعه یا حداقل حالت مبنای عمل^۳ از مقالات شناخته می‌شوند و لذا توصیه می‌شود برای محاسبه عامل تاثیر، متون علمی در نظر گرفته شوند؛

آیا روش‌های بررسی سراسری یا گروه‌بندی تحت بررسی قرار گرفته است؟ اگر چنین است، آیا برپایه سرنوشت محیط‌زیستی، هویت یا کارکرد مشابهی بوده است ؟

به واقع هیچ نانوماده‌ای همتای کاملاً معادل ندارد. اما به هر حال، آزمون‌های سمیت نمی‌توانند روی هر شکلی از یک نانومواد انجام شوند. بنابراین، گروه‌بندی نانومواد مشابه توصیه می‌شود. گروه‌بندی نانومواد مشابه اگرچه باید شامل اختصاصات نانویی باشد، اما توصیه می‌شود در یک گروه از نانومواد تفاوت‌های معناداری در سرنوشت محیط‌زیستی، مواجهه و سمیت، وجود نداشته باشد. توصیه‌های مربوط به روش‌های بررسی سراسری (مواد دارای سرنوشت و رفتار سمی مشابه) و گروه‌بندی (مواد مشابه با فرض واقعی رفتار مشابه) را می‌توانید در متون علمی و اسناد راهنمای منتشر شده از سوی مراجع ذی-صلاح (مانند کمیسیون اروپا) یا سازمان‌هایی (مانند OECD) یافت می‌شود.

آیا تفسیر LCA برگرفته از یک ارزشیابی دقیق از عدم قطعیت‌ها است ؟

در غیر این صورت: یک تفسیر بدون داشتن درک پایه از عدم قطعیت‌های زیربنایی مطالعه فاقد اعتبار است.

اگر کمبودهای معناداری در مطالعه پیدا شود، کار بیشتر بر روی سیاهه، سرنوشت محیط‌زیستی، مواجهه و/یا ارزیابی اثرات، توصیه می‌شود.

^۱ European commission
^۲ Modes of toxic action
^۳ Principal mode of action

همانگونه که در رابطه با مطالعات LCA متداول در بند ۵ استاندارد ملی ایران شماره ۱۴۰۴۴: سال ۱۳۸۶ شرح داده شده است، شفافیت و جامعیت، از موضوعات کلیدی در گزارش‌دهی هستند. شفافیت به این مفهوم است که توصیه می‌شود تمام داده‌های مرتبط، فرضیات و همچنین محدودیت‌های احتمالی، به‌طور واضح و شفاف شرح داده شوند. جامعیت به این معنی است که توصیه می‌شود تا به‌طور واضح بیان شود که این مطالعه چه مواردی را پوشش داده و در کجا کاستی‌های احتمالی در داده‌ها و/یا ارزشیابی‌ها ممکن است وجود داشته باشد.

بنابراین توصیه می‌شود تجزیه و تحلیل عدم قطعیت بخش جدایی‌ناپذیر از گزارش‌دهی باشد.

موضوع شفافیت در مطالعه LCA هنگام پرداختن به مواد نانویی یا محصولات نانوپدید نیز دارای اهمیت بالا یا حتی بالاتری نسبت به مواد شیمیایی متداول است. یک ارزیابی جامع و منسجم می‌تواند فقط با یک مستندسازی شفاف از همه خواص فیزیکی-شیمیایی مرتبط و رهایش نانومواد ساخته شده در طی مراحل چرخه حیات بررسی-شده، انجام شود. این خواص از اهمیت تعیین‌کننده‌ای برای تعیین صحت‌گذاری علمی LCAs نانویژه، برخوردار است.

در چنین مطالعاتی مستندسازی از جنبه‌های نامعلوم^۱ به‌عنوان یک عنصر مهم افزوده شناخته می‌شود، برای مثال: سیاهه داده نامعلوم، فاکتورهای مشخصه‌یابی نامعلوم (و بنابراین، ارزیابی‌های نامعلوم از رهایش‌ها به محیط زیست) و غیره. این کار به خواننده کمک می‌کند تا نقاط قوت و ضعف مطالعه را درک کرده و تفسیری نقادانه از مطالعه را ارائه کند.

^۱ Missing aspects

معرفی نرم افزارهای اجرای LCA

ارزیابی چرخه حیات ممکن است شامل محاسبات بسیار فنی و طولانی باشد. البته، ابزارها و راه حل های نرم افزاری می توانند این کار را آسان تر کنند. در اینجا لیستی از ۱۰ نرم افزار و ابزار برتر ارزیابی چرخه حیات (LCA) آورده شده است:

1. SimaPro <https://simapro.com/>

2. GaBi <https://www.thinkstep.com/products/gabi-software>

3. OpenLCA <https://www.openlca.org/openlca/>

4. Umberto <https://www.ifu.com/umberto/lca-software/>

5. Ecochain Mobius <https://ecochain.com/mobius/>

6. SolidWorks Sustainability <https://www.solidworks.com/product/sustainability>

7. Sphera Gabi <https://sphera.com/life-cycle-assessment-lca-software/>

8. OneClick LCA <https://www.oneclicklca.com/>

9. OpenIO <https://www.open-io.org/>

10. QED LCA <https://www.qedenvironmental.com/services/life-cycle-assessment-lca/>

- ۱ استاندارد ملی شماره ۲۳۱۷۷ - فناوری نانو- رهنمودهایی برای ارزیابی چرخه حیات - کاربرد استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۱۴۰۴۴: سال ۱۳۸۶ برای نانومواد ساخته شده
- ۲ استاندارد ملی شماره ۱۴۰۴۰ - مدیریت زیست محیطی - ارزیابی چرخه حیات - اصول و چارچوب
- ۳ استاندارد ملی شماره ۱۴۰۴۴ - مدیریت زیست محیطی - ارزیابی چرخه حیات - الزامات و راهنمایی‌ها
- ۴ [/https://ecochain.com](https://ecochain.com)
- ۵ [/https://lca-software.org](https://lca-software.org)

