استاندارد ملی ایران
(شمارهٔ استاندارد)
چاپ اول
۱۴۰۱

جمهوری اسلامی ایران
Islamic Republic of Iran
سازمان ملی استاندارد ایران
Iran National Standards Organization

INSO
(Std. No.)
1st Revision
2022

Identical with
CEN/TS 17276:
2018

فناوری نانوـ رهنمودهایی برای ارزیابی چرخه حیات – کاربرد استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۱۴۰۴۴: سال ۱۳۸۶ برای نانومواد ساخته‌شده

Nanotechnologies - Guidelines for life cycle assessment - Application of EN ISO 14044: 2006 to manufactured nanomaterials

ICS: (…….)

استاندارد ملی ایران شماره .....(چاپ اول): سال ۱۴۰۱

سازمان ملی استاندارد ایران

تهران، ضلع جنوب غربی میدان ونک، خیابان ولیعصر، پلاک ۲۵۹۲

صندوق‌پستی: ۶۱۳۹-۱۴۱۵۵ تهران- ایران

تلفن: ۵-۸۸۸۷۹۴۶۱

دورنگار: ۸۸۸۸۷۰۸۰ و ۸۸۸۸۷۱۰۳

کرج، شهر صنعتی، میدان استاندارد

صندوق پستی: ۱۶۳-۳۱۵۸۵ کرج - ایران

تلفن: ۸-۳۲۸۰۶۰۳۱ (۰۲۶)

دورنگار: ۳۲۸۰۸۱۱۴ (۰۲۶)

رایانامه: standard@inso.gov.ir

وبگاه: http://www.inso.gov.ir

Iranian National Standardization Organization (INSO)

No. 2592 Valiasr Ave., South western corner of Vanak Sq., Tehran, Iran

P. O. Box: 14155-6139, Tehran, Iran

Tel: + 98 (21) 88879461-5

Fax: + 98 (21) 88887080, 88887103

Standard Square, Karaj, Iran

P.O. Box: 31585-163, Karaj, Iran

Tel: + 98 (26) 32806031-8

Fax: + 98 (26) 32808114

Email: standard@inso.gov.ir

Website: http://www.inso.gov.ir

به نام خدا

آشنایی با سازمان ملی استاندارد ایران

سازمان ملی استاندارد ایران به موجب بند یک مادهٔ ۷ قانون تقویت و توسعه نظام استاندارد، ابلاغ شده در دی ماه ۱۳۹۶، وظیفهٔ تعیین، تدوین و نشر استانداردهای ملی را برعهده دارد.

تدوین استاندارد در حوزه‌های مختلف در کمیسیون‌های فنی مرکب از کارشناسان سازمان، صاحب‌نظران مراکز و مؤسسات علمی، پژوهشی، تولیدی و اقتصادی آگاه و مرتبط انجام می‌شود و کوششی همگام با مصالح ملی و با توجه به شرایط تولیدی، فناوری و تجاری است که از مشارکت آگاهانه و منصفانهٔ صاحبان حق و نفع، شامل تولیدکنندگان، مصرف‌کنندگان، صادرکنندگان و واردکنندگان، مراکز علمی و تخصصی، نهادها، سازمان‌های دولتی و غیردولتی حاصل می‌شود. پیش‌نویس استانداردهای ملی ایران برای نظرخواهی به مراجع ذی‌نفع و اعضای کمیسیون‌های مربوط ارسال می‌شود و پس از دریافت نظرها و پیشنهادها در کمیتهٔ ملی مرتبط با آن رشته طرح و در صورت تصویب، به‌عنوان استاندارد ملی (رسمی) ایران چاپ و منتشر می‌شود.

پیش‌نویس استانداردهایی که مؤسسات و سازمان‌های علاقه‌مند و ذی‌صلاح نیز با رعایت ضوابط تعیین شده تهیه می‌کنند درکمیته ملی طرح، بررسی و درصورت تصویب، به‌عنوان استاندارد ملی ایران چاپ و منتشر می‌شود. بدین ترتیب، استانداردهایی ملی تلقی می‌شود که بر اساس مقررات استاندارد ملی ایران شمارهٔ ۵ تدوین و در کمیتهٔ ملی استاندارد مربوط که در سازمان ملی استاندارد ایران تشکیل می‌شود به تصویب رسیده باشد.

سازمان ملی استاندارد ایران از اعضای اصلی سازمان بین‌المللی استاندارد (ISO)[1]، کمیسیون بین‌المللی الکتروتکنیک (IEC)[2] و سازمان بین‌المللی اندازه‌شناسی قانونی (OIML)[3] است و به‌عنوان تنها رابط[4] کمیسیون کدکس غذایی (CAC)[5] در کشور فعالیت می‌کند. در تدوین استانداردهای ملی ایران ضمن توجه به شرایط کلی و نیازمندی‌های خاص کشور، از آخرین پیشرفت‌های علمی، فنی و صنعتی جهان و استانداردهای بین‌المللی بهره‌گیری می‌شود.

سازمان ملی استاندارد ایران می‌تواند با رعایت موازین پیش‌بینی شده در قانون، برای حمایت از مصرف‌کنندگان، حفظ سلامت و ایمنی فردی و عمومی، حصول اطمینان از کیفیت محصولات و ملاحظات محیط‌زیستی و اقتصادی، اجرای بعضی از استانداردهای ملی ایران را برای محصولات تولیدی داخل کشور و/یا اقلام وارداتی، با تصویب شورای عالی استاندارد، اجباری کند. سازمان می‌تواند به منظور حفظ بازارهای بین‌المللی برای محصولات کشور، اجرای استاندارد کالاهای صادراتی و درجه‌بندی آن را اجباری کند. همچنین برای اطمینان بخشیدن به استفاده‌کنندگان از خدمات سازمان‌ها و مؤسسات فعال در زمینهٔ مشاوره، آموزش، بازرسی، ممیزی و صدور گواهی سیستم‌های مدیریت کیفیت و مدیریت محیط‌زیستی، آزمایشگاه‌ها و مراکز واسنجی (کالیبراسیون) وسایل سنجش، سازمان ملی استاندارد این‌گونه سازمان‌ها و مؤسسات را براساس ضوابط نظام تأیید صلاحیت ایران ارزیابی می‌کند و در صورت احراز شرایط لازم، گواهینامهٔ تأیید صلاحیت به آن‌ها اعطا و بر کارکرد آن‌ها نظارت می‌کند. ترویج دستگاه بین‌المللی یکاها، واسنجی وسایل سنجش، تعیین عیار فلزات گرانبها و انجام تحقیقات کاربردی برای ارتقای سطح استانداردهای ملی ایران از دیگر وظایف این سازمان است.

1- International Organization for Standardization
2- International Electrotechnical Commission
3- International Organization for Legal Metrology (Organisation Internationale de Metrologie Legals)
4- Contact point
5- Codex Alimentarius Commission

کمیسیون فنی تدوین استاندارد

« فناوری نانو- رهنمودهایی برای ارزیابی چرخه حیات– کاربرد استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۱۴۰۴۴: سال ۱۳۸۶ برای نانومواد ساخته‌شده»

رئیس:	**سمت و/یا محل اشتغال:**
رضی کردمحله، لادن (دکتری محیط‌زیست)	مدیرکل- دفتر حفاظت و مدیریت زیست‌محیطی آب و خاک، سازمان حفاظت محیط‌زیست
دبیر:	
منهاج‌بناء، رابعه (دکتری تخصصی سم‌شناسی)	مدیرعامل- شرکت راهبران توسعه سبز
اعضا: (اسامی به ترتیب حروف الفبا)	
اسلامی‌پور، الهه (کارشناسی ارشد زیست‌شناسی)	کارشناس- گروه استاندارد و ارزیابی محصولات ستاد ویژه توسعه فناوری نانو
بابائی، نادیا دکتری تخصصی مهندسی عمران	کارشناس- دفتر حفاظت و مدیریت زیست محیطی آب و خاک، سازمان حفاظت محیط‌زیست
جلیلی قاضی زاده، مهدی (دکتری تخصصی مهندسی محیط‌زیست)	عضو هیئت علمی- پژوهشکده علوم محیطی دانشگاه شهید بهشتی
سیفی، مهوش (کارشناسی ارشد مدیریت دولتی)	مشاور- گروه استاندارد و ارزیابی محصولات ستاد ویژه توسعه فناوری نانو
سهرابی جهرمی، ابوذر (دکتری تخصصی نانوفناوری)	رئیس هیئت مدیره- شرکت راصد توسعه فناوری‌های پیشرفته
غضنفری، سید محمدحسین (کارشناسی‌ارشد فناوری نانو)	کارشناس- گروه استاندارد و ارزیابی محصولات ستاد ویژه توسعه فناوری نانو
فرهنگ، سمیه (دکتری تخصصی بهداشت حرفه‌ای)	عضو هیئت علمی- دانشگاه شهید بهشتی
قاضی خوانساری، محمود (دکتری تخصصی سم‌شناسی)	عضو هیئت علمی- دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی درمانی تهران

اعضا: (اسامی به ترتیب حروف الفبا)

سمت و/یا محل اشتغال:

گلبابایی، فریده
(دکتری تخصصی بهداشت حرفه‌ای)
عضو هیئت علمی- دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی درمانی تهران

میرابی، مریم
(دکتری تخصصی محیط‌زیست)
عضو هیئت علمی- دانشگاه شهید بهشتی

ویراستار:

سیفی، مهوش
(کارشناسی ارشد مدیریت دولتی)
مشاور- گروه استاندارد و ارزیابی محصولات ستاد ویژه توسعه فناوری نانو

فهرست مندرجات

عنوان **صفحه**

پیش‌گفتار د
مقدمه ذ
۱ هدف و دامنهٔ کاربرد ۱
۲ مراجع الزامی ۱
۳ اصطلاحات و تعاریف ۲
۴ تجزیه‌وتحلیل عدم قطعیت ۱۰
۴-۱ مقدمه‌ای بر عدم قطعیت ۱۰
۴-۲ مشخصه‌یابی ۱۲
۴-۳ شناسایی و گروه‌بندی ۱۲
۴-۴ داده سیاهه چرخه حیات ۱۳
۴-۵ ارزیابی مواجهه ۱۴
۴-۶ ارزیابی سمیت ۱۴
۴-۷ ارزیابی اثرات ۱۵
۵ تعریف هدف و دامنه کاربرد ۱۶
۵-۱ کلیات ۱۶
۵-۲ هدف مطالعه ۱۶
۵-۳ کارکرد و واحد کارکردی ۱۷
۵-۴ محدوده سامانه ۱۸
۵-۵ روش‌شناسی LCIA و انواع اثرات ۱۸
۵-۶ انواع و منابع داده ۱۸
۵-۷ الزامات کیفی داده ۱۹
۵-۸ مقایسه بین سامانه‌ها ۲۰
۵-۹ مثال‌ها ۲۰
۶ تجزیه‌وتحلیل سیاهه چرخه حیات (LCI) ۲۴
۶-۱ کلیات ۲۴
۶-۲ جمع‌آوری داده ۲۶
۶-۳ محاسبه داده ۲۶
۶-۳-۱ کلیات ۲۶
۶-۳-۲ مراحل استفاده و پایان حیات ۲۷

عنوان **صفحه**

۶-۳-۳ شناسایی نانومواد ۲۷
۶-۳-۴ مدل‌سازی سناریو ۲۸
۶-۴ مدل‌های LCA در دسترس ۳۰
۶-۵ تخصیص ۳۱
۶-۶ مثال‌ها ۳۱
۷ ارزیابی اثرات چرخه حیات (LCIA) ۳۴
۷-۱ کلیات ۳۴
۷-۲ مطالعات سمیت زیست‌بوم ۳۵
۷-۳ سمیت انسانی ۳۶
۷-۴ سایر رده‌های نقطه‌میانی ۳۷
۷-۵ رده‌های آسیب ۳۷
۷-۶ تمایزهای زمانی و فضایی ۳۷
۷-۷ مثال‌ها ۳۸
۸ تفسیر چرخه حیات ۴۵
۹ گزارش‌دهی ۴۸
۹-۱ کلیات ۴۸
۹-۲ مثال ها ۴۹
۱۰ بررسی‌های انتقادی ۵۳
پیوست الف (آگاهی دهنده) تجزیه‌وتحلیل عدم قطعیت در LCA نانومواد ساخته‌شده ۵۶
پیوست ب (آگاهی دهنده) مطالعات موردی LCA در زمینه نانومواد‌ساخته‌شده ۶۱
کتابنامه ۶۷

پیش‌گفتار

استاندارد «فناوری نانو- رهنمودهایی برای ارزیابی چرخه حیات- کاربرد استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۱۴۰۴۴: سال ۱۳۸۶ برای نانومواد ساخته‌شده» که پیش‌نویس آن در کمیسیون‌های مربوط بر مبنای پذیرش استانداردهای بین‌المللی/ منطقه‌ای به‌عنوان استاندارد ملی ایران به روش اشاره‌شده در مورد الف، بند ۷، استاندارد ملی ایران شمارهٔ ۵ تهیه و تدوین‌شده، در صدوبیست‌ویکمین اجلاسیه کمیتهٔ ملی استاندارد فناوری نانو مورخ ۱۴۰۱/۷/۱۸ تصویب شد. اینک این استاندارد به استناد بند یک مادهٔ ۷ قانون تقویت و توسعه نظام استاندارد، ابلاغ شده در دی ماه ۱۳۹۶، به‌عنوان استاندارد ملی ایران منتشر می‌شود.

استانداردهای ملی ایران براساس استاندارد ملی ایران شمارهٔ ۵ (استانداردهای ملی ایران- ساختار و شیوهٔ نگارش) تدوین می‌شوند. برای حفظ همگامی و هماهنگی با تحولات و پیشرفت‌های ملی و جهانی درزمینه صنایع، علوم و خدمات، استانداردهای ملی ایران در صورت لزوم تجدیدنظر خواهند شد و هر پیشنهادی که برای اصلاح یا تکمیل این استانداردها ارائه شود، در هنگام تجدیدنظر در کمیسیون فنی مربوط، موردتوجه قرار خواهد گرفت. بنابراین، باید همواره از آخرین تجدیدنظر استانداردهای ملی ایران استفاده کرد.

این استاندارد ملی بر مبنای پذیرش استاندارد منطقه‌ای زیر به روش «معادل یکسان» تهیه و تدوین‌شده و شامل ترجمه تخصصی کامل متن آن به زبان فارسی می‌باشد و معادل یکسان استاندارد بین‌المللی مزبور است:

BS CEN/TS 17276: 2018, Nanotechnologies - Guidelines for life cycle assessment- Application of EN ISO 14044: 2006 to manufactured nanomaterials

مقدمه

این استاندارد، رهنمودهایی را در مورد کاربرد ارزیابی‌های چرخه حیات (LCA)[1] برای نانومواد ساخته‌شده (MNMs)[2] در چارچوب استاندارد ملی ایران- ایزو ۱۴۰۴۴: سال ۱۳۸۶ ارائه می‌کند. این استاندارد نانومواد تصادفی[3] را پوشش نمی‌دهد. این استاندارد برای ارزیابی ریسک مبتنی بر چرخه حیات کاربرد ندارد (برای چنین مطالعاتی به مراجع [1]، [2]، [3] مراجعه شود).

ساختار این استاندارد از ساختار استاندارد ملی ایران شماره ۱۴۰۴۴: سال ۱۳۸۶پیروی می‌کند و مشابه استانداردهای ملی مرتبط [۴]، [۵]، نشان‌دهنده مثال‌های گویایی در مورد نحوه کاربرد مراحل مختلف چارچوب LCA است. جدول ۱، نمای کلی از پیوند بین محتوای این استاندارد و محتوای مرتبط در استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۱۴۰۴۴: سال ۱۳۸۶ را ارائه می‌دهد.

جدول ۱- ارجاعات متقابل بین استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۱۴۰۴۴: سال ۱۳۸۶ و محتوای این استاندارد

استاندارد ملی ایران- ایزو ۱۴۰۴۴: سال ۱۳۸۶		این استاندارد	
		ویژگی- نانو	نمونه(ها)
۱	هدف و دامنه کاربرد	بند ۱	
۲	مراجع الزامی	بند ۲	
۳	اصطلاحات و تعاریف	بند ۳- استفاده از اصطلاح و تعریف برای نانومواد ساخته‌شده و LCA	
		بند ۴- علل عدم قطعیت و تغییرپذیری[4] در LCA نانومواد ساخته‌شده	
۴	چارچوب روش‌شناختی[5] ارزیابی چرخه حیات		
۴-۱	الزامات عمومی		
۴-۲	تعریف هدف و دامنه کاربرد	بند ۵- انتخاب یک واحد کارکردی مناسب	مثال ۱: منسوجات با نانونقره مثال ۲: پوشش‌های نما با نانو- دی‌اکسیدتیتانیم مثال ۳: نانولوله‌های کربنی در الکترونیک
۴-۲-۱	کلیات		
۴-۲-۲	هدف[6] مطالعه		
۴-۲-۳	دامنه[7] مطالعه		

1- Life Cycle Assessments
2- Manufactured nanomaterials
3- Incidental
4- Variability
5- Methodological
6- Goal
7- Scope

جدول ۱- (ادامه)

استاندارد ملی ایران- ایزو ۱۴۰۴۴: سال ۱۳۸۶		این استاندارد	
		ویژگی- نانو	نمونه(ها)
۳-۴	تجزیه‌وتحلیل سیاهه چرخه حیات (LCI)	بند ۶- داده‌های LCI از تولید نانومواد ساخته‌شده؛ مدل‌سازی رهایش‌های نانومواد ساخته‌شده	مثال ۱: منسوجات با نانونقره مثال ۲: پوشش‌های نما با نانو- دی‌اکسیدتیتانیم مثال ۳: نانولوله‌های‌کربنی در الکترونیک
۱-۳-۴	کلیات		
۲-۳-۴	جمع‌آوری داده‌ها		
۳-۳-۴	محاسبه داده‌ها		
۴-۳-۴	تخصیص		
۴-۴	ارزیابی اثرات[1] (پیامد) چرخه حیات (LCIA)[2]	بند ۷- ارزیابی رهایش‌های نانومواد ساخته‌شده	مثال ۱: منسوجات با نانونقره مثال ۲: پوشش‌های نما با نانو- دی‌اکسیدتیتانیم مثال ۳: نانولوله‌های‌کربنی در الکترونیک
۵-۴	تفسیر[3] چرخه حیات	بند ۸- تفسیر LCA با اطلاعات محدود از نانومواد ساخته‌شده	درس‌هایی که از این سه مثال آموخته شده‌است.
۵	گزارش‌دهی	بند ۹- هنگام گزارش‌دهی LCA جنبه‌های مهم نانوویژه[4] را برجسته کنید	درس‌هایی که از این سه مثال آموخته شده‌است
۱-۵	الزامات عمومی		
۲-۵	الزامات تکمیلی		
۳-۵	الزامات گزارش‌دهی بیشتر		
۶	بازنگری منتقدانه	بند ۱۰- در بازنگری سنجش، جنبه‌های مهم نانو را برجسته کنید	درس‌هایی که از این سه مثال آموخته شده‌است
۱-۶	کلیات		
۲-۶	بازنگری منتقدانه توسط کارشناسان		
۳-۶	بازنگری منتقدانه توسط هیئت طرف‌های ذی‌نفع		
پیوست‌ها (آگاهی دهنده)		پیوست **الف** و **ب**	

سه مثال به‌عنوان آگاهی‌دهنده در متن برای توضیح کاربرد LCA درمورد محصولات حاوی نانومواد ساخته‌شده ارائه شده‌است. مثال‌ها شامل منسوجات عمل‌آوری‌شده با نانونقره [6]، پوشش نما نانوبهبودیافته[5]

۱- در استاندارد ملی ایران شماره ۱۴۰۴۴: سال ۱۳۸۶، واژه «Impact» به «پیامد» ترجمه شده‌است. اما با توجه به آنکه درحال‌حاضر در قوانین برنامه کشور (مانند قانون هوای پاک، قانون برنامه ششم و ...) از واژه «اثرات» استفاده می‌شود، بنابراین در این استاندارد از واژه «اثرات» استفاده شده‌است.

2- Life Cycle Impact Assessment

3- Interpretation

4- Nano-specific

5- Nano-enhanced

[7] و خواص الکترونیکی بهبودیافته با (CNT)[1] است [8]. مثال‌ها از میان جامع‌ترین مطالعات LCA در مورد نانومواد ساخته‌شده انتشاریافته (تا اواسط ۲۰۱۷)، انتخاب شده‌است. بررسی عدم قطعیت[2] در بند ۴ و پیوست **الف** موردبحث قرار گرفته‌است. بررسی کوتاه مثال‌های بیشتر (تا اواسط سال ۲۰۱۷) در پیوست **ب** ارائه شده‌است. تجزیه‌وتحلیل‌ها نشان می‌دهد پوشش مطالعات به شکلی مشابه با مطالعه قبلی است [9].

مثال‌های گویایی در بخش‌های متناظر با همان بخش از متن اصلی در استاندارد ملی ایران-ایزو شماره ۱۴۰۴۴: سال ۱۳۸۶ ارائه شده‌است که شامل «جمع‌آوری سیاهه»[3]، «سرنوشت محیط‌زیستی»[4] و «تفسیر و ارزیابی اثرات» است. مقصود از این کار آن است که شاخصه‌های خاص مربوط به نانومواد ساخته‌شده، زمانی که در یک LCA گنجانده می‌شوند، تاکید شوند. «سرنوشت» در این متن به «حضور در» و «انتقال از طریق» یک یا چند محیط (واسط)[5] (به‌عنوان مثال: هوا، خاک و آب) اطلاق می‌شود [10].

جنبه‌های ارائه‌شده همچنین شامل اطلاعات منتشرنشده افزوده و داده‌هایی است که به‌ویژه برای این استاندارد راهنما مفید و گویا است. وضعیت موجود سه نمونه در سه زیربخش در ادامه خلاصه شده‌است. توجه شود که نانومواد ساخته‌شده، شامل دامنه فزاینده‌ای از پیشوندهای توصیف‌گر نانویی، از جمله نانوشیء[6]، نانوفیلم[7]، نانولیف[8] و نانولوله[9] است. در برخی موارد یا در برخی از نقاط چرخه حیات، نانومواد ساخته‌شده ممکن است به شکل انبوهه‌شده[10] یا کلوخه‌شده[11] باشند.

مثال ۱- «منسوجات با نانونقره (nano-Ag)»

هدف از این مثال، مقایسه مزایا و اثرات محیط‌زیستی زیرپیراهنی‌های[12] عمل‌آوری شده با نانونقره با زیرپیراهنی‌های معمولی و زیرپیراهنی‌هایی است که با تری‌کلوزان[13]، یک زیست‌کش[14] که به طور معمول پیشگیری از انتشار بوهای نامطلوب منسوجات به‌کار می‌رود، عمل‌آوری شده‌است.

وضعیت موجود: پوشاک صنعتی[15] باید شاخصه‌های بیشتری مانند بهبود دوام یا محافظت برای کارگران، نفوذناپذیری آب یا روغن برای آتش‌نشانان یا مقاومت باکتریایی (در نوارهای چسب زخم، لباس‌های کادر درمان یا لباس‌های ورزشی) را ارائه دهند. نقره دارای خواص ضدمیکروبی شناخته شده‌است و علاوه‌بر تصفیه

1- Carbon nanotubes
2- Treatment of uncertainty
3- Inventory collection
4- Environmental fate
5- Media
6- Nano-object
7- Nano-film
8- Nano-fibre
9- Nano-tube
10- Aggregated
11- Agglomerated
12- T-shirt
13- Triclosan
14- Biocide
15- Technical garments

آب، همچنین در منسوجات به‌منظور آزادسازی یون‌های سمی برای کشتن باکتری‌ها، کاربرد دارد. نانونقره اثرات ویژه‌ای دارد، به‌دلیل آن‌که می‌تواند به راحتی با الیاف منسوجات ادغام[1] شود و نسبت به جرم یکسان از ذرات بزرگتر، نرخ رهایش یون بالاتری را داشته و ماندگاری طولانی‌تری نسبت به نمک‌های نقره متداول دارد. نانونقره به‌کاررفته در منسوجات ورزشی، رشد باکتری‌ها را مهار می‌کند و در نتیجه بوی ناخواسته را کاهش می‌دهد. در مقایسه با سایر عوامل ضدمیکروبی[2] برای منسوجات، مانند نمک‌های آمونیم چهارتایی[3] یا تری‌کلوزان (که اکنون در بسیاری از کشورها ممنوع شده‌است)، به دلیل ادغام بهتر نانونقره در جرم یکسان، در اثر شستشو، رهایش کمتری را با بروز سمیت میکروبی بالاتر، نشان می‌دهد. یکی دیگر از خواص تبلیغ‌شده در مورد زیرپیراهنی‌های نانونقره این است که دفعات شستشوی کم‌تر با دمای پایین‌تر، سبب صرفه‌جویی در منابع می‌شود. از جنبه منفی، نانونقره ممکن است برای سامانه ضدمیکروبی کارخانه‌های تصفیه فاضلاب مضر باشد و ممکن است در طولانی مدت در محیط انباشته شود. علاوه‌بر این، مواجهه شغلی می‌تواند ضمن تولید نانونقره هنگامی‌که سامانه تولید آزاد با تهویه ضعیف در محل قرار داشته‌باشد، افزایش یابد. درصورت عدم وجود اقدامات حفاظت شخصی، نانونقره ممکن است استنشاق شود. نانونقره می‌تواند وارد ناحیه عمیق ریوی (ناحیه حبابچه‌ای) شده و از سد ریوی- خونی با اثرات سلامتی ناشناخته در طولانی مدت، عبور کند. مصرف‌کنندگان کمتر در معرض ریسک هستند زیرا آزمون‌های سایش[4] (محصولات) نشان داده‌است که احتمال رهایش نانومواد ساخته‌شده آزاد در هوا (و به دنبال آن استنشاق) حداقل است. نفوذ از طریق پوست سالم بسیار بعید است. در پایان حیات زیرپیراهنی‌های نانونقره، گزینه‌های مدیریت پسماندی که از رهایش نانومواد ساخته‌شده به محیط‌زیست جلوگیری کنند، ترجیح داده می‌شوند. «تجزیه‌وتحلیل سناریو» اجازه می‌دهد تا عوامل حساس مختلف مانند دفعات شستشو و دما، نفوذ بازار و بلوغ فناورانه، مورد مطالعه قرار گیرد. سناریوها مستقیماً به «داده‌های سیاهه چرخه حیات» به‌منظور اجرای LCA کامل برای حالت‌های مختلف احتمالی آتی سامانه، مرتبط هستند. مسائل خاص نانو تا آنجا که ممکن است درنظر گرفته شده و نقاط قوت و ضعف چارچوب LCA در مورد افزودن[5] نانونقره مورد بحث قرار گرفته‌است.

مثال ۲- «پوشش‌های نما با نانو- دی‌اکسیدتیتانیم ($nano\text{-}TiO_2$)»

هدف از این مطالعه بررسی اثرات سلامت محیط‌زیست و ایمنی (EHS)[6] نانومواد ساخته‌شده در رنگ‌ها و پوشش‌های مورداستفاده در ساخت خانه است. آخرین تحولات مشاهده‌شده در عوامل ارزیابی اثرات و سیاهه داده‌ها در رهایش نانومواد ساخته‌شده مورداستفاده قرار گرفته‌است.

وضعیت موجود: نمای مدرن ساختمان‌ها باید چندین الزام کارکردی را برآورده کنند. این کارکردها می‌توانند بر یکدیگر تأثیرگذار باشند.

1- Integrated
2- Antimicrobial
3- Quarternary ammoniums salts
4- Abrasion tests
5- Inclusion
6- Environmental Health and Safety

به‌عنوان مثال آیا عایق حرارتی توصیه‌شده (مربوط به صرفه‌جویی در انرژی و تغییرات اقلیمی) یک خانه بر الزامات مربوط به پوشش نمای بیرونی تأثیر می‌گذارد و می‌تواند منجر به افزایش رشد جلبک‌ها و قارچ‌ها شود. در طول مرحله استفاده از آنها، پوشش‌های نمای خارجی در معرض اثرات مختلفی ناشی از مواردی مانند پرتو فرابنفش، باران، رطوبت، گرما، اختلاف دما، آلودگی هوا و آسیب ناشی از خراش[1]، قرار دارند. پوشش‌های نمای داخلی نیز در معرض آسیب خراش و پرتو فرابنفش قرار دارند. انتظار می‌رود در چنین پوشش‌های نمایی، یکپارچگی نانومواد ساخته‌شده پتانسیل قابل‌توجهی را در محصولاتی که کارکردهای بهبودیافته یا جدیدی در زمان استفاده از این پوشش‌های نمایی ارائه می‌دهند، ایجاد کرده‌باشد و در نهایت امکان توسعه موادی را فراهم کند که همزمان چندین کارکرد را ارائه دهند (یعنی به اصطلاح مواد چند کارکردی). همچنین انتظار می‌رود که نانومواد ساخته‌شده سبب بهینه‌سازی برخی از فرایندها در طی تولید پوشش‌های نما شوند، به‌عنوان مثال با کوتاه‌کردن زمان خشک‌شدن پوشش‌ها و همچنین ممکن است دارای پتانسیل پایداری[2] محیط‌زیستی به سبب صرفه‌جویی در مواد، جایگزینی مواد مخاطره‌آمیز یا بهبود دوام این پوشش‌ها، باشند.

سه نوع مختلف از رنگ‌های حاوی انواع مختلف نانومواد ساخته‌شده (رنگ A1: نانو- دی‌اکسیدتیتانیم، رنگ B1: نانونقره، رنگC1: نانو- دی‌اکسیدسیلیسیم) با همان رنگ‌ها، بدون افزودن نانومواد ساخته‌شده (به ترتیب رنگ‌های A2، B2 و C2) مقایسه شده‌اند. در جدول ۲ برخی از داده‌های کلیدی این مطالعه خلاصه شده‌است.

جدول ۲– مشخصه‌های اصلی پوشش‌های نما (مقادیر براساس درون‌داد رنگ صنعتی)

	رنگ A1	رنگ A2	رنگ C1	رنگ C2	رنگ B1	رنگ B2
فلسفه ادغام نانومواد ساخته‌شده	«جانشین‌سازی»		«افزودنی»[1]		«افزودنی»	
زمینه کاربردی	فضای باز	فضای باز	فضای باز	فضای باز	فضای بسته	فضای بسته
طول عمر [سال]	۲۷[a]	۲۰	۲۷[a]	۲۰	۱۰[a]	۱۰
ترکیب‌بندی [درصد وزنی/وزنی]						
مقدار نانومواد ساخته‌شده	۳٫۰	-	۵	-	۰٫۳	-
نوع نانومواد ساخته‌شده	TiO_2	-	SiO_2	-	Ag	-
TiO_2، تراز رنگدانه[2]	۱۳٫۵۸	۱۶٫۵۸	-	-	-	-

1- Addendum
2- Pigment-grade

1- Scratches
2- Sustainability

جدول ۲- (ادامه)

	رنگ A1	رنگ A2	رنگ C1	رنگ C2	رنگ B1	رنگ B2
کف‌زدای[1] سیلیکونی	۱۰٫۹۷	۱۰٫۹۷	۰٫۳	۰٫۳	۰٫۶	۰٫۶
استایرن/ اکریلیک هم‌بسپار[2]	۱۴٫۶۲	۱۴٫۶۲	۲۳٫۳	۲۳٫۳	۲۸٫۱	۲۸٫۱
کربنات کلسیم (پرکننده)	۳۱٫۷۵	۳۱٫۷۵	۴۶	۴۶	۳۳٫۲	۳۳٫۲
تالک (پرکننده)	۶٫۵۸	۶٫۵۸	-	-	۱۰٫۱	۱۰٫۱
سایر اجزاء	۵٫۲	۵٫۲	۱٫۷	۱٫۷	۲	۴٫۷
آب	۱۱٫۳	۱۴٫۳	۱۵٫۲	۲۸٫۷	۲۳	۲۳

[a] فرضیه (نتیجه بحث با نمایندگان صنعت رنگ): در فضای باز کاربردهای رنگ‌های حاوی نانومواد ساخته‌شده ٪ ۳۰ طول عمر بیشتری دارند. در کاربردهای داخلی طول عمر بالاتری درنظر گرفته نشده‌است.

1- Defoamer
2- Copolymer

مثال ۳- «نانولوله‌های کربنی (CNTs) در الکترونیک»

هدف از این مثال ایجاد یک ارزیابی جامع از پایداری بوم‌شناختی[1] دستگاه تلویزیون با یک نمایشگر نشر میدانی (FED)[2] با استفاده از آخرین پیشرفت‌ها در زمینه LCA نانومواد ساخته‌شده (یعنی مدل‌سازی سیاهه و ارزیابی اثرات) مطابق با استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۱۴۰۴۴: سال ۱۳۸۶ است. در مرحله دوم، این فناوری جدید با دستگاه‌های تلویزیونی که از فناوری‌های رایج نمایشگر استفاده می‌کنند، مقایسه می‌شود.

وضعیت موجود: CNTs مولکول‌های کربن استوانه‌ای شکل با خواص جدید (استحکام فوق‌العاده، خواص الکتریکی منحصربه‌فرد) و رسانای کارآمد گرمایی هستند که آنها را به‌ویژه برای صنعت الکترونیک موردتوجه قرار می‌دهد. این ماده فرصت بزرگی را برای ساخت یک نسل جدید از محصولات الکترونیکی و الکتریکی؛ کوچک‌تر، تمیزتر، قوی‌تر، سبک‌تر و دقیق‌تر، فراهم می‌کند. یکی از امیدوارکننده‌ترین جنبه‌ها، خواص الکترونیکی منحصربه‌فرد CNT است. مطابق با مرجع [11] «CNT می‌تواند، در اصل، همان نقشی را ایفا کند که سیلیکون در مدارهای الکترونیکی انجام می‌دهد، اما در یک مقیاس مولکولی سیلیکون و سایر نیمه‌هادی‌های استاندارد، عمل نمی‌کند». بنابراین «نانو» در این بخش صنعت مورد توجه قرارگرفته و نه‌تنها به‌عنوان تبلیغات، بلکه نشان‌دهنده پتانسیل واقعی آینده است. در بخش الکترونیک، نمایشگرها به‌عنوان یک رابط مهم بین انسان‌ها در ارتباطات مبتنی بر ماشین، می‌توانند درنظر گرفته شوند. حوزه فناوری‌های نمایشگر از دهه ۱۹۲۰ تحت سلطه فناوری لوله تابش کاتدی (CRT)[3] با بسیاری از فناوری‌های مختلف صفحه نمایش تخت که در میان آنها فناوری نمایشگر نشر میدانی (FED) که از اواخر قرن بیستم توسعه یافته‌است، قرار دارد. فناوری FED را می‌توان به بهترین نحو با فناوری CRT مقایسه کرد، زیرا هردوی آنها

1- Ecological
2- Field Emission Display
3- Cathode ray tube

براساس اصل کاتدی است که (در خلاء) الکترون‌ها را به سمت یک صفحه شیشه‌ای پوشیده از فسفر پرتاب می‌کنند. بااین حال، درحالی‌که در فناوری CRT فقط یک کاتد استفاده می‌شود، در فناوری FED از یک کاتد مجزا برای هر پیکسل[1] (تصویردانه) منفرد استفاده می‌شود. به این ترتیب، این فناوری ساخت دستگاه‌هایی با ویژگی‌های بسیار امیدوارکننده (مانند صفحه نمایش نازک و خودتابش، تصویر بدون اعوجاج، زاویه دید گسترده) را امکان‌پذیر می‌کند. یک چالش بزرگ در فناوری FED موضوع میکروساخت کاتدها است؛ به‌منظور داشتن یک کاتد در هر پیکسل، CNTs یک گزینه ارزشمند برای این هدف هستند.

1- Pixel

فناوری نانوـ رهنمودهایی برای ارزیابی چرخه حیات– کاربرد استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۱۴۰۴۴: سال ۱۳۸۶ برای نانومواد ساخته‌شده

۱ هدف و دامنهٔ کاربرد

هدف از تدوین این استاندارد ارائه رهنمودهایی برای کاربرد ارزیابی‌های چرخه حیات (LCA) مرتبط با نانومواد ساخته‌شده (MNMs)، از جمله استفاده از آن‌ها در محصولات دیگر، با توجه به استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۱۴۰۴۴: سال ۱۳۸۶ است. این استاندارد نانومواد تصادفی را پوشش نمی‌دهد.

۲ مراجع الزامی

در مراجع زیر ضوابطی وجود دارد که در متن این استاندارد به‌صورت الزامی به آن‌ها ارجاع داده شده است. بدین‌ترتیب، آن ضوابط جزئی از این استاندارد محسوب می‌شوند.

درصورتی‌که به مرجعی با ذکر تاریخ انتشار ارجاع داده شده باشد، اصلاحیه‌ها و تجدیدنظرهای بعدی آن برای این استاندارد الزام‌آور نیست. در مورد مراجعی که بدون ذکر تاریخ انتشار آن‌ها ارجاع داده شده‌است، همواره آخرین تجدیدنظر و اصلاحیه‌های بعدی برای این استاندارد الزام‌آور است.

استفاده از مراجع زیر برای کاربرد این استاندارد الزامی است:

۲-۱ استاندارد ملی ایران شماره ۲-۷۴۴۲: سال ۱۳۸۴، درستی (صحت و دقت) روش‌ها و نتایج اندازه‌گیری- قسمت دوم: روش پایه برای تعیین تکرارپذیری و تجدیدپذیری روش اندازه‌گیری استاندارد

۲-۲ استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۱۴۰۴۰: سال ۱۳۸۶، مدیریت زیست‌محیطی- ارزیابی چرخه حیات- اصول و چارچوب

۲-۳ استاندارد استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۱۴۰۴۴: سال ۱۳۸۶، مدیریت محیط زیست- ارزیابی چرخه حیات-الزامات و راهنمایی‌ها

2-4 CEN/TS 17010:2016, Nanotechnologies -Guidance on measurands for characterising nano-objects and materials that contain them

۳ اصطلاحات و تعاریف

در این استاندارد، اصطلاحات با تعاریف زیر به‌کار می‌رود[۱].

۱-۳

نانومقیاس

nanoscale

دامنه کاربرد اندازه بین تقریبا ۱ نانومتر تا ۱۰۰ نانومتر است.

یادآوری- خواصی که از اندازه‌های بزرگتر برون‌یابی نمی‌شوند غالبا در این دامنه کاربرد اندازه نشان داده می‌شوند.

[منبع: زیربند ۲-۱، استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۱-۸۰۰۰۴: سال ۱۳۹۵]

۲-۳

نانوشیء

nano-object

هر قطعه مجزا از ماده با یک، دو و یا سه بعد خارجی در *نانومقیاس* (۳-۱) است.

یادآوری- ابعاد خارجی دوم و سوم عمود بر بعد اول و همچنین عمود بر یکدیگر هستند.

[منبع: زیربند ۲-۵، استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۱-۸۰۰۰۴: سال ۱۳۹۵)]

۳-۳

نانوماده ساخته‌شده

manufactured nanomaterial

نانوماده‌ای که برای داشتن خواص و یا ترکیبی خاص به‌طور هدفمند تهیه شده‌است.

[منبع: زیربند ۲-۹، استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۱-۸۰۰۰۴: سال ۱۳۹۵]

۴-۳

نانوماده تصادفی

incidental nanomaterial

نانوماده‌ای که به‌صورت محصول جانبی غیرهدفمند از یک فرایند ایجاد شده‌است.

۱- اصطلاحات و تعاریف به‌کاررفته در استانداردهای ISO و IEC در وبگاه‌های www.iso.org/obp و www.electropedia.org قابل‌دسترس است.

یادآوری ۱- این فرایند شامل ساخت، فرایندهای فناوری- زیستی و سایر فرایندها است.

یادآوری ۲- برای «ذره بسیارریز» به زیربند ۲-۲۱، استاندارد ملی ایران شماره ۲۲۴۸۳: سال ۱۳۹۶مراجعه شود.

[منبع: زیربند ۲-۱۰، استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۱-۸۰۰۰۴: سال ۱۳۹۵]

۳-۵

کلوخه

agglomerate

مجموعه‌ای از *ذرات* (۳-۱۰) که به شکل ضعیف یا نسبتاً قوی به یکدیگر متصل شده‌اند، به‌طوری که مساحت سطح خارجی حاصل آنها مشابه مجموع مساحت سطوح تک‌تک اجزاء تشکیل‌دهنده باشد.

یادآوری ۱- نیروهایی که کلوخه را نزدیک به یکدیگر نگه‌می‌دارد، نیروهای ضعیفی هستند، مانند نیروهای وان‌دروالسی و یا درهم‌تافتگی‌های فیزیکی ساده.

یادآوری ۲- کلوخه‌ها به‌عنوان ذرات ثانویه نیز درنظر گرفته می‌شوند و ذرات اصلی منشاء، ذرات اولیه نامیده می‌شوند.

[منبع: زیربند ۳-۴، استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۲-۸۰۰۰۴: سال ۱۳۹۵]

۳-۶

انبوهه

aggregate

مجموعه‌ای از ذرات با پیوندهای قوی یا جوش‌خورده که مساحت سطح خارجی حاصل آنها به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای کمتر از مجموع مساحت سطوح تک‌تک اجزاء تشکیل‌دهنده باشد.

یادآوری ۱- نیروهایی که یک انبوهه را کنار یکدیگر نگه می‌دارد، نیروهای قوی هستند، مانند پیوندهای کووالانسی یا یونی و یا نتیجه جوش‌خوردن و گره‌خوردگی فیزیکی پیچیده، یا درغیر این‌صورت، ذرات اولیه به هم چسبیده قبلی.

یادآوری ۲- انبوهه‌ها به‌عنوان ذرات ثانویه نیز درنظر گرفته می‌شوند و ذرات اصلی منشاء، ذرات اولیه نامیده می‌شوند.

[منبع: زیربند ۳-۵، استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۲-۸۰۰۰۴: سال ۱۳۹۵]

۳-۷

فناوری نانو

nanotechnology

به‌کارگیری دانسته‌های علمی برای ساخت و کنترل مواد نانومقیاس است تا از خواص مرتبط با اندازه و ساختار و پدیده متمایز با موارد مرتبط با مولکول‌ها یا اتم‌های جداگانه یا مواد توده‌ای بهره‌گیری شود.

یادآوری- سنتز ماده شامل ساخت و کنترل است.

[منبع: زیربند ۲-۳، استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۱-۸۰۰۰۴: سال ۱۳۹۵]

۸-۳

چرخه حیات

life cycle

مراحل متوالی و به‌هم پیوسته یک سامانه محصول، از زمان استخراج مواد خام یا استحصال آن‌ها از منابع طبیعی تا دفع نهایی است.

[منبع: زیربند ۳-۱، استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۱۴۰۴۰: سال ۱۳۸۶]

۹-۳

ارزیابی چرخه حیات

life cycle assessment, LCA

گردآوری و ارزشیابی دروندادها، بروندادها و اثرات بالقوه محیط‌زیستی یک سامانه محصول در تمام چرخه حیات آن است.

[منبع: زیربند ۳-۲، استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۱۴۰۴۰: سال ۱۳۸۶]

۱۰-۳

تجزیه‌وتحلیل سیاهه چرخه حیات

life cycle inventory analysis, LCI

مرحله‌ای از ارزیابی چرخه حیات شامل گردآوری و کمی‌سازی دروندادها و بروندادهای یک محصول در طول چرخه حیات آن است.

[منبع: زیربند ۳-۳، استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۱۴۰۴۰: سال ۱۳۸۶]

۱۱-۳

ارزیابی اثرات چرخه حیات

life cycle impact assessment, LCIA

مرحله‌ای از ارزیابی چرخه حیات به‌منظور درک و ارزشیابی بزرگی و اهمیت اثرات بالقوه محیط‌زیستی برای یک سامانه محصول در طول چرخه حیات محصول است.

[منبع: زیربند ۳-۴، استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۱۴۰۴۰: سال ۱۳۸۶]

۱۲-۳

جریان مرجع

reference flow

میزان بروندادها از فرایندها در یک سامانه محصول معین که برای تکمیل وظیفه بیان‌شده توسط واحد کارکردی، لازم است.

[منبع: زیربند ۳-۲۹، استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۱۴۰۴۰: سال ۱۳۸۶- تغییریافته]

۱۳-۳

واحد کارکردی

functional unit

عملکرد کمی‌شده یک سامانه محصول برای استفاده به‌عنوان یک واحد مرجع است.

[منبع: زیربند ۳-۲۰، استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۱۴۰۴۰: سال ۱۳۸۶- تغییریافته]

۱۴-۳

برونداد

output

محصول، ماده یا جریان انرژی که از یک فرایند واحد خارج می‌شود.

یادآوری - محصولات و مواد شامل مواد خام، محصولات میانی، محصولات جانبی[1] و رهایش‌یافته‌ها است.

[منبع: زیربند ۳-۲۵، استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۱۴۰۴۰: سال ۱۳۸۶- تغییریافته]

۱۵-۳

محصول

product

هرگونه کالا یا خدمت است.

یادآوری ۱- محصول را می‌توان به‌صورت زیر رده‌بندی کرد:

- خدمات (برای مثال حمل‌ونقل)؛
- نرم‌افزار (برای مثال: برنامه رایانه‌ای، فرهنگ لغت)؛
- سخت‌افزار (مانند: بخش مکانیکی موتور)؛
- مواد فراوری‌شده (مانند: روان‌ساز[2]).

1- Co-products
2- Lubricant

یادآوری ۲- خدمات شامل عناصر ملموس و غیرملموس می‌شود. ضوابط یک خدمت می‌تواند برای مثال شامل موارد زیر باشد:

- فعالیتی که بر روی محصول ملموس مشتری – تامین‌کننده انجام شده‌است، (برای مثال: تعمیر خودرو)؛
- فعالیتی که بر روی محصول غیرملموس مشتری – تامین‌کننده انجام شده‌است، (برای مثال: صورت وضعیت درآمد برای تکمیل اظهارنامه مالیاتی)؛
- تحویل یک محصول ناملموس (برای مثال: جابه‌جایی اطلاعات در محتوای انتقال دانش)؛
- ایجاد محیط مطلوب برای مشتری (برای مثال: در هتل‌ها و رستوران‌ها).

نرم‌افزار شامل اطلاعات می‌شود و معمولا ناملموس است و می‌تواند به شکل رویکردها، فعالیت‌های تجاری یا روش‌های اجرایی باشند.

سخت‌افزار به‌طور کلی ملموس است و مقدار آن یک مشخصه قابل‌شمارش است. مواد فراوری‌شده به‌طور کلی ملموس و مقدار آن یک مشخصه مستمر است.

یادآوری ۳- برگرفته از استانداردهای EN ISO 14021: 2001 و EN ISO 9000: 2005.

[منبع: زیربند ۳-۹، استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۱۴۰۴۰: سال ۱۳۸۶]

۳-۱۶

محدوده سامانه

system boundary

مجموعه‌ای از معیارها که مشخص می‌کنند کدام فرایندهای واحد، بخشی از یک سامانه محصول هستند.

[منبع: زیربند ۳-۳۲، استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۱۴۰۴۴: سال ۱۳۸۶]

۳-۱۷

جریان اولیه

elementary flow

ماده یا انرژی که بدون تغییر شکل قبلی توسط انسان به سامانه مورد مطالعه وارد شده یا ماده یا انرژی که بدون تغییر شکل بعدی توسط انسان از سامانه مورد مطالعه خارج و در محیط‌زیست رها می‌شود.

[منبع: زیربند ۳-۱۲، استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۱۴۰۴۰: سال ۱۳۸۶]

۳-۱۸

جریان محصول

product flow

محصولات ورودی از/یا خروجی به سامانه محصول دیگر است.

[منبع: زیربند ۳-۲۷، استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۱۴۰۴۰: سال ۱۳۸۶]

۳-۱۹

سامانه محصول

product system

مجموعه‌ای از فرایندهای واحد با جریان‌های اولیه و محصول که یک یا چند کارکرد تعریف‌شده را انجام می‌دهند و الگوی چرخه حیات از یک محصول هستند.

[منبع: زیربند ۳-۲۸، استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۱۴۰۴۰: سال ۱۳۸۶]

۳-۲۰

تراکم اثر

effect concentration, ECx

تراکم محاسبه‌شده که از آن تاثیر x درصدی انتظار می‌رود (به‌کاررفته در ارزیابی ریسک بوم‌شناختی).

[منبع: زیربند 6.2، استاندارد EN ISO 18220: 2016]

۳-۲۱

فاکتور مشخصه‌یابی

characterization factor

فاکتور برگرفته از یک مدل مشخصه‌یابی که برای تبدیل نتیجه یک تجزیه‌وتحلیل سیاهه چرخه حیات تخصیص‌یافته به یک واحد مشترک از شاخص رده، به‌کاربرده می‌شود.

یادآوری- واحد مشترک، امکان محاسبه نتیجه شاخص رده را مهیا می‌سازد.

[منبع: زیربند ۳-۳۷، استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۱۴۰۴۰: سال ۱۳۸۶-تغییریافته]

۳-۲۲

جنبه محیط‌زیستی

environmental aspect

بخشی از فعالیت‌ها، محصولات یا خدمات یک سازمان که می‌تواند با محیط‌زیست تاثیر متقابل داشته باشد.

[منبع: زیربند ۳-۸، استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۱۴۰۴۰: سال ۱۳۸۶]

۳-۲۳

دُز مبنا

benchmark dose
BMD

به‌عنوان دُز مرتبط با یک واکنش مبنای معین (به‌طور مثال $BMD_{x\%}$) تعریف می‌شود و در ارزیابی ریسک انسانی به‌کار می‌رود، مشابه با تراکم موثر (EC، به زیربند ۳-۲۰ مراجعه شود) که در ارزیابی ریسک بوم‌شناختی به‌کار می‌رود.

[منبع: زیربند 5.3، استاندارد ISO 19020: 2017]

۲۴-۳

مسیر پیامد نامطلوب

adverse outcome pathway

AOP

ترتیب منطقی از پیوند اتفاقی رویدادها در سطوح مختلف سازمان زیست‌شناختی[1] که مواجهه با یک ماده شیمیایی و رسیدن به یک اثر نامطلوب در سلامت انسان‌ها یا حیات‌وحش را دنبال می‌کند.

[منبع: (OECD 2016)[2]، (کتاب راهنمای کاربران با متن راهنما برای توسعه و ارزیابی «مسیرهای اثرات نامطلوب»)، «مجموعه OECD در زمینه مسیرهای پیامد نامطلوب»، شماره ۱، انتشارات OECD، پاریس]

۲۵-۳

اندازه‌ده

measurand

کمیت موردنظر برای اندازه‌گیری است.

یادآوری ۱- تعیین مشخصات یک اندازه‌ده مستلزم آگاهی داشتن از نوع کمیت، توصیف وضعیت پدیده، جسم یا ماده حامل کمیت، هر یک از مؤلفه مربوط و ماهیت مواد شیمیایی دخیل در آن است.

یادآوری ۲- در ویرایش دوم VIM[3] و استاندارد IEC 60050-300:2001، اندازه‌ده به‌صورت «کمیت ویژه‌ای که اندازه‌گیری می‌شود» تعریف شده‌است.

یادآوری ۳- اندازه‌گیری، شامل سامانه اندازه‌گیری و شرایطی است که تحت آن اندازه‌گیری انجام می‌شود و ممکن است پدیده، جسم یا ماده را به‌گونه‌ای تغییر دهد که کمیت مورد اندازه‌گیری با اندازه‌ده تعریف‌شده، اختلاف پیدا کند. در چنین مواردی، اعمال تصحیح ضروری است.

مثال ۱: اختلاف پتانسیل بین پایانه‌های یک باتری ممکن است هنگام استفاده از ولت‌متر با هدایت داخلی بالا در اندازه‌گیری کاهش یابد. اختلاف پتانسیل مدار باز را می‌توان از طریق مقاومت‌های داخلی باتری و ولت‌متر به‌دست آورد.

مثال ۲: طول یک میله فولادی در تعادل با محیطی با دمای ۲۳ درجه سلسیوس با طول در دمای مشخص ۲۰ درجه سلسیوس (که کمیت اندازه‌ده است)، اختلاف دارد. در چنین مواردی، اعمال تصحیح ضروری است.

1- Biological organization
2- Organization for Economic Co-operation and Development
3- International Vocabulary of Metrology – Basic and General Concepts and Associated Terms

یادآوری ۴- در شیمی، «آنالیت» یا نام یک ماده یا ترکیب، واژگانی هستند که گاهی اوقات برای «اندازه‌ده» استفاده می‌شود. استفاده از این واژه اشتباه است زیرا به کمیت‌ها اشاره نمی‌کند.

[منبع: زیربند ۳-۳، استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۴۷۲۳: سال ۱۳۹۰]

۲۶-۳

تخصیص

allocation

تفکیک[1] جریان‌های درون‌داد یا برونداد در یک فرایند یا یک سامانه محصول، بین سامانه محصول مورد مطالعه و سامانه‌های یک یا چند محصول دیگر است.

[منبع: زیربند ۳-۱۷، استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۱۴۰۴۰: سال ۱۳۸۶]

۲۷-۳

تجزیه و تحلیل عدم قطعیت

uncertainty analysis

روش اجرایی نظام‌مند برای کمی‌سازی عدم قطعیت واردشده در نتایج یک تجزیه‌وتحلیل سیاهه چرخه حیات، ناشی از اثرات تجمعی نادرستی[2] مدل و عدم قطعیت درونداد و تغییرپذیری[3] داده‌ها است.

یادآوری- دامنه تغییرات یا توزیع احتمالات برای تعیین عدم قطعیت در نتایج استفاده می‌شوند.

[منبع: زیربند ۳-۳۳، استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۱۴۰۴۰: سال ۱۳۸۶]

۲۸-۳

تجزیه‌وتحلیل حساسیت

sensitivity analysis

روش‌های اجرایی نظام‌مند برای برآورد اثرات ناشی از روش‌ها و داده‌های انتخاب‌شده در یک مطالعه است.

[منبع: زیربند ۳-۳۱، استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۱۴۰۴۰: سال ۱۳۸۶]

1- Partitioning
2- Inaccuracy
3- Variability

۴ تجزیه‌وتحلیل عدم قطعیت

۴-۱ مقدمه‌ای بر عدم قطعیت

عدم قطعیت برای تمام مطالعات ارزیابی چرخه حیات (LCA) نهفته است و تفسیر نتایج آنها را پیچیده می‌کند. هنگام کاربرد LCA در زمینه نانومواد ساخته‌شده، عدم قطعیت به‌عنوان یک مسئله ویژه درمورد وضعیت نانوفناوری که یک فناوری درحال ظهور است، درنظر گرفته می‌شود، چون داده کاملی برای بسیاری از جنبه‌های آن دردسترس نیست.

در LCA ، انواع و منابع مختلف عدم قطعیت وجود دارد و تنها برخی از آنها مختص نانومواد ساخته‌شده هستند. در اینجا، تمایز بین «عدم قطعیت» و «تغییرپذیری (پراکندگی)» ضروری است. «عدم قطعیت» در مواردی مانند اندازه‌گیری نادرست، داده ناقص و غیره پدید می‌آید که می‌تواند با اندازه‌گیری درست‌تر کاهش یابد، ولی «تغییرپذیری» از تغییرات در دنیای طبیعی نشات می‌گیرد و بنابراین نمی‌تواند با اندازه‌گیری بیشتر کاهش یابد [13] [12] . دلایل اصلی و دلایل جزئی‌تر LCAs نانوویژه[1] در شکل ۱ ارائه شده‌است.

یادآوری- در شکل ۱ بین عدم قطعیت و تغییرپذیری تمایزی درنظرگرفته نشده‌است.

علل مجزا با در نظر گرفتن پتانسیل بهبود آنها می‌توانند برای عدم قطعیت نهایی نتایج، به‌طور جداگانه بررسی شود.

عدم قطعیت‌های جهانی همراه با یک LCA نانوویژه، شامل موارد کمی یا کیفی است. این تجزیه‌وتحلیل، تصمیمات آگاهانه‌تری را به‌منظور:

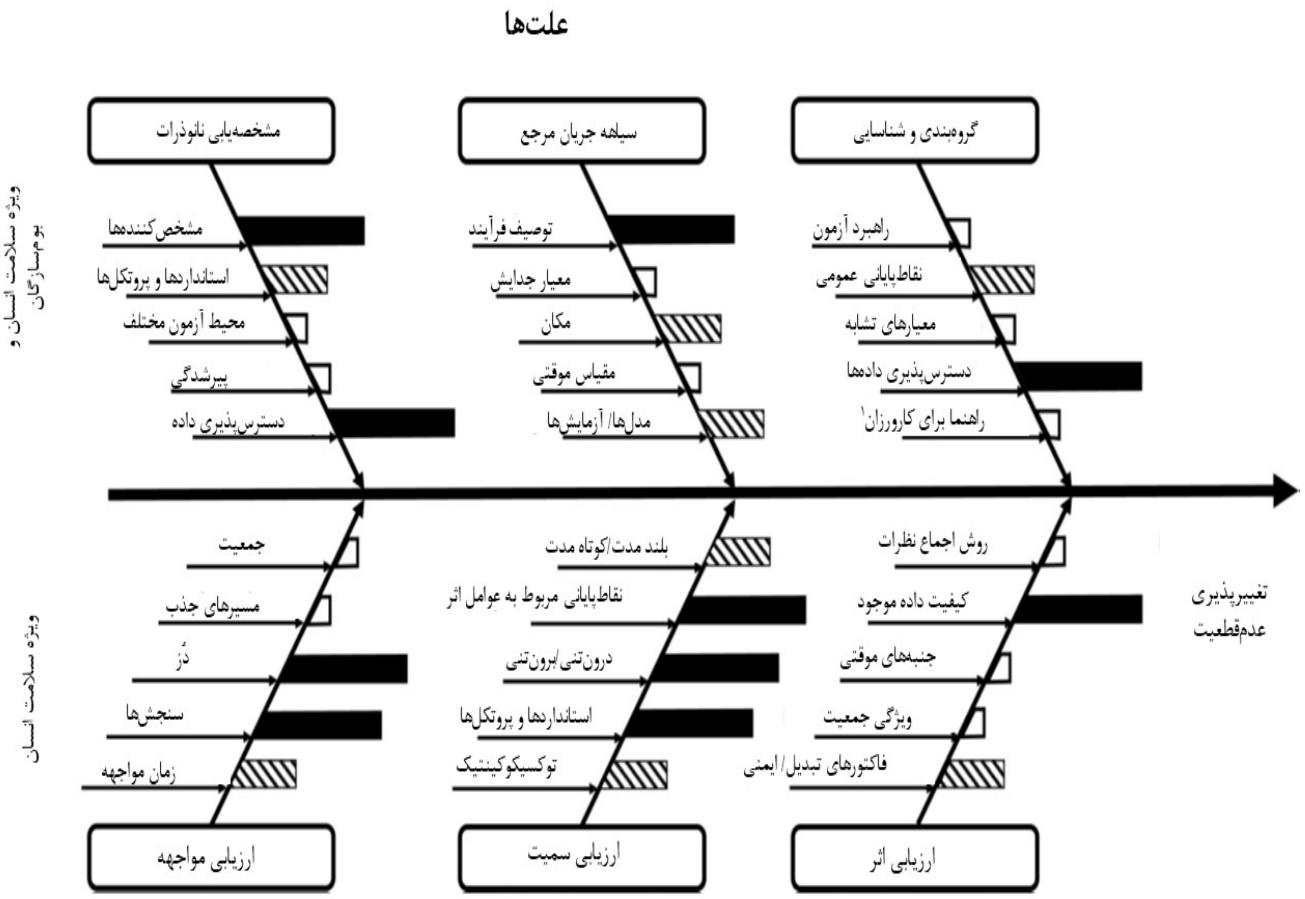
-کاهش فشارهای محیط‌زیستی یا انسانی؛

- شناسایی هر پتانسیل بهبود (یعنی کاهش عدم قطعیت)؛

برای داده‌های موردنظر امکان‌پذیر می‌کند.

1- Nano-specific

یادآوری می‌شود که ادغام نانومواد ساخته‌شده در LCA ممکن است به عدم قطعیت‌های بیشتری منجر شود، اما لزوماً ارزش اطلاعاتی نتایج کلی ارزیابی اثرات چرخه حیات (LCIA) را از منظر عدم قطعیت‌های کلی که به‌طور معمول مرتبط با سیاهه داده موجود است را تضعیف[1] نمی‌کند. علل اصلی عدم قطعیت و تغییرپذیری در LCA نانومواد ساخته‌شده که در شکل ۱ ترسیم شده‌است در بندهای زیر بیشتر موردبحث قرار می‌گیرد.



1- Practitioners

یادآوری- طول میله‌ها، به‌طور کیفی قدرت تاثیر بر تغییرپذیری و عدم قطعیت را نشان می‌دهد. طول بلند/سیاه رنگ= قوی؛ طول متوسط/هاشورخورده= میانه؛ طول کوتاه/سفید=کم (قضاوت کارشناسی برای یک مورد با سیاهه داده جامع اما با تصدیق روش‌های اتخاذشده رایج، نه‌چندان مطلوب برای اندازه‌گیری و مدل‌سازی سرنوشت محیط‌زیستی، مواجهه و سمیت).

شکل ۱- علل اصلی و فرعی برای تغییرپذیری و عدم قطعیت LCAs نانوویژه

1- Compromise

۴-۲ مشخصه‌یابی

ارزیابی مطلوب از اثر و سرنوشت، به شدت متکی به مشخصه‌یابی جامعی از نانومواد است (به استاندارد CEN/TS 17010:2016 مراجعه شود). علاوه‌بر ترکیب‌بندی عنصری و ساختار، توزیع اندازه و تجزیه‌وتحلیل جزئیات از پوشش هر ذره، می‌تواند ارزشی بنیادین به درک ویژگی‌های نانومواد بیافزاید. روش اندازه‌گیری می‌تواند بر عدم قطعیت مشخصه‌یابی نانومواد تاثیر گذارد. بنابراین، فقط داده‌های برگرفته از دستگاه‌های کالیبره‌شده[۱] با درستی[۲] معلوم باید در LCA گنجانده شوند. دستگاه‌های اندازه‌گیری گوناگون می‌توانند برحسب محیط[۳] یا ماتریس[۴] محصولی که در آن نانومواد جاسازی[۵] شده‌است، استفاده شود. استانداردهای مرتبط مورد موافقت بین‌المللی می‌توانند به انتخاب و کاربرد روش درست کمک کنند. استانداردها همچنین به‌طرز مطلوبی اطلاعاتی درباره منابع عدم قطعیت در اندازه‌گیری‌ها را فراهم می کنند و داده درست با روش به‌دست آمده در مقایسات نظام‌مند بین‌آزمایشگاهی[۶] مطابق با استاندارد ملی ایران شماره ۲-۷۴۴۲: سال ۱۳۸۴، را ارائه می‌کنند.

LCA تجزیه‌وتحلیلی از نانومواد را در سراسر چرخه حیات آنها ارائه می‌دهد و بنابراین توصیه می‌شود «پیرشوندگی» نانومواد نیز مدنظر قرار گیرد. معمولا، یک ترکیب شیمیایی در LCA فقط یک‌بار مشخصه‌یابی‌شده و سپس به همان فاکتور مشخصه‌یابی (بنابراین، این موضوع فقط نانوویژه نیست) مربوط می‌شود. باتوجه به پتانسیل تغییر خواص فیزیکی-شیمیایی نانومواد در طول چرخه حیات آنها، مهم است یک نقطه زمانی، جایی‌که در آن مشخصه‌یابی نانومواد به بهترین شکل نشان‌دهنده نانومواد «نماینده»[۷] برای ارزیابی اثرات بیشتر باشد، به‌دقت انتخاب شود. تجزیه‌وتحلیل با جزئیات بیشتر در کاهش عدم قطعیت‌ها و بهبود استحکام[۸] معمولا امکان‌پذیر یا مقرون به‌صرفه نیست. به‌طور معمول، به‌دلیل کمبود کلی داده‌های مشخصه‌یابی در تجزیه‌وتحلیل، LCA نانومواد تحت‌بررسی، شرایط قطعیت کمتری دارد.

۴-۳ شناسایی و گروه‌بندی

احتمالا نانومواده‌ای مشابه نانوماده دیگر وجود ندارد. حتی دسته‌های[۹] نانومواد ساخته‌شده که ادعا می‌شود از یک نوع[۱۰] نانوذره هستند، در اندازه و شکل مغایرت[۱۱] داشته و بنابراین هویت‌های متفاوتی دارند. به‌دلایل عملی، در LCA، هویت‌های مشابه با نمایش رفتار فیزیکی-شیمیایی مشابه، در هستارهایی[۱۲] دسته‌بندی

1- Calibrated
2- Accuracy
3- Environmental
4- Matrix
5- Embedded
6- Inter-laboratory trials
7- Representative
8- Robustness
9- Batches
10- Sort
11- Variance
12- Entities

می‌شوند که توصیه می‌شود به‌طور منحصربه‌فرد تعریف و نامگذاری شوند. در نتیجه برای ماهیت‌های منفرد، مقادیر اندازه‌ده‌ها (برای مثال: اندازه، ترکیب‌بندی، ساختار) ممکن است در پهناهای باند[1] کوچک یکسان درنظر گرفته شوند. از این رو، هر هستار شامل ترکیبی از مقادیر دسته‌بندی‌شده از اندازه‌ده‌های مجزایی است که از قبل تعریف شده‌اند. راهبردهای آزمون فقط زمانی می‌توانند با هستارها مرتبط شوند که ماهیت‌ها شفاف باشند.

هستارهای نانومواد‌ی که از نظر «مسیرهای پیامد نامطلوب (AOP)» رفتار مشابهی دارند، ممکن است بایکدیگر گروه‌بندی شوند. این امر امکان استفاده از داده‌های در دسترس از آزمون‌هایی که پیش از این بر روی نانومواد ساخته‌شده انجام شده‌است و کاربرد روش‌های بررسی سراسری[2] را برای یک نانوماده جدید با عمل سمی مشابه، فراهم می‌کند. یافته‌های توافقی[3] برای نقاط‌پایانی مرتبط، با یک راهبرد آزمون شفاف و مناسب، عدم قطعیت را به مقدار بیشتری کاهش می‌دهد. اگرچه این یک ارزیابی ساختاری از نانومواد ساخته‌شده است، اما عدم قطعیت روش‌های بررسی سراسری و تغییرپذیری نهفته درون هستارها، نیازمند بهبود بیشتر طرح[4] و یک ارزشیابی دقیق از نتایج است.

لازم است یک طرح راهنمای ساده برای تجزیه‌وتحلیل LCA در شناسایی و گروه‌بندی نانومواد ساخته‌شده برای سیاهه و ارزیابی اثرات ارائه شود، تا پیچیدگی‌های جدی بالقوه در بخش‌های قابل‌مدیریت را ساده کند.

۴-۴ داده سیاهه چرخه حیات

عدم قطعیت و تغییرپذیری در داده‌های «سیاهه جریان مرجع» یک چالش اصلی در LCA است. از منظر جهانی جریانات انرژی و ماده موردنیاز برای «سیاهه جریان مرجع»، به‌ترتیب، دستیابی به درستی فضایی و زمانی[5] به همراه زنجیره تامین یا چرخه حیات، هدفی مشکل است. این موضوع به‌ویژه در مورد داده پس‌زمینه‌ای[6] صدق می‌کند، جایی‌که LCA معمولا به «سیاهه‌های چرخه حیات» موجود متکی است. داده پیش‌زمینه[7] یعنی ماده سطح اول واقعی و مقتضیات انرژی برای «واحد کارکردی» می‌تواند با اندازه‌گیری، مدل‌سازی و استفاده از آخرین دستاوردهای علمی در فرایندهای تحت بررسی، بهبود یابد. توصیه می‌شود توصیف جزئیات فرایندها با محدوده‌های سامانه فضایی و زمانی شفاف انجام شود. یک تجزیه‌وتحلیل حساس می‌تواند داده مهم موثر بر نتایج ارزیابی اثرات را نشان دهد. توصیه می‌شود داده‌های سیاهه که به نتایج مرتبط هستند (برای مثال جریانات ماده، داده انتشار) با توجه ویژه‌ای مدیریت شوند تا عدم قطعیت در «سیاهه جریان مرجع» کاهش یابد.

1- Bandwidths
2- Read across
3- Consensus
4- Scheme
5- Spatial and temporal
6- Background
7- Foreground

۴-۵ ارزیابی مواجهه

نانومواد ساخته‌شده می‌توانند رفتار متفاوتی نسبت به انواع[1] متداول همان مواد (یعنی جامدات، سیالات، گازها) داشته باشند. یک مدل‌سازی تفصیلی از مواجهه و سرنوشت محیط‌زیستی باید ویژگی‌هایی همچون پتانسیل کلوخگی، پیرشوندگی، تغییر در پوشش و غیره را مدنظر قرار دهد. مدل‌های مواجهه فعلی در LCA که شامل این مشخصه‌های نانوویژه باشند، بسیار محدود هستند. به‌علاوه، شرایط مکانی (تعداد و فعالیت جمعیت مواجهه‌یافته، مسیرهای مواجهه اصلی، عوامل محیط‌زیستی همانند رطوبت، تبادل هوا، آلودگی پس‌زمینه و غیره) به پیچیدگی ارزیابی مواجهه می‌افزاید. بنابراین، تخمین دُز نهایی که پتانسیل اثر بر روی ارگانیسم‌ها[2] (اندامگان) را دارد، بسیار دشوار است. درنتیجه، عدم قطعیت در LCA موجود، ناشی از مدل‌سازی مواجهه و سرنوشت در محیط نسبتاً زیاد است و مدل‌های مکمل (برای مثال مدل‌هایی برای برداشت نانومواد در ریه یا مدل‌های پیچیده برای رفتار نانومواد در ستون‌های آب[3]) ممکن است اطلاعات بیشتری ارائه کنند تا کیفیت ارزیابی مواجهه را ارتقاء دهد. یک موضوع کلی مفید برای آگاهی، روش‌اجرایی شفاف علمی برای ترکیب سنجه‌های[4] گوناگون است که برای مشخصه‌یابی نانومواد ساخته‌شده از انتشار تا سرنوشت در محیط‌زیست و تا دُز پایانی استفاده می‌شود.

۴-۶ ارزیابی سمیت

ارزیابی سمیت زیست‌بوم[5] در LCA براساس مقادیر EC_{50} گونه‌ها در سطوح تغذیه‌ای[6] مختلف است [14]. تراکم اثر (EC)، برای سطح اثر ٪ ۵۰ محاسبه می‌شود (به زیربند ۳-۲۰ مراجعه شود). بنابراین، دردسترس بودن چنین داده‌هایی برای نانومواد ساخته‌شده موردنظر برای ارزیابی سمیت قوی[7]، کلیدی است. اگر مقادیر EC_{50} دردسترس باشد، باید حتماً براساس کیفیت آن‌ها بررسی شوند. داده‌های سمیت، برگرفته از مطالعاتی که از راهنماهای آزمون هماهنگ و استانداردشده[8] استفاده می‌کنند، باید بر داده‌های برگرفته از آزمون‌های ناسازگار[9] ارجحیت داده شوند. این کار اعتماد به کیفیت داده‌ها را در رابطه با اثرات توکسیکولوژیکی آن‌ها افزایش می‌دهد و شفافیت روش‌های به‌کاررفته را بیشتر می‌کند. راهنماهای آزمون OECD که برای نانومواد صحه‌گذاری[10] می‌شوند (و درصورت لزوم تطبیق[11] داده می‌شوند) مثالی از ابزارهایی برای تولید داده قابل‌اعتماد هستند. ارزیابی سمیت انسانی برای نانومواد ساخته‌شده به‌طرز مطلوبی برپایه داده‌های همه‌گیرشناختی[12] است که به‌ندرت دردسترس هستند. با چشم‌پوشی از جنبه منفی آزمون‌های حیوانی،

1- Versions
2- Organisms
3- Water columns
4- Metrics
5- Ecotoxicity
6- Trophic levels
7- Robust toxicity
8- Harmonised and standardised
9- Non-compliant tests
10- Validated
11- Adapted
12- Epidemiologic

می‌توان از این مطالعات به‌دلیل آن که شامل عدم قطعیت با قابلیت انتقال نتایج از حیوان به انسان است به‌عنوان آزمون جایگزین استفاده کرد. به‌علاوه، آزمون‌های کوتاه مدت با حیوانات (برای مثال استنشاقی) نمی‌تواند شواهد کافی برای اثرات بلندمدت ارائه کند. تعداد بی‌شماری از نانومواد مختلف ساخته‌شده شرایط ترکیبی داشته و نیاز به تحقیقات با توان بالاتری دارند. بنابراین تلاش‌های عمده برای گسترش آزمون‌های برون‌تنی با توانمندسازی ارزیابی‌های قوی سمیت انسانی از اثر نانومواد ساخته‌شده، موردنیاز است.

هنگامی که همبستگی درون‌تنی و برون‌تنی برای نقاط‌پایانی معین برقرار می‌شود، توسعه‌دهندگان روش LCA قادر به تطبیق روش‌های LCIA کنونی بر طبق آن هستند. به‌منظور حفظ کیفیت بالا در داده‌ها، ممکن است فقط از داده‌های آزمون‌های استاندارد، به‌دست آمده از پایگاه داده‌های شناخته‌شده بین‌المللی استفاده شوند یا به‌طورجایگزین، روش‌های مدل‌سازی رایانه‌ای جایگزین آزمون‌های «واقعی» خواهند شد که داده‌های صحه‌گذاری‌شده درباره اثرات بلند و کوتاه مدت نانومواد ساخته‌شده را ارائه خواهند کرد. درک بهتری از علم کینتیک‌زیستی نانومواد ساخته‌شده، پیش نیازی برای پیش‌بردن روش‌های مدل‌سازی رایانه‌ای است.

۷-۴ ارزیابی اثرات

درحال‌حاضر، برای کمّی‌سازی عدم قطعیت‌ها به‌طور تفصیلی، داده نانوویژه موجود برای محاسبه «فاکتور مشخصه‌یابی (CFs)[1]» مناسب نیستند، به‌دلیل آنکه تغییرپذیری بسیاری از عواملی که قبلا بحث شده‌است نامعلوم است. تازمانی که این شرایط بهبود یابد، شاید این آزمایش‌های ارزشمند باشند، البته اگر راهکار معمول برای برآورد سیاهه عدم قطعیت براساس یک ماتریس شجره‌نامه‌ای[2] از شاخص‌های کیفیت داده ویژه-کاربر، بتواند به ارزیابی اثرات نانومواد ساخته‌شده بسط یابد. یک تجزیه‌وتحلیل عدم قطعیت کیفی براساس سامانه نواری هاشورخورده[3] همانگونه که در شکل ۱ ارائه شده‌است، کمک می‌کند تا حداقل به‌طور واضح نقاط قوت و ضعف مثال‌ها را نشان دهد. تمایز بین عدم قطعیت منابع مجزا (تغییرپذیری، عدم قطعیت) از یک طرف و از طرف دیگر تاثیر آنها بر نتایج نهایی (حساسیت، کمک به تغییرپذیری کلی و عدم قطعیت) کمک بیشتری به بهبود ارزیابی اثرات خواهد کرد. هرگاه دردسترس بودن داده‌ها از یک تجزیه‌وتحلیل عدم قطعیت کمی CFs حمایت کند، برای محاسبه اثرات نانوویژه، بازه‌های اطمینان می‌توانند با شبیه‌سازی‌های مونت کارلو[4]، با درنظرگرفتن توزیع‌های عدم قطعیت هر مرحله LCA محاسبه شوند. یک بازبینی یا حداقل یک بحث در مورد کاربرد عوامل ایمنی و عوامل تبدیلی فعلی ممکن است در ارزیابی موردنیاز باشند تا عدم قطعیت در ارزیابی اثر را کاهش داده و توانمندی نتایج را افزایش دهد (به پیوست **الف** مراجعه شود).

1- Characterization Factors
2- Pedigree matrix
3- Hatched banding system
4- Monte Carlo simulations

۵ تعریف هدف و دامنه کاربرد (به زیربند ۴-۲، استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۱۴۰۴۴: سال ۱۳۸۶ مراجعه شود)

۵-۱ کلیات

نانومواد ساخته‌شده اغلب خواص جدید و افزوده‌ای را نشان می‌دهند که نیاز است در یک مطالعه LCA گنجانده شود تا خروجی و تفسیر جامع و بنابراین منصفانه‌ای، از نتایج مطالعه LCA ارائه داده شود. به‌منظور حصول اطمینان از این جامعیت در مورد کارورزی[1] با نانومواد ساخته‌شده در یک مطالعه LCA، تمام خواص نانوویژه نانومواد ساخته‌شده و محصولات نانوپدید باید به شکل کافی در عناصر مختلف بخش تعریف هدف و دامنه‌کاربرد گنجانده[2] شوند.

هنگام تعریف هدف و دامنه‌کاربرد یک مطالعه LCA مرتبط با نانومواد ساخته‌شده یا محصولات نانوپدید باید به مسائل و نکات زیر به‌طور صریح پرداخته شود.

۵-۲ هدف مطالعه (به زیربند ۴-۲-۳، استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۱۴۰۴۴: سال ۱۳۸۶ مراجعه شود)

تعاریف هدف و دامنه کاربرد، منظور و محدوده‌های سامانه یک محصول یا سامانه تحت بررسی را مشخص می‌کند. این کار تمام فرایند را برای حصول اطمینان از توانایی در به‌دست آوردن بامعناترین نتایج در رابطه با کاربرد موردنظر هدایت خواهد کرد. اگر نقاط بحرانی[3] محیط‌زیستی یا نگرانی‌های مرتبط با سلامت انسانی جستجو می‌شوند، یک LCA «گهواره تا گور»[4] از محصول نانوپدید پیشنهاد می‌شود. نوع دوم LCA، یک مطالعه تطبیقی، محدوده‌های سامانه مشابه برای محصول نانوپدید را در مقایسه با محصول مشابه آن، پیشنهاد می‌دهد و در نهایت، فرایندهای تصمیم‌گیری، فقط اثرات مربوط به واحد کارکردی را که در فاز هدف و دامنه‌کاربرد تعریف شده‌باشند، چارچوب‌بندی خواهند کرد.

در فرایند هدف‌گذاری، تعیین ویژگی‌های بسیار دقیق موضوعات نانوویژه حیاتی است، زیرا تمام مراحل و جنبه‌های بعدی (برای مثال، تعریف واحد کارکردی) بستگی به شناسایی و مشخصه‌یابی شفاف آنها دارد. کارکردهای افزوده نانوویژه در محصولات نانوپدید، چه سودمند یا مضر برای محیط‌زیست باید به دقت در همان ابتدای LCA تجزیه‌وتحلیل شوند و سپس، همانند داده‌های نانوویژه در «سیاهه چرخه حیات» (اما همچنین در ارتباط با روش‌ها و راهکارهای «ارزیابی اثرات»)، با بخش رایج سیاهه یک محصول نانوپدید با یک روش متناسب ادغام شوند. یک محصول رایج یا خدمت (یا یک ترکیب نسبی از تعدادی از آنها) با بازنمایی جدیدی از همان کارکرد، خدمت یا محصول نانوپدید، نیاز است تا به‌عنوان همتایی برای LCA تطبیقی انتخاب شود. به‌کارگیری واحد کارکردی یکسان در چنین مقایسه‌ای سبب می‌شود تا تفاوت‌ها در

1- Handling
2- Integration
3- Hotspots
4- Cradle to grave

اثرات محیط‌زیستی یا سلامت انسانی نشان داده شوند. این راهی برای مقایسه نتایج LCA محصول نانوپدید، در مقایسه با محصول رایج مشابه آن است. یک مقایسه جامع و منصفانه باید شامل تمام عناصر نانوویژه در LCI و در بخش LCIA باشد.

شناسایی شفاف بازار(ها) هدف و کاربر(ان) احتمالی محصول نانوپدید، تعریف هدف مطالعه را تسهیل می‌کند. باید بدانیم که کارکردهای جدید نانومواد ساخته‌شده و محصولات نانوپدیدکه هنوز در بازار استقرار نیافته‌اند (یعنی هنوز در مرحله توسعه هستند) نمی‌توانند همواره با تمام جزئیات شرح داده شوند. در چنین مواردی، فرضیه‌های واضح و روش‌های سناریو می‌توانند به تخمین سیاهه‌های چرخه حیات محصولات کمک کنند.

۳-۵ کارکرد و واحد کارکردی (به زیربند ۴-۲-۳-۲، استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۱۴۰۴۴: سال ۱۳۸۶ مراجعه شود)

واحد کارکردی مرجعی برای مجموعه تمام داده‌های درونداد و برونداد مربوط به کارکردهای سامانه یا محصول تحت بررسی را ارائه می‌کند.

هرگاه که لازم باشد، واحد کارکردی منتخب باید امکان مقایسه بدون ابهام محصول متداول را با محصول نانوپدید فراهم کند. هنگام تعیین واحدکارکردی برای توصیف کارکرد/خدمت محصول نانوپدید در هم‌ترازی کارکرد/خدمت ارائه‌شده یک محصول/خدمت رایج، لازم است تا کارکردهای افزوده پتانسیل صرفه‌جویی در انرژی و ماده که ممکن است به دلیل ویژگی نانویی به‌وجود آمده باشند، درنظر گرفته شود.

نانومواد ساخته‌شده همواره خواص جدید نشان نمی‌دهند، اما اندازه کوچک آنها می‌تواند به‌طور عمده خواص فیزیکی-شیمیایی را در مقایسه با انواع اندازه بزرگتر همان ماده تغییر دهد. نانومواد روی سطوح دیگر بهتر جذب‌سطحی[1] می‌شوند یا می‌توانند همانند دفع‌کننده‌های[2] موثر عمل کنند. آنها ممکن است درمقایسه با جرم یکسان از همتایان بزرگترشان اثربخشی ضدمیکروبی[3] بهبودیافته‌ای داشته باشند. چندسازه‌های بَسپاری (پلیمری)[4] با نانومواد جاسازی‌شده می‌توانند قدرت بیشتر و مقاومت الکتریکی کمتری داشته باشند. جایگزینی فیلترهای UV معمول با نانومواد می‌تواند کرم ضدآفتاب را شفاف سازد. مواد حاوی نانوحفرات[5] می‌توانند به تولید عایق‌های بسیار موثر منجر شوند. اغلب به‌عنوان خواص مفید نانومواد به خواص اکسایشی-کاهشی و کاربرد آنها در ساخت کاتالیزها، اشاره می‌شود. نقاط کوانتومی در نانومقیاس به‌خاطر نیمه‌رسانایی و/یا خواص فلورسانس آنها شناخته می‌شوند. استفاده از نانومواد در حال توسعه است تا به‌عنوان حامل‌هایی برای تحویل قابل‌برنامه‌ریزی دارو یا برای ذخیره هیدروژن استفاده شوند. این فهرست از مثال‌ها، فقط اشاره مختصری به حوزه‌های چندگانه کاربردی نانومواد دارد.

1- Adsorb
2- Repellents
3- Antimicrobial
4- Composites
5- Nanopores

استفاده از نانومواد در شکل‌های متعدد، اهمیت انتخاب صحیح واحد کارکردی را تایید می‌کند. تا حد امکان، توصیه می‌شود تعریف واحد کارکردی مستقل از خواص فنی محصول (سامانه) تحت مطالعه، انتخاب شود. توصیه می‌شود کارکردهای نانوپدید به شکل تاثیرات بر جریان‌های مرجع شرح داده شوند.

۵-۴ محدوده سامانه (به زیربند ۴-۲-۳-۳، استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۱۴۰۴۴: سال ۱۳۸۶ مراجعه شود)

محدوده سامانه فرایندهایی را شرح می‌دهد که براساس هدف کلی مطالعه در یک مطالعه LCA، گنجانده شده است. در مثال نانومواد ساخته‌شده و محصولات نانوپدید، محدوده سامانه به‌طور مطلوب، باید کل چرخه حیات کاربرد نانوپدید را موردملاحظه قرارداده و بنابراین مطالعات «گهواره تا گور» بر مطالعات «گهواره تا دروازه»[1] ارجحیت خواهند داشت. به این معنی که منبع استخراج و تولید، مرحله استفاده و پایان- حیات با تمام فرایندهای مربوط به آنها، جریان‌های مواد و انرژی از جمله هرگونه خصوصیات برجسته[2] نانوویژه درنظر گرفته شوند. برای مثال، این مطالعه هر صرفه‌جویی در انرژی ناشی از اجزای نانوپدید و کاربردهای آنها در مرحله استفاده، همچنین هرگونه هزینه اضافی یا مواد منتشره از تمام[3] مراحل مانند فرایندهای پردازش پسماند[4] و جنبه‌های پایان-حیات را موردملاحظه قرارمی‌دهد.

۵-۵ روش‌شناسی LCIA و انواع اثرات (به زیربند ۴-۲-۳-۴، استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۱۴۰۴۴: سال ۱۳۸۶ مراجعه شود)

در مورد نانومواد ساخته‌شده باید توجه ویژه‌ای به اثرات توکسیکولوژیکی بر انسان‌ها و محیط‌زیست شود. در LCIA این مسئله معمولا در عوامل LCIA سمیت انسانی و سمیت زیست‌بوم مطرح می‌شود. ارزشیابی با این دو شاخص سمیت به‌شدت توصیه می‌شود. توجه ویژه‌ای به محاسبه انتشار مربوطه، اثر و در نهایت فاکتور مشخصه‌یابی برای نانومواد ساخته‌شده رهایش‌یافته، توصیه می‌شود. شاخص‌های اثرات بیشتری نیز ممکن است با هدف کلی و دامنه کاربرد مطالعه بستگی داشته باشند.

۵-۶ انواع و منابع داده (به زیربند ۴-۲-۳-۵، استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۱۴۰۴۴: سال ۱۳۸۶ مراجعه شود)

همانند مواد با اندازه رایج، داده‌های موردنیاز برای نانومواد ساخته‌شده و محصولات نانوپدید نیز بستگی به هدف و دامنه کاربرد واقعی مطالعه دارد. چنین داده‌هایی مطابق با استاندارد ملی ایران شماره ۱۴۰۴۴: سال ۱۳۸۶ «ممکن است از موقعیت‌های تولید مرتبط با فرایندهای واحد درون محدوده سامانه جمع‌آوری شوند یا ممکن است از منابع دیگر به‌دست آیند یا محاسبه شوند».

1- Cradle to gate
2- Particularities
3- Throughout
4- Waste treatment

به‌عنوان بخشی از انتشار کلی مواد در هوا و ورود[1] آنها به آب و خاک، لازم است نهایتا رهایش‌های نانوذرات نیز درنظرگرفته شوند. مدل‌سازی سرنوشت محیط‌زیستی نانوویژه، ادغام این انتشارات را به شیوه مستدل و معقول در مطالعه LCA فراهم می‌آورد. خواص مرتبط با سرنوشت محیط‌زیستی نانومواد ساخته‌شده ممکن است شامل موارد زیر باشد:

- ترکیب عنصری؛
- خواص سطحی و اطلاعات مربوط به پوشش؛
- اندازه و شکل؛
- خواص انحلال و پراکنش (تحت‌تاثیر عمل‌آوری سطوح و پوشش‌ها)؛
- پتانسیل انبوهگی و کلوخگی.

مجموعه کامل‌تری از اندازه‌دهای نانویی در استاندارد CEN/TS 17010:2016 ارائه شده‌است.

۵-۷ الزامات کیفی داده (به زیربند ۴-۲-۳-۶، استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۱۴۰۴۴: سال ۱۳۸۶ مراجعه شود)

همانند مواد رایج (و رهایش آنها)، کیفیت داده نانومواد و محصولات نانوپدید باید برای تکمیل اهداف این مطالعه کافی باشند. مواردی که نیاز است تا پوشش داده‌شوند، همان موارد مربوط به مواد رایج و جریان‌های انرژی است (برای مثال، مواردی مانند معرف‌بودن[2]، درستی[3]، کامل‌بودن[4]، پوشش[5] و غیره).

همچنین درمورد داده‌های نامعلوم[6]، همان روش‌اجرایی مربوط به مواد مرسوم و جریان‌های انرژی (شرح داده‌شده در زیربند ۴-۲-۳-۶-۳، استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۱۴۰۴۴: سال ۱۳۸۶) برای نانومواد ساخته‌شده و محصولات نانوپدید به‌کار می‌رود. یک الزام کلیدی دیگر مستندسازی شفاف موارد انجام شده‌است.

در مورد داده‌های نامعلوم از خاصیت نانوویژه، توصیه می‌شود از یک محدوده بزرگ معقول برای مقادیر خاصیت مربوطه استفاده شود تا امکان آزمایش تاثیر آن از طریق سناریو و تجزیه‌وتحلیل حساسیت فراهم شود (به زیربند ۶-۳-۴ مراجعه شود). همانند موارد اشاره‌شده در بالا، یک مستندسازی واضح از تمام این فرضیات موردنیاز است.

1- Discharges
2- Representativeness
3- Accuracy
4- Completeness
5- Coverage
6- Missing data

۵-۸ مقایسه بین سامانه‌ها (به زیربند ۴-۲-۳-۷، استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۱۴۰۴۴: سال ۱۳۸۶ مراجعه شود)

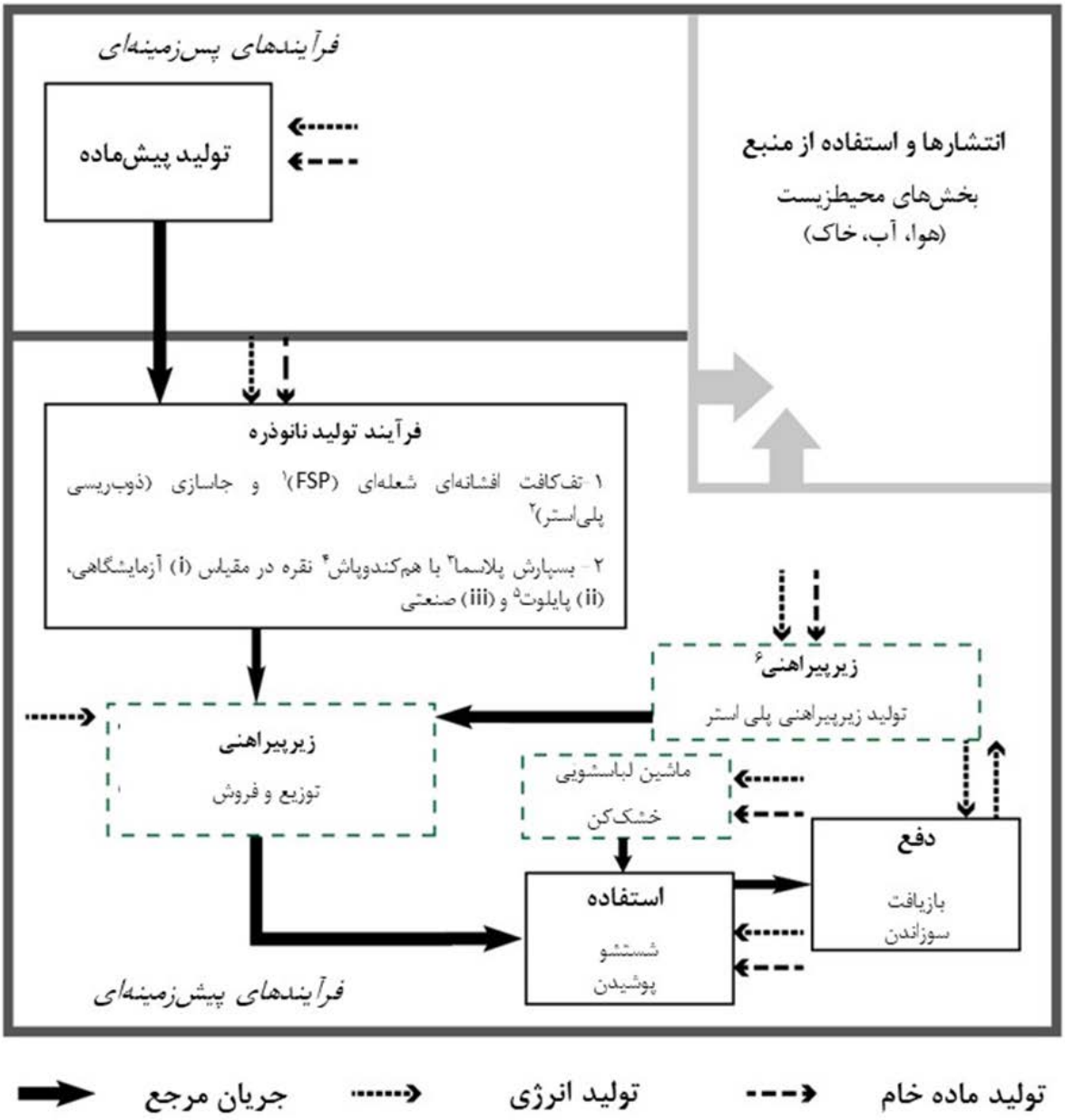
در مطالعات تطبیقی[1]، استاندارد ملی ایران شماره ۱۴۰۴۴: سال ۱۳۸۶بیان می‌کند که «قبل از تفسیر نتایج توصیه می‌شود هم‌ترازی سامانه‌های مورد مقایسه، ارزشیابی شوند». درصورت مقایسه نانومواد ساخته‌شده و محصولات نانوپدید با مواد و محصولات رایج، تمام مزایای اضافی شناسایی‌شده به‌دلیل استفاده از گروه اول (یعنی نانومواد ساخته‌شده و محصولات نانوپدید) باید با تعاریف «واحد کارکردی و محدوده‌های سامانه مربوط به آن» پوشش داده‌شوند تا به یک مطالعه منسجم[2] منجر شود.

۵-۹ مثال‌ها

مثال ۱- «منسوجات با نانونقره (nano-Ag)»

در این مطالعه LCA، کارکرد ضدمیکروبی نانونقره با یک کارکرد مشابه ضدمیکروبی ایجادشده با یک روش متفاوت (برای مثال، ماده دیگر، یک الگوی استفاده متفاوت) مقایسه شده‌است. در این مطالعه این کارکرد مشابه با استفاده از تری‌کلوزان، یک زیست‌کش معمولی به‌کاررفته در بخش منسوجات در بسیاری از کشورها (برای محدوده‌های سامانه، به شکل ۲ مراجعه شود)، به‌دست آمده‌است. نانونقره و تری‌کلوزان برای جلوگیری از نشر بوهای نامطلوب از منسوجات به‌کار می‌روند. تری‌کلوزان در مقایسه با نانونقره در بلندمدت کارایی اندکی کمتر برای کشتن باکتری‌ها دارد. (نکته: تری‌کلوزان به‌طور روزافزون با نمک‌های آمونیم چهارتایی و عوامل نقره، جایگزین شده و در اتحادیه اروپا در سال ۲۰۱۶ سرانجام ممنوع شده است). الیاف پلی‌استر به‌عنوان مواد حامل برای زیست‌کش‌ها انتخاب می‌شوند. دو زیرپیراهنی با کارکرد یکسان با استفاده از «واحد کارکردی» (حفظ خصوصیات منسوجات در طول استفاده با ۲۰ بار شستشو) مقایسه شده‌است. آنها حاوی مقادیر متفاوتی باکتری‌کش (با بازده ضدمیکروبی متفاوت)، اما حاوی مقدار یکسانی پلی‌استر بودند. فرض بر این است که دفعات شستشو برای این نوع لباس‌های ورزشی به اثربخشی پوشش ضدمیکروبی آن بستگی دارد.

1- Comparative studies
2- Coherent study



1- Flame spray pyrolysis
2- Embedding (polyester meltspinning)
3- Plasma polymerization
4- Silver co-sputtering
5- Pilot
6- T-shirt

یادآوری- مستطیل‌های خط‌چین: فعالیت‌های که تحت‌تاثیر فناوری نانو قرار نگرفته است و به‌طور مساوی برای هر دو محصول مدل‌سازی شده‌است.

شکل ۲- محدوده‌های سامانه یک نمونه از «زیرپیراهنی‌های نانونقره»

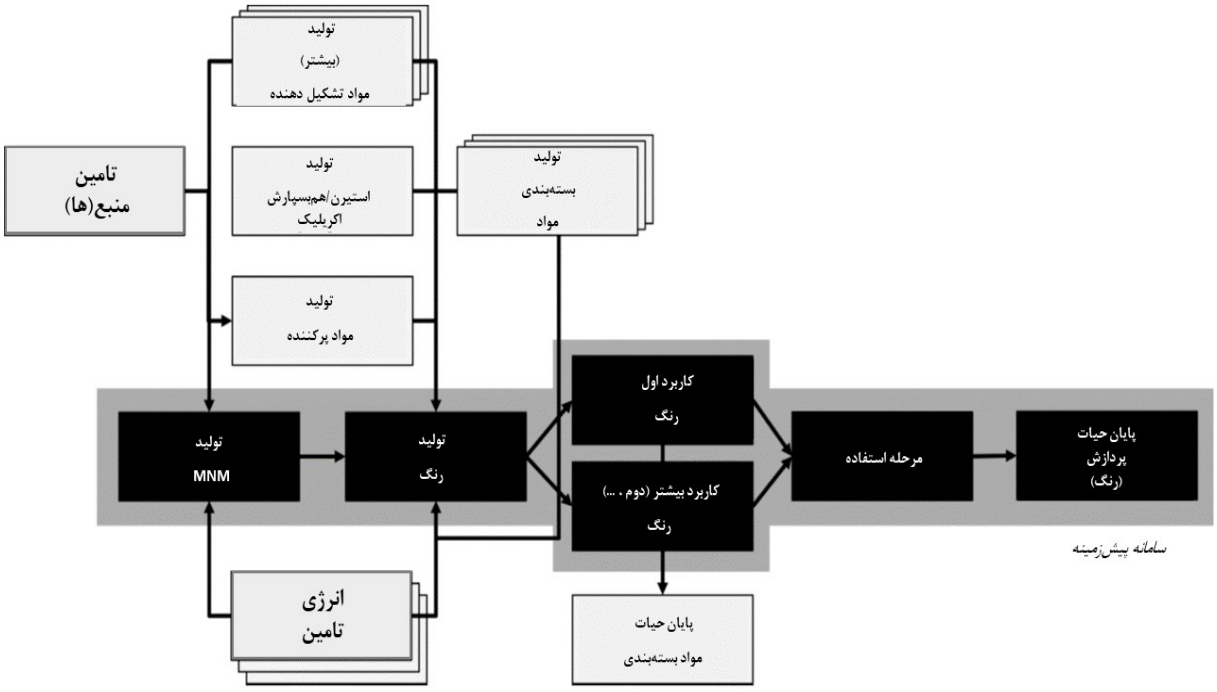
همانگونه که در شکل ۲ نشان داده شده‌است جریان مرجع، شامل تمام انرژی و منابع موردنیاز برای تولید، استفاده و دفع زیرپیراهنی‌های ضدمیکروبی است. برخی از فناوری‌ها برای تولید انواع ویژه زیرپیراهنی‌های نانونقره هنوز در مرحله پایلوت (برای مثال، کندوپاش پلاسما) هستند درحالی‌که بقیه (نانونقره تولیدشده با تف‌کافت افشانه‌ای شعله‌ای) پیش‌از این به‌تکامل[1] رسیده‌اند. بنابراین یک LCA آینده‌نگر[2] برای بازتاب تولید و استفاده آتی از منسوجات کارکردی[3] موردنیاز است. این کار با تجزیه‌وتحلیل سناریو تکوینی[4] که طرح شرایط آتی[5] محتمل مانند فناوری‌های درحال تغییر، نگرش‌های اجتماعی و الزامات مقرراتی را ممکن می‌سازد، تکمیل می‌شود. هر سه گزینه نسبت به درک فناوری نانو همچنین به امکانات فناورانه[6] فناوری نانو حساس هستند.

مثال ۲- «پوشش‌های نما با نانو- دی‌اکسیدتیتانیم ($nano\text{-}TiO_2$)»

اگر هدف یک مطالعه فقط بررسی تاثیر تولید یک ماده نانومقیاس ویژه باشد، یک واحد کارکردی ۱ Kg از این ماده، واحد مناسبی خواهد بود. به محض اینکه هدف مطالعه از این نقطه فراتر رود، به‌عنوان مثال به دنبال یک نمونه کاربردی ویژه از یک ماده ، در چنین حالتی واحد کارکردی ساده مبتنی بر وزن تقریبا در همه موارد، دیگر معقول نیست.

در این مثال ویژه (برای محدوده‌های سامانه آن به شکل ۳ مراجعه شود)، دو ماده رنگی آزمایش‌شده که در جدول ۲ فهرست شده‌اند و منجر به پوشش‌های نمای با دوام‌تر می‌شوند، به‌عنوان مثالی برای چنین اهداف افزوده با نانومواد مورداستفاده هستند. بنابراین، واحد کارکری نیاز دارد تا این تغییرات دامنه کاربردی بین دو انتخاب، با/ و بدون نانومواد ساخته‌شده را درنظر بگیرد. بنابراین در این مورد «حفظ یک مترمربع از دیوار در طول یک دوره ۸۰ ساله» به‌عنوان واحد کارکردی انتخاب شده‌است. اگرچه مثال سوم تفاوتی را در کاربرد نشان نمی‌دهد، اما منجر به یک محیط سالم‌تر درون اتاق درصورت کاربرد رنگ حاوی نانومواد می‌شود که در اینجا، با همان واحد کارکردی (یعنی، حفاظت یک سطح در یک بازه زمانی) به‌عنوان دو ماده جایگزین استفاده شده‌است.

1- Mature
2- Prospective
3- Functional Textiles
4- Formative scenario
5- Future condition
6- Technological



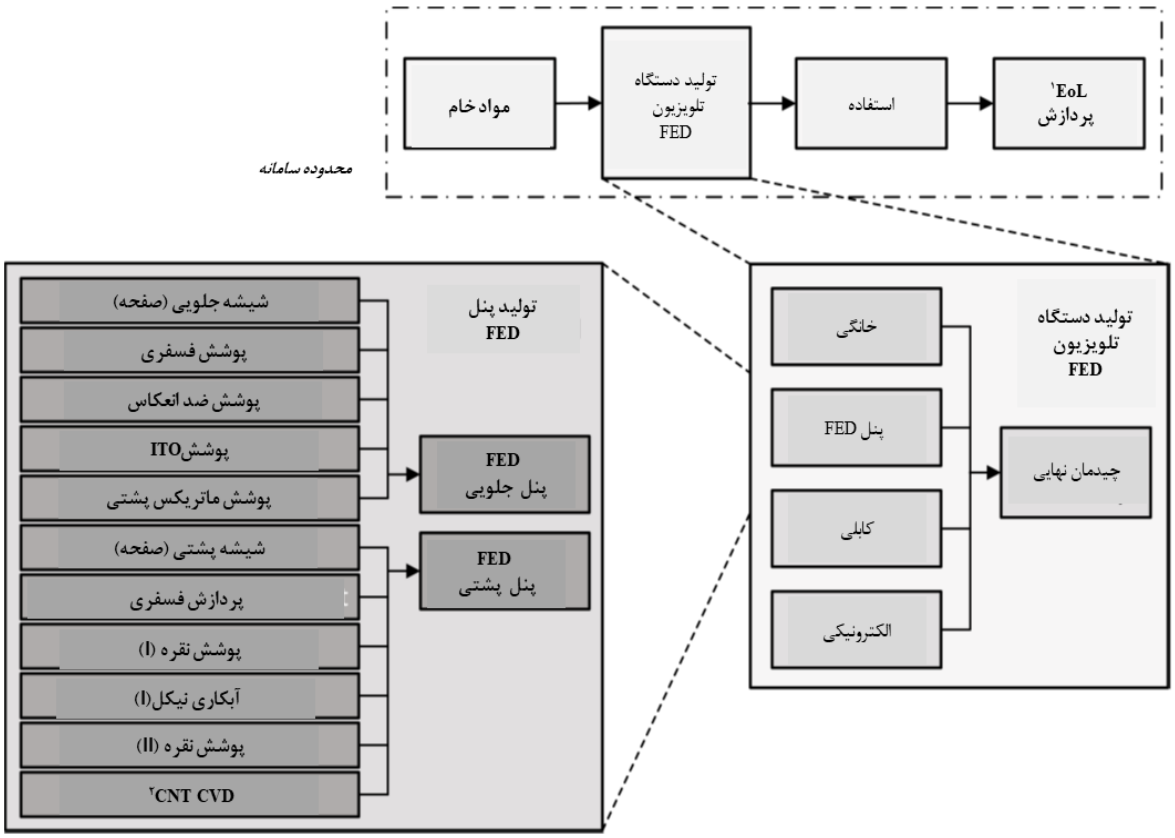
یادآوری- مراحل فرایند تیره رنگ («سامانه پیش‌زمینه» نامیده می‌شود) به‌طور ویژه برای این مثال مدل‌سازی شده، درحالی‌که تمام مراحل فرایند رنگ روشن از پایگاه‌داده پس‌زمینه برگرفته شده‌است.

شکل ۳- محدوده‌های سامانه یک نمونه از «پوشش نما با نانو- دی‌اکسیدتیتانیم»

مثال ۳- «CNTs در الکترونیک»

استفاده ویژه از نانومواد ساخته‌شده همچنین می‌تواند به کارکردهای کاملا جدیدی منتهی شود، کارکردهایی که با مواد رایج ممکن نیستند. مشکل چنین مثالی، یافتن این موضوع است که این محصول جدید جایگزین چه چیز خواهد شد و اینکه آیا کارکردهای دیگری نیز وجود دارند که لازم باشد درنظرگرفته‌شوند.

در این مثال سوم، ابتدا، یک نمایشگر تلویزیون FED با جزئیات (برای محدوده‌های سامانه به شکل ۴ مراجعه شود) بررسی می‌شود. برای این مرحله واحد کارکردی فقط مستقیما به دستگاه واقعی می‌تواند مرتبط شود، یعنی «یک دستگاه کامل در طول تمام چرخه حیات آن» به‌عنوان واحد کارکردی درنظر گرفته می‌شود. در بخش دوم این مطالعه، با مقایسه فناوری FED در رقابت با فناوری‌های صفحه تخت (برای مثال LCD، پلاسما) همچنین فناوری معمول CRT، واحد کارکردی به ترتیب زیر تعریف می شود «یک اینچ مربع از صفحه نمایش در طی ۱ ساعت استفاده فعال». این واحد، این امکان را فراهم می‌کند که دستگاه‌های مختلف در اندازه بسیار متفاوت به دلیل محدودیت‌های فنی نیز درنظر گرفته شوند.



1- End of life (EoL)

۲- نهشت شیمیایی بخار کاتالیزوری نانولوله کربنی (Carbon nanotubes by catalytic chemical vapor deposition)

یادآوری- تقسیم‌شدن به سه سطح متفاوت (چرخه حیات کامل (بالا)، تولید دستگاه تلوزیون FED (پایین-راست) و تولید پنل FED (پایین-چپ).

شکل ۴- محدوده‌های سامانه یک نمونه از «CNTs در الکترونیک»

۶ تجزیه‌وتحلیل سیاهه چرخه حیات (LCI) (به زیربند ۴-۳، استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۱۴۰۴۴: سال ۱۳۸۶ مراجعه شود)

۶-۱ کلیات (به زیربند ۴-۳-۱، استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۱۴۰۴۴: سال ۱۳۸۶ مراجعه شود)

همانند مواد رایج، تعریف هدف و دامنه کاربرد بر مبنای جمع‌آوری داده سیاهه چرخه حیات تنظیم می‌شود.

همانطور که در بالا اشاره شد، نانومواد ساخته‌شده اغلب خواص جدید و افزوده‌ای را نشان می‌دهند که نیاز به شناسایی و جمع‌آوری در تجزیه‌وتحلیل LCI دارند تا متعاقبا اجازه داده شود که یک خروجی و تفسیر جامع و منصفانه از نتایج مطالعه LCI به‌دست آید. بنابراین، در سطح تجزیه‌وتحلیل LCI، باید اطمینان حاصل شود

که تمام این خواص جدید/افزوده از نانومواد ساخته‌شده و محصولات نانوپدید به‌درستی جمع‌آوری و به شکل مناسب در مجموعه داده‌های LCI[1] این مواد و محصولات، ادغام می‌شوند.

بنابراین، یک مشخصه‌یابی گسترده[2] برای نانومواد ساخته‌شده لازم است و همچنین یک سیاهه الحاقی برای مجموعه متداول از جریانات جرمی ضروری است. برای تسهیل مدل‌سازی مواجهه و سرنوشت محیط‌زیستی، لازم است به سوالات ویژه متعددی پاسخ داده شود. جنبه‌هایی که توصیه می‌شود تا موردملاحظه قرارگیرند شامل موارد زیر می‌شود:

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

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

- فراهمی‌زیستی، کینتیک‌های‌زیستی، پایداری‌زیستی چه هستند؟

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

درمیان این اطلاعات افزوده ضروری (علاوه بر اطلاعات پایه همانند ترکیب عنصری)، سه خاصیت ویژه ماده که در زیر ارائه شده‌است، از جنبه‌های مربوطه برای یک مدل‌سازی جامع هستند (به مثال مرجع [15] مراجعه شود):

الف- اندازه و شکل؛

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

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

اطلاعات مربوط به پتانسیل انبوهگی 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 ساخته‌شده مستلزم توجه بیشتری است. مدل‌های فضاهای بسته که شامل مواجهه شغلی و مصرف‌کننده با نانومواد ساخته‌شده است، موضوعات پژوهش کنونی بوده که ارزیابی سمیت انسانی ایجادشده از طریق استنشاق نانومواد ساخته‌شده را در فضاهای بسته تسهیل خواهد کرد. نفوذ مواد انتشاریافته به فضای باز (محیطی) می‌تواند در ابتدا در مرحله مصرف و دفع روی دهد. بعد از رهایش، «پیرشوندگی» نانومواد ساخته‌شده 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

1- Datasets
2- Extended

به‌عنوان یک سنجه می‌تواند یک واحد اندازه‌گیری مناسب‌تر برای مدل‌سازی رهایش نانوذرات باشد، درحالی‌که مساحت سطح ممکن است بهترین توصیف‌کننده سمیت زیست‌بوم یا سمیت انسانی باشد.

۶-۲ جمع‌آوری داده (به زیربند ۴-۳-۲ ، استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۱۴۰۴۴: سال ۱۳۸۶ مراجعه شود)

برای جمع‌آوری این اطلاعات افزوده در مورد نانومواد ساخته‌شده، می‌توانید به‌طور مشابه از چارچوب کلی برای جمع‌آوری داده برای مواد رایج و درونـدادها و برونـدادهای انرژی که در زیربند ۴-۳-۲ استاندارد ملی ایران شماره ۱۴۰۴۴: سال ۱۳۸۶ فهرست شده‌است، استفاده کنید. ضروری است تمام این داده‌های افزوده به واحد فرایندهای گوناگون، سامانه آزمایش‌شده و به همه مستندات به‌طور واضح، تا حد ممکن و کامل، ارجاع داده شود، به‌نحوی که قابلیت ردیابی حداکثری برای ارزیابی آتی یک مطالعه LCA فراهم شود.

یادآوری- یک راهبرد ممکن برای غلبه بر شرایط ضعیف کنونی داده‌های LCI برای نانومواد ساخته‌شده و محصولات نانوپدید، آن است که داده‌های جدید LCA نانوویژه حاصل از مطالعات ملی، می‌تواند کاملا شفاف شده و به‌طور کلی برای بسط پایگاه داده‌های LCI و ابزارهای نرم افزاری LCA دردسترس قرارداده شوند. هرچند، پروتکل‌های جمع‌آوری داده هماهنگ و استانداردشده به همراه یک کنترل بالا-به-پایین[1] و نگهداری از داده‌ها[2]، پیش شرطی است که هنوز محقق نشده‌است.

۶-۳ محاسبه داده (به زیربند ۴-۳-۳، استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۱۴۰۴۴: سال ۱۳۸۶ مراجعه شود)

۶-۳-۱ کلیات

طبق استاندارد ملی ایران شماره ۱۴۰۴۴: سال ۱۳۸۶، «تمام روش‌های اجرایی محاسباتی باید به‌طور صریح[3] مستند شده و فرضیات درنظر گرفته‌شده باید به‌طور واضح بیان و توضیح داده شوند. توصیه می‌شود روش‌های اجرایی محاسباتی مشابه، به‌طور مستمر در تمام مطالعه به‌کاررود». واضح است که این اصل کلی در مورد نانومواد ساخته‌شده هم معتبر است.

با این‌حال، در مورد نانومواد ساخته‌شده و محصولات نانوپدید، «محاسبه داده» چالش بزرگتری در سطح جریان واقعی داده، یعنی درونـدادهای ماده و انرژی و برونـدادهای مربوطه است. نبود سیاهه داده کافی برای تولید نانومواد ساخته‌شده رایج مورداستفاده (برای مثال داده استفاده‌شده در مثال‌ها، ناقص هستند) به‌عنوان یکی از مسائل اصلی برای تمام LCAs انجام‌شده، باقی مانده‌است.

1- Top-down
2- Maintenance of the data
3- Explicity

۶-۳-۲ مراحل استفاده و پایان حیات

در ارزیابی‌های انجام‌شده، «مرحله استفاده و مرحله پایان حیات نانومواد و محصولات نانوپدید» نیازمند بررسی بیشتر و یک ارزشیابی انتقادی از اختلاف بین شکل نانویی و توده‌ای همان ماده یا ماده مشابه است. یک راهنما برای ادغام اطلاعات افزوده فهرست‌شده در بالا، برای رهایش‌های احتمالی نانومواد ساخته‌شده در طول چرخه حیات با یک روش نظام‌مند و هماهنگ‌شده، موردنیاز است. به‌علاوه، لازم‌است این ادغام با یک روش سازگار با الزامات و با داده‌های موردنیاز متعاقب آن در «ارزیابی اثرات چرخه حیات» (یعنی سنجش‌های هماهنگ‌شده) انجام شود. بنابراین، بعضی از دستورالعمل‌های رایج در سطح LCI و LCIA ضرروری هستند تا چارچوب LCA را به‌طور کامل در زمینه نانومواد ساخته‌شده و محصولات نانوپدید، کاربردی سازند.

۶-۳-۳ شناسایی نانومواد

همانطور که به پیچیدگی مشخصه‌یابی احتمالی اندازه‌ده در موارد فهرست‌شده در استاندارد CEN/TS17010: 2016 اشاره شده‌است، نقطه آغازین موردنیاز در شناسایی نانومواد، دستورالعمل‌های واضح در زمینه «هویت» نانومواد است. معمولا در LCAs انجام‌شده، دسترسی نسبتا محدودی به داده مشخصه‌یابی برای نانومواد در مطالعه وجود دارد. برای این منظور، در مرحله اول باید به هر نانوماده یک هویت شیمیایی واضح «Nano-CID»[1] اختصاص داده شود تا شفاف‌سازی شود که آیا نانوماده (مورد بررسی) یک ماده جدید است یا به‌طور ساده‌تر، شکل دیگری از ماده‌ای است که پیش از این نیز امکان یافته‌شدن را در یکی از پایگاه‌های داده LCI مختلف داشته‌است. برای روشن شدن مسئله، یک نانوماده را با یک هسته از یک عنصر ذاتاً سمی (به‌طور مثال کادمیم) درنظر بگیرید. این عنصر به احتمال زیاد سمیت متفاوتی را در مقایسه با یک ذره از همان عنصر سمی که در پوشش به‌کاررفته است، از خود نشان می‌دهد. آیا این دو نانوماده ساخته‌شده با ترکیب عنصری مشابه، نیازمند یک راهبرد محاسباتی متفاوت برای «فاکتور مشخصه‌یابی» هستند یا خیر؟ سمیت‌های متفاوت پاسخ «بله» را پیشنهاد می‌دهند، درحالی‌که ترکیب‌های عنصری یکسان پاسخ «خیر» را پیشنهاد می‌دهند. استفاده از «Nano-CID»، گروه‌بندی شکل‌های نانومواد ساخته‌شده را ممکن خواهد ساخت و بنابراین از محاسبه عوامل اثر گروهی بر نانومواد ساخته‌شده با اثرات مشابه، حمایت خواهد کرد. بااین‌حال هنوز یک سلسله مراتب[2] سمیت مورد توافق باید تعریف شود، ولی مثالی از چگونگی طرح طبقه‌بندی[3] براساس «Nano-CID» می‌تواند به شرایط معمول بپردازد یعنی مواقعی که مدل‌سازی سامانه‌های تولید نانومواد ساخته‌شده همان‌گونه که در مرجع [16] به شرح زیر ارائه شده‌است:

الف- نانوماده به لحاظ عنصری و ساختاری با «Nano-CID» ثبت‌شده موجود قابل‌مقایسه است:

1 -Introduction of the nano-chemical identity
2 -Hierarchy
3 -Classification scheme

CID موجود و «عوامل اثر (EF)» مبتنی بر نقطه پایانی را به مواد نانومقیاس اختصاص دهید؛

ب- نانوماده به لحاظ عنصری و ساختاری با یک «Nano-CID» ثبت‌شده موجود قابل‌مقایسه نیست: یک CID جدید اختصاص دهید و تمام «عوامل اثر» مبتنی بر مسیر را براساس بهترین اطلاعات موجود برای «سمی‌ترین ماده نانومقیاس حاضر»[۱] محاسبه کنید؛

پ- نانومواد یک پوشش سطحی پایدار دارند که با یک «Nano-CID» ثبت‌شده موجود قابل‌مقایسه است: اگر پوشش، سمی‌ترین مادهٔ موجود است؛ CID و EF موجود را به نانوماده اختصاص دهید؛ اگر پوشش، سمی‌ترین ماده موجود نیست؛ یک CID جدید اختصاص دهید و EF را براساس بهترین اطلاعات در دسترس برای سمی‌ترین نانوماده حاضر، محاسبه کنید.

یادآوری- راهنمای مربوط به توصیف نانومواد می‌تواند در «سامانه توصیف یکسان (UDS)»[۲] که توسط VAMAS[۳]/CODATA[۴] توسعه یافته‌است و بر روی CID «معرفی هویت شیمیایی-نانو» باشد.

۶-۳-۴ مدل‌سازی سناریو

دومین عنصر مهم به‌منظور کاهش عدم قطعیت به‌دلیل شرایط کمبود داده، مدل‌سازی سناریو است که با روشی علمی سبب محدودسازی عدم قطعیت مرتبط با جریانات مواد واقعی در چرخه حیات کامل می‌شود. مدل‌سازی سناریو یک راهکار شناخته شده است که بیش از ۱۵ سال است که در LCA به‌کار می‌رود. انتشار نتایج تحقیقات گروه کاری اروپایی انجمن شیمی و توکسیکولوژی محیط‌زیست اروپا (SETAC-Europe)[۵] درباره این موضوع اولین سنگ بنا را در این زمینه شکل داده است [17]. طبق این مقاله، یک «سناریو»، «توصیفی از یک شرایط احتمالی آتی مربوط به کاربردهای LCA ویژه، براساس فرضیه ویژه درباره آینده است و (وقتی مرتبط است) همچنین شامل نمایش توسعه از زمان حال تا آینده است». سناریوها می‌توانند «پیشگویانه»[۶]، «اکتشافی»[۷]، یا نوع «الزامی»[۸] باشند و هر یک از این انواع می‌توانند به دو زیر مجموعه (یعنی «پیشگویانه» به «پیش‌بینی‌کننده»[۹] و «چه می‌شود، اگر»[۱۰]؛ «اکتشافی» به «بیرونی» و «راهبردی»؛ «الزامی» به «حفظ و نگهداری»[۱۱] و «تبدیل»[۱۲]) تقسیم شوند [18].

در زمینه مطالعات LCA مرتبط با نانومواد ساخته‌شده و محصولات نانوپدید و کاربردهای آنها، سناریوهای اکتشافی به نظر مرتبط‌ترین نوع هستند. درحال‌حاضر، چنین مطالعاتی اغلب با کمبود اطلاعات کمّی برای

۱- اگر هیچ اطلاعات نانوویژه‌ای موجود نباشد، بالاترین عامل اثر (شدیدترین) ماده توده متناظر را درنظر بگیرید.

2- Uniform Description System

3- Versailles Project on Advanced Materials and Standards

4- Committee on Data of the International Science Council (http://www.codata.org/nanomaterials)

5- Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC)-Europe

6- Predictive

7- Explorative

8- Normative

9- Forecast

10- What-if

11- Preserving

12- Transforming

مدل‌سازی سیاهه تولید نانومواد و محصولات نانوپدید، برای مدل‌سازی رهایش‌های اتفاقی در «اندازه‌گیری‌شده در مقیاس‌نانو»[1] در طی چرخه حیات، همچنین پتانسیل اثرات مرتبط با آنها، مواجه هستند. برای مدل‌سازی رهایش اتفاقی نانومواد در طول چرخه حیات باید یک راهکار مدل‌سازی رایج به‌کاررود. به‌منظور غلبه‌کردن بر کمبود داده‌های تجربی، باید سناریوهای انتشار مبتنی بر مدل‌های جریان اتفاقی ماده (بر پایه احتمالات) و متمایل به یک تجزیه‌وتحلیل چرخه حیات کامل نانومواد ساخته‌شده، به‌کاررود. نیاز است اطلاعات مربوط به ساخت در چنین سناریوهایی از تمام داده‌های موجود (منابع) جمع‌آوری شوند. این اطلاعات شامل داده‌های تجربی، داده‌های مقالات، «رده‌های رهایش محیط‌زیستی (ERC)»[2] از راهنماهای فنی اروپایی از «آژانس مواد شیمیایی اروپا»[3] [19]، ارتباطات با صنعت و به‌عنوان آخرین راه حل، از قضاوت و فرضیات کارشناسی هستند. معمولا بیش از یک سناریو لازم است تا عدم قطعیت بالای سناریوهای مجزا را کاهش دهد. طیف احتمالات رهایش، اغلب با یک سناریو رهایش پایین، متوسط (یعنی واقع‌گرایانه) و بالا نمایش داده می‌شود. ترکیب این سناریوها می‌تواند تمام طیف انتشارات احتمالی (و غلظت‌های محیط‌زیستی ناشی از آن) و متعاقبا اثرات محیط‌زیستی مربوطه را پوشش دهد. یک عامل اصلی برای عدم قطعیت در این مدل‌های سرنوشت محیط‌زیستی تولید نانومواد ناشناخته و حجم‌های کاربردی آنها است. با داشتن تخمین‌های موجود، می‌توان یک مدل‌سازی مبتنی بر رایانه انجام داد تا «غلظت‌های محیط‌زیستی پیش‌بینی‌شده (PEC)»[4] نانومواد ساخته‌شده در طول تمام چرخه زندگی آنها را استخراج کند؛ لازم است بدانید که این چنین PECs هنگام ارزیابی ریسک‌های محیط‌زیستی یک نانومواد ساخته‌شده ضروری هستند (به مثال [20] مراجعه شود). یک احتمال، به‌ویژه هنگام پرداختن به اثرات آتی به‌دلیل استفاده از یک محصول حاوی نانومواد، استفاده از اصطلاح تجزیه‌وتحلیل سناریو تکوینی است. تجزیه‌وتحلیل سناریو تکوینی ابزار مفیدی برای ادغام داده‌های کیفی و کمی است تا سناریوهای مخاطره و ریسک مشخص شوند [21]. براساس مرجع [21]، این نوع تجزیه‌وتحلیل سناریو، مراحلی را شرح می‌دهد که یک تیم پژوهشی باید در پاسخ به وضعیت کنونی و وضعیت‌های احتمالی آتی یک مورد انجام دهند. همواره یک سوال راهنما هنگام ساخت سناریوها می‌تواند این باشد که «اگر یک جنبه خاص اصلاح شود، در سامانه تجزیه‌وتحلیل چه چیز تغییر خواهد کرد». چنین سناریوهایی «چه می‌شود، اگر» نامیده می‌شوند که می‌توانند نقش مهم و خاصی هنگام مدل‌سازی کاربرد محصولات نانوپدید، ایفا کنند. زمانی‌که به مطالعات LCA نانومواد ساخته‌شده و محصولات نانوپدید پرداخته می‌شود تمام انواع سناریوها و زیر مجموعه‌های آنها [18] فقط ارتباط جزئی دارند.

1- Nano-sized
2- Environmental Release Categories
3- European Chemicals Agency
4- Predicted Environmental Concenteration

۶-۴ مدل‌های LCA در دسترس

در مقدمه گزارش «اصول راهنمای جهانی برای پایگاه داده‌های LCA» در طرح «نوآوری چرخه حیات در برنامه محیط‌زیستی مشترک فیمابین سازمان ملل متحد و انجمن شیمی و توکسیکولوژی محیط‌زیست (SETAC)/(UNEP)[1][2]» [22] تصریح شده است که توسعه مجوعه‌داده‌های قابل‌اطمینان از LCI، نیازمند «تعامل بین مصرف‌کنندگان، تامین‌کنندگان و مدیران» برای کفایت داده‌ها در پایگاه‌داده‌های LCA است. هرچند، این گزارش سطح بالا، مانند دیگر نشریات در حوزه ایجاد و ترکیب داده LCA بر روی قوانین مربوط به مواد متداول و جریانات انرژی درون یک واحد فرایندی تمرکز دارد. هیچ بررسی صریحی وجود ندارد که در باره خواص بیشتری از جریانات درون‌داد یا برونداد انجام شده‌باشد. این خواص، موضوع موردتوجه هنگام پرداختن به نانومواد ساخته‌شده و/یا محصولات نانوپدید هستند (به زیربند ۶-۵ مراجعه شود).

به‌منظور مستندسازی/ذخیره اطلاعات از یک چنین مشخصه‌یابی گسترده برای نانومواد ساخته‌شده (یعنی مستندکردن مسائلی مثل «اندازه و شکل»، «خواص انحلال/پراکنش» یا «خواص سطح»)، لازم است قالب مربوط به مجموعه‌داده‌های LCA بتوانند خواص چندگانه درون یک جریان ماده واحد را فراهم کنند (و کنترل کنند). قالب‌های داده ecoSpold 2[3] [23] و ILCD[4] [24]، دو قالب از رایج‌ترین قالب‌های مورداستفاده در عموم LCA امروزی هستند که هر دو قادر هستند چنین خواص چندگانه‌ای را مدیریت کنند. اولین پیشنهاد در مورد اینکه چگونه چنین خواص افزوده‌ای باید ادغام شوند (مستقل از قالب انتخاب شده واقعی) در مرجع [15]، منتشر شده‌است. در جدول ۳ مقررات گزارش‌دهی خلاصه شده‌است.

جدول ۳- پیشنهاد گزارش‌دهی خواص رهایش‌های نانومواد برای گنجاندن در قالب‌های داده LCA (برگرفته‌شده از مرجع [15])

معیارها	خاصیت	مقدار(ها)	توضیحات
ترکیب	نام تبادلی	نام ماده	نام براساس قوانین در حال استفاده «پایگاه‌داده LCI»
میزان	میزان جرم	m [kg]	جرم برحسب کیلوگرم؛ غلظت عددی با اطلاعات توزیع اندازه و شکل امکان تبدیل به جرم و برعکس را فراهم می‌کند.
شکل	قالب شکل ذره	کروی = S لیفی = F	الیاف نسبت طول- به- قطر> ۳:۱ دارند (تعریف WHO)، همه ذرات دیگر به شکل «کروی» فرض می‌شوند.

1- United Nations Environment Programme
2- Society of Environmental Toxicology and Chemistry
۳- نسخه سوم پایگاه داده ecoinvent بر قالب ecoSpold 2 متکی است.
4- International Reference Life Cycle Data System

جدول ۳- (ادامه)

معیارها	خاصیت	مقدار(ها)	توضیحات
توزیع اندازه	متوسط اندازه	$D_{A/50}$ [nm] D_{Avg} [nm]	برای نانومواد ساخته‌شده کروی، میانه قطر مساحت معادل، ($D_{A/50}$) گزارش می‌شود/ برای نانومواد ساخته‌شده لیفی، قطر میانگین (D_{Avg}) گزارش می‌شود.
	توزیع اندازه، به ترتیب	$D_{A/10}$ [nm] $D_{A/90}$ [nm]	برای نانومواد ساخته‌شده کروی مقادیر، قطر مساحت (اندازه قطری که ٪ ۱۰ ذرات از آن اندازه $D_{A/10}$معادل، (اندازه قطری که ٪ ۹۰ ذرات از $D_{A/90}$کوچکتر هستند) و آن اندازه کوچکتر هستند) گزارش می‌شود. مقادیر آن 1- Defoamerبه‌طور ایدئا Copolymer -۱ ل براساس تجزیه‌وتحلیل SEM/TEM است (روش‌های تجزیه‌وتحلیل مناسب دیگری هم می‌توانند استفاده شوند).
	طول	L [µm]	برای نانومواد ساخته‌شده لیفی، هیچ توزیع اندازه‌ای گزارش نمی‌شود، اما متوسط طول الیاف گزارش می‌شود.

۶-۵ تخصیص (به زیربند ۴-۳-۴، استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۱۴۰۴۴: سال ۱۳۸۶ مراجعه شود)

هنگامی که بیش از یک محصول اقتصادی مناسب از یکی از مراحل فرایندهای تولید نانومواد ساخته‌شده و/یا محصولات نانوپدید، حاصل می‌شود، تخصیص موردنیاز است. همانند مواد متداول، تمام دروندادها و بروندادها «باید مطابق با روش‌های اجرایی به‌وضوح تعیین‌شده به محصولات مختلف، تخصیص داده شوند و باید با هم با روش‌اجرایی تخصیص، مستند و شرح داده شوند». موضوعاتی که نیاز است تا پوشش داده شوند اصولا مشابه هستند، برای مثال، باید اطمینان حاصل شود که مقدار کامل هر جریان منفرد درونداد و برونداد تا به محصولات گوناگون (اقتصادی مناسب) ٪ ۱۰۰ اختصاص داده شده‌است و باید تجزیه‌وتحلیل حساسیت اجرایی شود تا اثر کاربرد رویه‌های تخصیصی گوناگون آزموده شوند.

۶-۶ مثال‌ها

مثال ۱- «منسوجات با نانونقره (nano-Ag)»

موضوعات نانوویژه زیر در این مطالعه بررسی شده‌است (همچنین به مرجع [2] مراجعه شود):

- چه مقدار نانومواد در چه عملیات عامل‌دارکردن[1] و چه اندازه لازم است تا همان اثربخشی ضدباکتری مانند تری‌کلوزان را فراهم آورد؟

1- Functional treatment

- نانومواد در منسوجات (انتشار در فاضلاب، دگرگونی[1] شیمیایی) چقدر بادوام هستند؟
- احساس مصرف‌کنندگان هنگام استفاده از منسوجات با پوشش نانونقره چگونه است:

۱- آیا آنها زیرپیراهنی‌ها را طولانی‌تر می‌پوشند؟

۲- آیا آنها زیرپیراهنی را غالبا تعویض می‌کنند؟

۳- آیا آنها از نانونقره می‌ترسند و بنابراین اعتماد نمی‌کنند یا از خرید این زیرپیراهنی‌ها خودداری می‌کنند؟

- کدام فناوری برای تولید نانونقره انتخاب شده‌است؟ دو فناوری با بلوغ و کارکرد متفاوت بررسی شده‌است. نیاز است این دو فناوری در هنگام مقایسه با تولید تری‌کلوزان بررسی شوند. فرایند تولید می‌تواند یا «تَر» یا «خشک» با انرژی و ماده مصرفی مشابه، ولی با پروفایل‌های انتشار بسیار متفاوت باشند. همچنین توجه شود که فناوری تولید برای تری‌کلوزان، همتای نانونقره، نیاز است تا با سیاهه داده تعمیم[2] داده شود؛
- پیش‌زمینه و پس‌زمینه سیاهه داده: اگر از سیاهه داده‌ها از یک پایگاه‌داده استاندارد استفاده شود: حفظ روش‌های تخصیص مشابه، الزامات کیفیت داده و شفافیت دارای اهمیت هستند. پایگاه داده اکواینونت[3] [17] برای داده‌های پس‌زمینه استفاده می‌شود، اما همچنین سیاهه داده‌های جدید می‌تواند از کتاب‌های راهنمای فنی، مقالات توصیف‌کننده بهترین فناوری‌های تولید موجود یا از طریق محاسبه مطابق با مقررات استوکیومتری، محقق شوند. در شرایط مطلوب، داده انتشار مستقیما اندازه‌گیری می‌شود. تا حد امکان «ویژگی موقعیت» درنظرگرفته شده‌است. این مسئله خصوصا در تداخل الکتریسیته با پروفایل‌های انتشار ویژه هر کشور، مهم است. مستندسازی شفاف برای تفسیر بهتر و استفاده بیشتر از داده است. عدم قطعیت‌ها به‌طور ایدئال با روش کمی به‌جای روش کیفی جمع‌آوری می‌شوند؛
- جمع‌آوری سیاهه مطابق سناریوها انجام می‌شود. سناریوها از ارزیابی موقعیت‌های آتی احتمالی حمایت می‌کنند که اغلب در مورد LCA محصولات نانوپدیدی در عرضه پیش از بازار هستند. مثال زیرپیراهنی نانونقره به‌دلیل آگاهی محیط‌زیستی متفاوت، تغییرات فناوری (برای مثال، فناوری‌های تولید نانونقره، فناوری‌های خشک‌کردن و شست‌وشو) و نفوذ بازار، نیازمند لحاظ نمودن تنوع در عادت‌های مصرف‌کننده است. این سناریوها با استفاده از یک روش‌اجرایی شش مرحله‌ای برگرفته از «تجزیه‌وتحلیل سناریو تکوینی (FSA) »[4] با یک افق زمانی تقریبا ۲۰ ساله توسعه یافته و انتخاب می‌شوند. بسیاری از محرک‌های این سناریوها مبتنی بر دانش کمی موجود و ارزیابی‌ها هستند (برای مثال، نفوذ فناوری‌های تولید نانوذرات، مشخصه‌های فنی ماشین‌های لباسشویی، رفتار مصرف‌کننده)، درحالی که توصیف کمی

1- Transformation
2- Populated with
3- Ecoinvent
4- Formative Scenario Analysis

بقیه موارد دشوارتر بوده و بنابراین نیاز به راهکار کیفی (برای مثال، داده دارای حق ثبت اختراع، خط‌مشی‌ها، مقررات) دارند. گوناگونی سناریوهای احتمالی منجر به اثرات محیط‌زیستی مختلف می‌شوند. به‌منظور داشتن یک نمونه مرجع برای محاسبه ماهیت مرتبط به هر LCA، یک سناریو «بدون نانو»[1] به‌طور موازی ایجاد می‌شود.

مثال ۲- «پوشش‌های نما با نانو- دی‌اکسیدتیتانیم ($nano\text{-}TiO_2$)»

موضوعات نانوویژه زیر در این مطالعه بررسی شده‌است:

چه مقدار نانومواد از کدام اندازه موردنیاز است تا کارکرد موردنظر را فراهم آورد؟

- نانومواد در رنگ چقدر بادوام هستند (منظور رهایش‌های مرتبط با هوازدگی[2] است)؟
- نتایج برای مصرف‌کننده‌ای که چنین رنگ محتوی نانومواد را استفاده می‌کند چیست: آیا رنگ روی دیوار طولانی‌تر باقی می‌ماند؟ آیا آن رنگ سبب می‌شود تا دیوار به دفعات کمتری تمیز شود؟
- کدام فناوری برای تولید $nano\text{-}TiO_2$ انتخاب می‌شود؟ براساس اطلاعات کلی از تامین‌کننده نانومواد به‌کاررفته در این پروژه، مسیر تولید خاص از طریق مسیر سولفات مدل‌سازی شده‌است؛
- پیش‌زمینه و پس‌زمینه سیاهه داده: اگر از سیاهه داده‌ها از یک پایگاه‌داده استاندارد استفاده شود: حفظ روش‌های تخصیص مشابه، الزامات کیفیت داده و شفافیت دارای اهمیت هستند. پایگاه داده اکواینونت برای داده‌های پس‌زمینه استفاده می‌شود، اما همچنین ایجاد سیاهه داده‌های جدید می‌تواند از کتاب‌های راهنمای فنی، مقالات توصیف‌کننده بهترین فناوری‌های تولید موجود یا از طریق محاسبه مطابق با مقررات استوکیومتری، محقق شوند. در شرایط مطلوب، داده انتشار مستقیما اندازه‌گیری می‌شود. در اینجا نتایج آزمایش‌های هوازدگی، اجراشده در طول این پروژه، به‌عنوان مبنایی برای مدل‌سازی رهایش‌های نانوذرات در مرحله استفاده، به‌کار می‌رود. تا حد امکان ویژگی موقعیت در نظرگرفته شده‌است. این مسئله به ویژه در تداخل الکتریسیته با پروفایل‌های انتشار ویژه هر کشور، مهم است. مستندسازی شفاف برای تفسیر بهتر و استفاده بیشتر از داده است. عدم قطعیت‌ها به‌طور ایدئال با روش کمی به‌جای روش کیفی جمع‌آوری می‌شوند؛
- مدل‌سازی سناریو: سناریوها از ارزیابی موقعیت‌های آتی احتمالی که اغلب موارد در LCA محصولات نانوپدیدی که از قبل به بازار عرضه شده‌است، حمایت می‌کنند. در این مثال، رهایش نانومواد در طول چرخه حیات با استفاده از یک مدل جریان اتفاقی ماده (بر پایه احتمالات) با استفاده از طیف وسیعی از سایر منابع داده علاوه‌بر نتایج حاصل از آزمایش‌های هوازدگی که در بالا اشاره شده‌است، برآورد می‌شود.

1- No nano
2- Weathering

مثال ۳ «CNTs در الکترونیک»

موضوعات نانوویژه زیر در این مطالعه بررسی شده‌است:

- چه مقدار نانومواد از کدام اندازه نیاز است تا کارکرد موردنظر را فراهم کند؟
- برای تولید CNTs کدام فناوری انتخاب شود؟ براساس اطلاعات ثبت اختراع[1] موجود برای فناوری FED، در ترکیب با دیگر منابع منتشره، فرایند تولید CNT در اینجا مدل‌سازی شده‌است؛
- پیش‌زمینه و پس‌زمینه سیاهه داده: اگر از سیاهه داده از پایگاه داده استاندارد استفاده شود: حفظ روش‌های تخصیص مشابه، الزامات کیفیت داده و شفافیت مهم است. پایگاه داده «اکواینونت» که به خوبی به آن ارجاع داده می‌شود، برای داده‌های پس‌زمینه استفاده می‌شود، اما همچنین سیاهه داده‌های جدید از کتاب‌های راهنمای فنی، مقالات توصیف‌کننده بهترین فناوری‌های تولید موجود یا محاسبه‌شده با مقررات استوکیومتری محقق می‌شوند. در شرایط مطلوب، داده انتشار مستقیما اندازه‌گیری می‌شود؛ در اینجا هیچ اندازه‌گیری دردسترس نبود؛ اما در همان زمان، رهایش نهایی فقط می‌تواند در فاز عمل‌آوری پایان‌عمر روی دهد. برای این مرحله پایانی حیات، سناریو بدترین حالت استفاده می‌شود. تا حد امکان ویژگی موقعیت در نظرگرفته شده است. این مسئله خصوصا برای تداخل‌های الکتریسیته با پروفایل‌های انتشار ویژه هر کشور، مهم است. مستندسازی شفاف برای تفسیر بهتر و استفاده بیشتر از داده است. عدم قطعیت‌ها به‌طور ایدئال با روش کمی به‌جای روش کیفی جمع‌آوری می‌شوند.

۷ ارزیابی اثرات چرخه حیات (LCIA) (به زیربند ۴-۴، استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۱۴۰۴۴: سال ۱۳۸۶ مراجعه شود)

۷-۱ کلیات

درحال‌حاضر روش‌های LCIA موجود شامل کارکردهای نانوویژه نمی‌شوند. سرنوشت محیط‌زیستی، مواجهه و ارزیابی اثرات مواد شیمیایی متداول، ممکن است تاحدی برای نانومواد ساخته‌شده، برحسب خواص فیزیکی- شیمیایی نانومواد (برای مثال، برای فلزهای حل‌پذیر[2])، کاربردی باشد. الحاقیه‌هایی[3] در LCIA موردنیاز است تا مشخصه‌های نانوویژه همچون اصلاحات سطح برای افزایش قابلیت تحرک، پتانسیل استنشاق عمیق ریوی و فراهمی‌زیستی وابسته به سطح را توضیح دهد.

با نگاه به «رده‌های نقطه‌میانی»[4] که رویکردی مسئله محور را اتخاذ می‌کند و اثرات را به مضامین محیط‌زیستی همچون تغییر اقلیم، سمیت زیست‌بوم، سمیت انسانی و غیره تبدیل می‌کند، روش‌اجرایی

1- Patent
2- Soluble metals
3- Amendments
4- Midpoint categories

منسجمی[1] لازم است تا شاخص‌های رده متفاوت با مسائل نانوویژه وفق‌داده شوند. در اینجا، مهم است تا در ابتدا بر برجسته‌ترین رده‌های مربوط به پتانسیل اثرات نانوویژه همچون سمیت انسانی و سمیت زیست‌بوم تمرکز شود.

۷-۲ مطالعات سمیت زیست‌بوم

مطالعات سمیت زیست‌بوم و به‌ویژه سمیت زیست‌بوم در آب، هم حاد (یعنی بحرانی/شدید)[2] و هم مزمن (یعنی طولانی‌مدت)[3] [10]، کاملا برای نانومواد ساخته‌شده توسعه یافته‌است. روش‌های ایجادشده می‌توانند مستقیما برای محاسبه عامل‌های اثر با استفاده از EC_{50} در ارگانیسم‌های[4] آبی در سطوح تغذیه‌ای مختلف بعد از مواجهه آنها با نانومواد ساخته‌شده و به‌طور مناسب مشخصه‌یابی‌شده، استفاده شوند. سرمایه‌گذاری گسترده در مطالعات سمیت‌نانو در ارگانیسم‌های آبی منجر به ازدیاد اطلاعات شده که می‌توانند برای محاسبه عامل‌های اثر، استفاده شود. همچنین این یک مبنای اطلاعاتی بزرگ برای به‌روزرسانی عامل‌های اثرمواد توده‌ای متناظر است. به‌خصوص، عامل‌های اثر فلزات هنوز عدم قطعیت نسبتا بالایی دارند که می‌توانند به‌طور بالقوه با استفاده از مطالعات سمیت همتای نانویی آنها، اگر هیچ اثر ویژه «نانو» پیدا نشود، کاهش یابند. اکثر شرایط محیط‌زیستی درحد میکرو (خرد) در مدل‌های سرنوشت LCA کنونی منعکس نمی‌شوند. بااین‌حال، مدل‌های سرنوشت LCA می‌توانند عامل‌های سرنوشت عمومی را فراهم کنند که در اکثر شرایط محیط‌زیستی هرچند با درجه معلومی از عدم قطعیت، می‌توانند به‌کار روند. یکی از مدل‌های سرنوشت محیط‌زیستی که با LCA سازگار است مدل «SimpleBox4nano» [25] است. هرچند هنوز در سطح بسیار عمومی است، این مدل مبتنی بر مدل سرنوشت LCA ایجادشده توسط سامانه اتحادیه اروپا برای ارزشیابی مواد (EUSES)[5] [26] است و غلظت نانو (کلوئیدها) را در محیط (هوا، خاک، آب و رسوب) با کینتیک درجه یک محاسبه می‌کند و شامل فرایندهای انحلال و دگرگونی است. به‌دلیل پویا بودن مدل (در مقایسه با LCA متداول که عموما ایستا است)، اجرای کامل در مدل‌های سرنوشت محیط‌زیستی LCA، نیازمند یک افق زمانی به‌طور واضح تعریف‌شده از مطالعه LCA است. اگرچه مدل‌های ابتدایی قابل‌دسترس شده‌اند، بااین‌حال ویژگی‌های دقیق نانومواد ساخته‌شده که برای محاسبه سمیت زیست‌بوم ویژه- مکان مهم است، بسیار نامشخص باقی مانده‌است. این عدم قطعیت متشکل از تغییرپذیری ذاتی شرایط محیط‌زیستی، عدم بازنمایی آنها در مدل‌ها و نبود دانش در زمینه تاثیر متقابل دقیق بین نانومواد ساخته‌شده و عامل‌های محیط‌زیستی است. به‌دلایل عملی، توصیه می‌شود پیش از ترکیب غلظت‌های محاسبه شده نانوذرات با عامل‌های اثر، یک تجزیه‌وتحلیل کمی، نیمه-کمی یا حداقل تجزیه‌وتحلیل عدم قطعیت کیفی درباره سرنوشت محیط‌زیستی نانومواد ساخته‌شده، انجام شود.

1- Consistent procedure
2- Critical/intensive
3- Prolonged
4- Organisms
5- European union system for the evaluation of substances

۳-۷ سمیت انسانی

در ارزیابی سمیت انسانی در LCA، مسیر دریافت اصلی از طریق ریه است، اما دریافت دهانی و عبور از سد-متقاطع[1] بعدی در دستگاه گوارشی نیز می‌تواند موردتوجه باشد. نفوذ پوستی، یک مسیر ورودی بالقوه‌ای است که فقط درصورت بروز اختلال در عملکرد[2] اپیدرم (لایه پوست‌بیرونی)[3] رخ می‌دهد. نانومواد ساخته‌شده می‌توانند به قسمت‌های عمیق ریه‌ها (ناحیه حبابچه‌ای)[4] برسند و در جریان خون با پتانسیل رسوب بیشتری جابه‌جا شده و در ارگان‌های گوناگون تاثیر کنند. به‌علاوه، انواع معینی از نانولوله‌های کربنی با پتانسیل تاثیرات شبه‌آزبستی[5] (پنبه نسوز) در ریه باقی‌می‌مانند. نانومواد ساخته‌شده بر اساس خواص فیزیکی-شیمیایی و نقطه ورودی، کینتیک‌زیستی و نهایتا حالت‌های عمل[6] می‌توانند متفاوت باشند. بنابراین بدیهی است که مشخصه‌یابی فیزیکی-شیمیایی نانومواد ساخته‌شده برای مرتبط ساختن پاسخ‌های زیست‌شناختی/توکسیکولوژیکی با این خواص و همزمان برای شناخت جایی که نانومواد ساخته‌شده با ارگانیسم‌ها تماس پیدا می‌کنند، اجتناب‌ناپذیر است.

کاهش مطالعات درون‌تنی و توسعه مطالعات جایگزین قوی برون‌تنی، یک پیشرفت امیدوارکننده است. بااین‌حال، انواع مختلف مطالعات برون‌تنی جدید در نانوتوکسیکولوژی از ارزش محدودی برخوردار هستند تا جایی‌که همبستگی واضح مطالعات برون‌تنی با مطالعت درون‌تنی، از این طریق نمی‌تواند نشان‌داده شود. به‌علاوه، در مطالعات برون‌تنی تغییرپذیری بزرگی در رابطه با کیفیت آنها [27] نشان داده می‌شود. در LCA، مطالعات طولانی مدت از ارزش بالاتری برخوردارهستند، زیرا می‌توانند مستقیما، بدون برون‌یابی از مطالعات حاد[7] درون‌تنی یا مطالعات برون‌تنی، استفاده شوند. تا زمانی‌که مطالعات همه‌گیرشناختی یا مطالعات برون‌تنی پیشگویانه و قوی دردسترس قرارگیرند، مطالعات درون‌تنی کوتاه و بلند مدت، روش ترجیحی برای ترکیب مواجهه انسانی با پتانسیل اثرات است. علاوه‌بر این، محاسبه فاکتورهای مشخصه‌یابی نانوویژه ممکن است به‌طورکلی از منظر عدم قطعیت نسبتا بالای فاکتورهای مشخصه‌یابی برای سلامت انسانی، موجه باشند. اما در آینده‌ای نزدیک، نیاز است تا نقاط‌پایانی مرتبط از آزمون‌های برون‌تنی نانوتوکسیکولوژی (یعنی سمیت‌سلولی، پتانسیل التهابی، شکل‌گیری گونه‌های فعال اکسیژن، سمیت‌ژنی) در رابطه با موارد زیر ارزشیابی شوند:

الف- قابلیت آنها در آزمون‌های برون‌تنی موردآزمون؛

ب- توان پیشگویانه آنها برای تخمین اثرات بلندمدت.

1- Barrier-crossing
2- Disrupted
3- Epidermis
4- Alveolar region
5- Asbestos-like
6- Modes of action
7- Critical

۷-۴ سایر رده‌های نقطه‌میانی

گنجاندن نانومواد ساخته‌شده در LCA به‌خودی‌خود به یک تغییر روش‌شناختی در رده‌ها، نیاز ندارد. به‌عنوان مثال، با درنظرگرفتن پتانسیل گرم‌شدن جهانی (GWP)[1]، دانش مربوط به اثرات اقلیمی مرتبط با ذرات ریز و بسیارریز ممکن است برای ادغام ذرات (نانوذرات) سنتزشده در رده‌هایی مانند GWP نیز استفاده شود.

۷-۵ رده‌های آسیب

رده‌های آسیب و شاخص‌های آنها معمولا بر پایه شاخص‌های نقطه‌میانی ساخته می‌شوند و بنابراین، انطباق نقطه‌میانی با نانومواد ساخته‌شده در اولویت با انطباق نقطه‌پایانی[2] قرار می‌گیرد. به‌علاوه، نتایج نقطه‌پایانی سطح بالاتری از عدم قطعیت را در مقایسه با نتایج نقطه‌میانی داشته و حاوی موارد ذهنی[3] بیشتری (یعنی ارجحیت‌های فردی، وزن‌دهی[4]) است. شفافیت در مورد فرضیه‌ها و دست‌آوردها به دلیل انتخاب رده‌های آسیب، توصیه می‌شود.

۷-۶ تمایزهای زمانی و فضایی

تمایزهای زمانی و فضایی نیز مسائل مهمی در LCIA هستند. نانومواد ساخته‌شده رفتار پیچیده‌ای در طول زمان نشان می‌دهند که شدیدا بستگی به شرایط محیط‌زیستی دارد. اصلاحات[5] سطحی جزئی نانومواد ساخته‌شده (برای مثال، پوشش‌دهی) می‌تواند به پایداری خیلی بیشتر (یا کمتر) منجر شود. هنگامی که نانومواد در محیط‌زیست منتشر می‌شوند، اطلاعات مربوط به عامل‌های محیط‌زیستی مکانی مهم که بر ساختار سطحی (به‌طور مثال؛ زدایش، تغییر پوشش‌دهی) تاثیر می‌گذارد، موردنیاز است. همزمان اطلاعاتی درباره اینکه چگونه خواص فیزیکی-شیمیایی نانومواد تحت‌تاثیر شرایط محیط‌زیستی در طول چرخه حیات (برای مثال، از طریق انحلال، افزایش تحرک‌پذیری، فراهمی‌زیستی، کلوخگی، ته‌نشینی، انحلال، پراکنش و غیره) نانومواد قرار می‌گیرند، نیز لازم است.

1- Global Warming Potential
2- Endpoint
3- Subjectivity
4- Weighting
5- Modifications

۷-۷ مثال‌ها

مثال ۱- «منسوجات با نانونقره (nano-Ag)»

در شکل ۶، نتایج LCIA برای زیرپیراهنی‌های ضدمیکروبی از لحاظ ردپای اثر اقلیمی (پتانسیل گرم‌شدن جهانی (GWP) براساس گزارش (IPCC)[1] در سال ۲۰۰۱، شکل ۵) و سمیت آب شیرین[2] و دریا نمایش داده شده‌است. نانوویژه به GWP ارتباطی نداشت و بنابراین انتشارات کربن، مانند یک LCA عادی محاسبه شد. شکل ۵، ردپای سناریوهای مختلف اقلیمی سالانه را در جاهایی‌که زیرپیراهنی‌های نانونقره به روش‌های مختلف استفاده می‌شوند نشان می‌دهد. در این شکل استفاده‌کننده با آگاهی محیط‌زیستی مختلف زیر نشان داده شده‌است:

- استفاده‌کننده با آگاهی محیط‌زیستی «پایین» که مکرراً زیرپیراهنی‌ها را عوض کرده و آنها را در دمای بالا در حجم‌های کم در ماشین لباسشویی می‌شوید؛

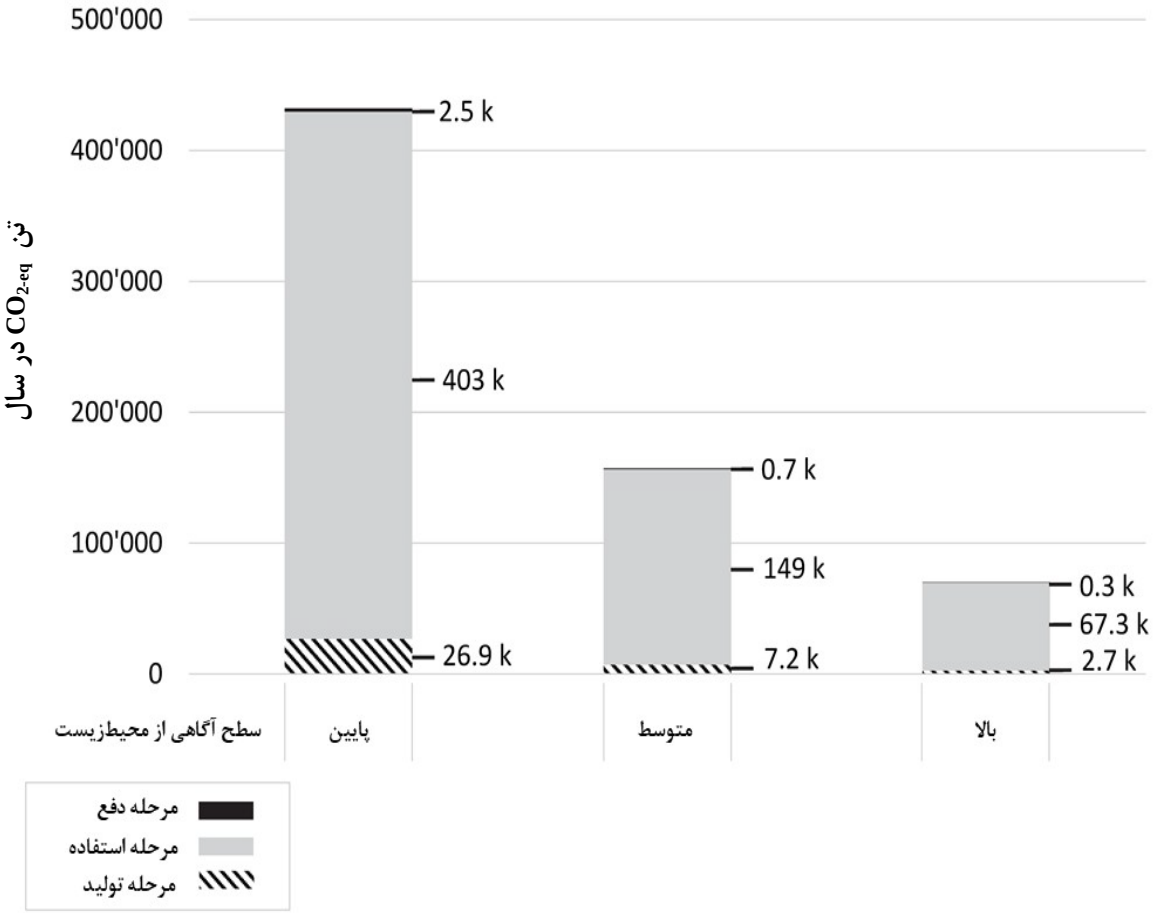
-استفاده‌کننده با آگاهی محیط‌زیستی «متوسط» که یک زیرپیراهنی را در زمان متوسطی پوشیده و با دفعات معمول در حجم‌های کامل در ماشین لباسشویی می‌شوید؛

- استفاده‌کننده با آگاهی محیط‌زیستی «بالا» که همان زیرپیراهنی‌ها را در یک دوره زمانی طولانی‌تری پوشیده و به جای چندین بار شستشو، فقط آنها را در دمای پایین و حجم‌های کامل در ماشین لباسشویی می‌شوید.

سمیت‌زیست‌بوم که در شکل ۶ با عنوان سمیت آب شیرین نشان داده شده‌است، نیازمند یک ارزیابی نانوویژه است. در مرحله توسعه منسوجات نانونقره، مقدار نسبتا بالایی از نقره برای عامل‌دارشدن منسوجات لازم است که در مرحله تولید با پسماند قابل‌توجهی همراه بوده و به‌طور معناداری بر سمیت آب‌شیرین در LCA تاثیر می‌گذارد. از طرف دیگر، تولید نانونقره و غلظت نهایی در منسوجات می‌تواند در منسوجات نانونقره تجاری‌شده، اصلاح شود و درنتیجه سمیت آب شیرین ناشی از نانونقره تبدیل به یک مشکل جزئی از منظر سمیت کلی در آب شیرین شود. میله‌های خطا[3] برگرفته از سیاهه داده بوده و ممکن است تمام عدم قطعیت‌ها را منعکس نکنند (به‌طور مثال، برگرفته از ارزیابی اثرات). باتوجه به کم بودن منابع علمی در خصوص سمیت نانونقره در آن زمان، بخش محلول نانونقره، زیست‌دسترس‌پذیر[4] بوده و بنابراین به‌طور بالقوه سمی درنظر گرفته شده‌است. به‌علاوه تعیین راندمان حذف[5] از تصفیه‌خانه فاضلاب، صرفا براساس مدل‌سازی از بخش رهاشده و محلول نانونقره که در ارزیابی‌ها مدنظر قرار می‌گیرد، انجام می‌شود.

1- Intergovernmental Panel on Climate Change
2- Freshwater
3- Error bars
4- Bioavailable
5- Removal efficiency

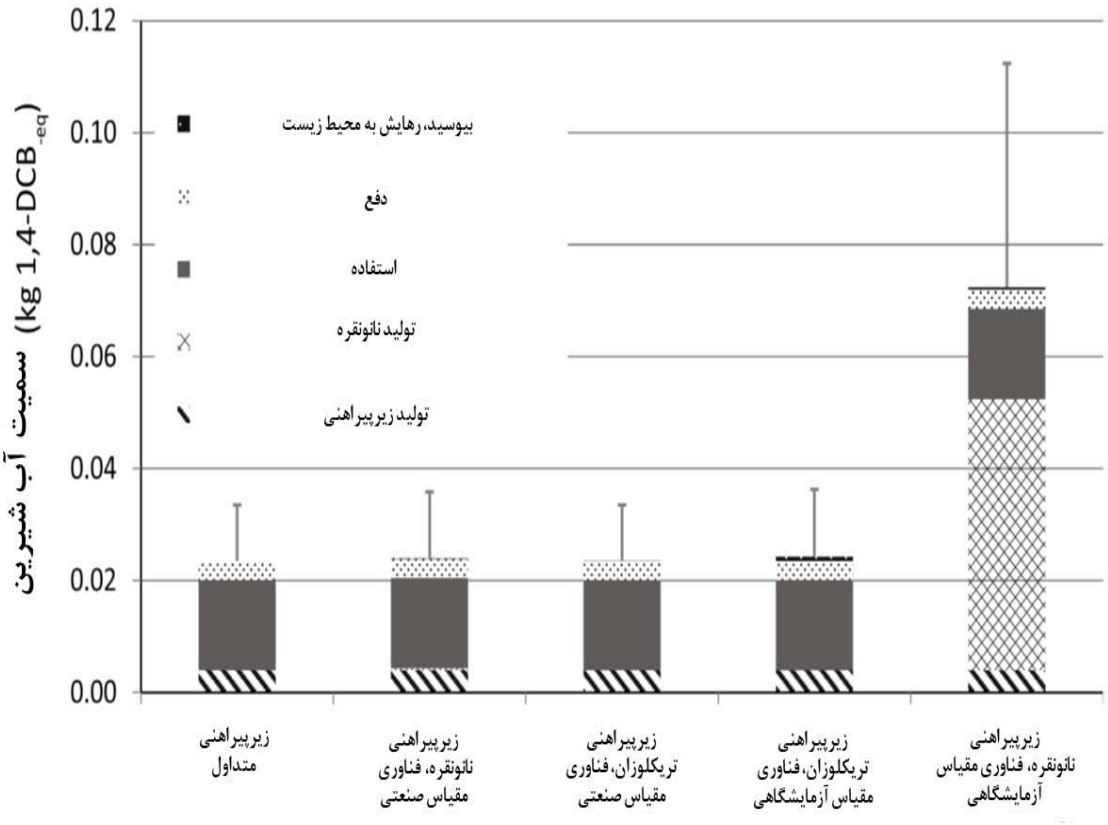
محاسبه سمیت براساس روش USES-LCA[1] با استفاده از مقادیر EC_{50} برگرفته از مطالعات گوناگون سمیت نانونقره بود که پس از آن به مدل USEtox[2] وارد شد و هم‌اکنون، به‌عنوان روش‌های مورد توافق همه‌جانبه امروزی در ارزیابی اثرات چرخه حیات شناخته شده‌است.



شکل ۵- ردپای سالانه اقلیمی (GWP IPCC 2001، ۱۰۰ ساله) از سناریوهای متفاوت با استفاده زیرپیراهنی‌های نانونقره به شکل‌های مختلف

مرحله استفاده، مستقل از شستشو، طول عمر یا فناوری تولید زیرپیراهنی‌ها بود. بیشترین اثرات محیط‌زیستی، متعاقب مرحله تولید بود. مرحله دفع تاثیر معناداری بر نتایج رده ردپای اقلیمی ندارد. در این مثال، زیرپیراهنی‌های زیست‌کش [3] یک مخلوط از زیرپیراهنی‌هایی با پوشش نانونقره و تری‌کلوزان هستند. سناریوها برپایه فرضیه حالت‌های آتی امکان‌پذیر سامانه است و بنابراین، میله‌های خطا را نمی‌توان به نتایج اضافه کرد.

1- Uniform System for the Evaluation of Substances adapted for LCA purposes
2- Uniform System for the Evaluation of toxicity
3- Biocidal



یادآوری- نانونقره مربوط به تولید زیرپیراهنی با تف‌کافت افشانه‌ای شعله‌ای یا فناوری پلاسما با هم‌پاشی نقره تولید می‌شود. میله‌های خطا، بالاترین حد بازه اطمینان ٪ ۹۵ را نشان می‌دهد (عدم قطعیت ناشی از LCI).

شکل ۶- سمیت آب شیرین مربوط به چرخه حیات یک زیرپیراهنی، تمایز بین غلظت‌ها و فناوری‌های به‌کاررفته برای محصولات تجاری و محصولات در مرحله توسعه

پس از آنکه تجزیه‌وتحلیل کامل شد، گونه‌زایی[1] نانونقره درطول چرخه حیات آنها بهتر شناخته می‌شود (یعنی آیا نانونقره سولفیده شده‌است) و بنابراین، مقادیر به‌روز شده EC_{50} می‌تواند برای ارزیابی دقیق‌تر سمیت نانونقره منتشره از زیرپیراهنی‌ها به تصفیه‌خانه فاضلاب و سرانجام به رودخانه‌ها و دریاها (به شکل ۶ مراجعه شود) محاسبه شود. به‌علاوه، ارزیابی آتی سمیت زیست‌بوم نانونقره ممکن است در شرایط محیط‌زیستی (ویژگی موقعیت) بررسی شود که دگرگونی شیمیایی نقره را در حد قابل‌توجهی تعیین می‌کند.

1- Speciation

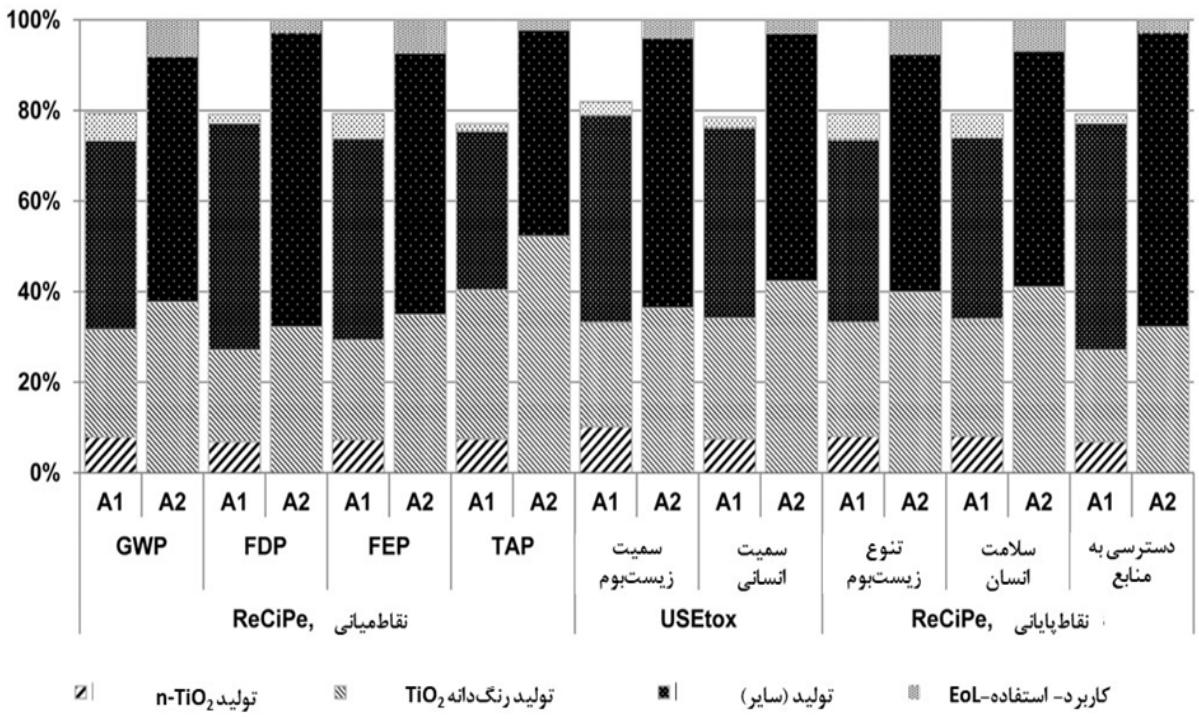
اجماع نظر درباره شرایط محیط‌زیستی «معمول» ممکن است به رده سناریوهای مختلف سرنوشت محیط‌زیستی و ارتباط آنها با اطلاعات سمیت کمک کند. هرچند این «مثال» شامل سمیت‌نانو در محیط‌زیست آبی است، اما مواجهه انسان با نانونقره را شامل نمی‌شود. این مسئله تاحدی نقطه ضعف این مطالعه است، اما بیشتر یک مشکل روش‌شناختی است: مدل‌سازی سرنوشت محیط‌زیستی انتشار نانومواد محیط پیرامون نیازمند بهبود بیشتر (توسعه، صحه‌گذاری، هماهنگ‌سازی)، هم در فضای باز (محیطی) و خصوصا انتشار در فضای بسته (داخلی) است و حتی اگر فقط یکی از مدل‌های موجود انتخاب شوند، روش‌های LCA شامل جذب [1] انسانی و توزیع‌زیستی نانونقره نخواهند بود. سمیت مزمن باید پس از تعیین کینتیک‌زیستی تخمین زده شود. فقط زمانی که زنجیره کاملی از انتشار-سرنوشت-جذب-اثر، کامل باشد، آنگاه اثرات سمیت انسانی می‌تواند در مطالعه LCA ارزیابی شود.

مثال ۲- «پوشش‌های نما با نانو- دی‌اکسیدتیتانیم ($nano\text{-}TiO_2$)»

نتایج LCIA با استفاده از یکی از جدیدترین روش‌های LCIA، روش *ReCiPe*[2] به‌دست می‌آید که هم برای سطوح «نقطه‌میانی و هم نقطه‌پایانی» و هم چارچوب USEtox برای هر دو رده اثرات سمیت (سمیت انسانی، سمیت زیست‌بوم) است. به‌طورکلی، نتایج در این مطالعه با روش *ReCiPe* بدون درنظر گرفتن رهایش‌های نهایی نانومواد ساخته‌شده نشان داده می‌شود؛ فقط برای دسته اثرات سمیت زیست‌بوم، نتایج از جمله اثرات رهایش‌های نانومواد ساخته‌شده گزارش می‌شوند. در شکل ۷، دامنه‌ای از عوامل مختلف به‌دست آمده از سه روش ذکرشده در بالا (نقاط‌میانی *ReCiPe*، *USEtox*، نقاط‌پایانی *ReCiPe*) برای مثال در رنگ نانو- دی‌اکسیدتیتانیم (یعنی سامانه رنگ A) نشان داده شده‌است.

1- Uptake

۲- روشی برای ارزیابی اثرات چرخه حیات که اولین بار در سال ۲۰۰۸ اجرا شده‌است و هدف اصلی آن کاهش فهرست طولانی نتایج سیاهه چرخه حیات به یک تعداد محدود است.

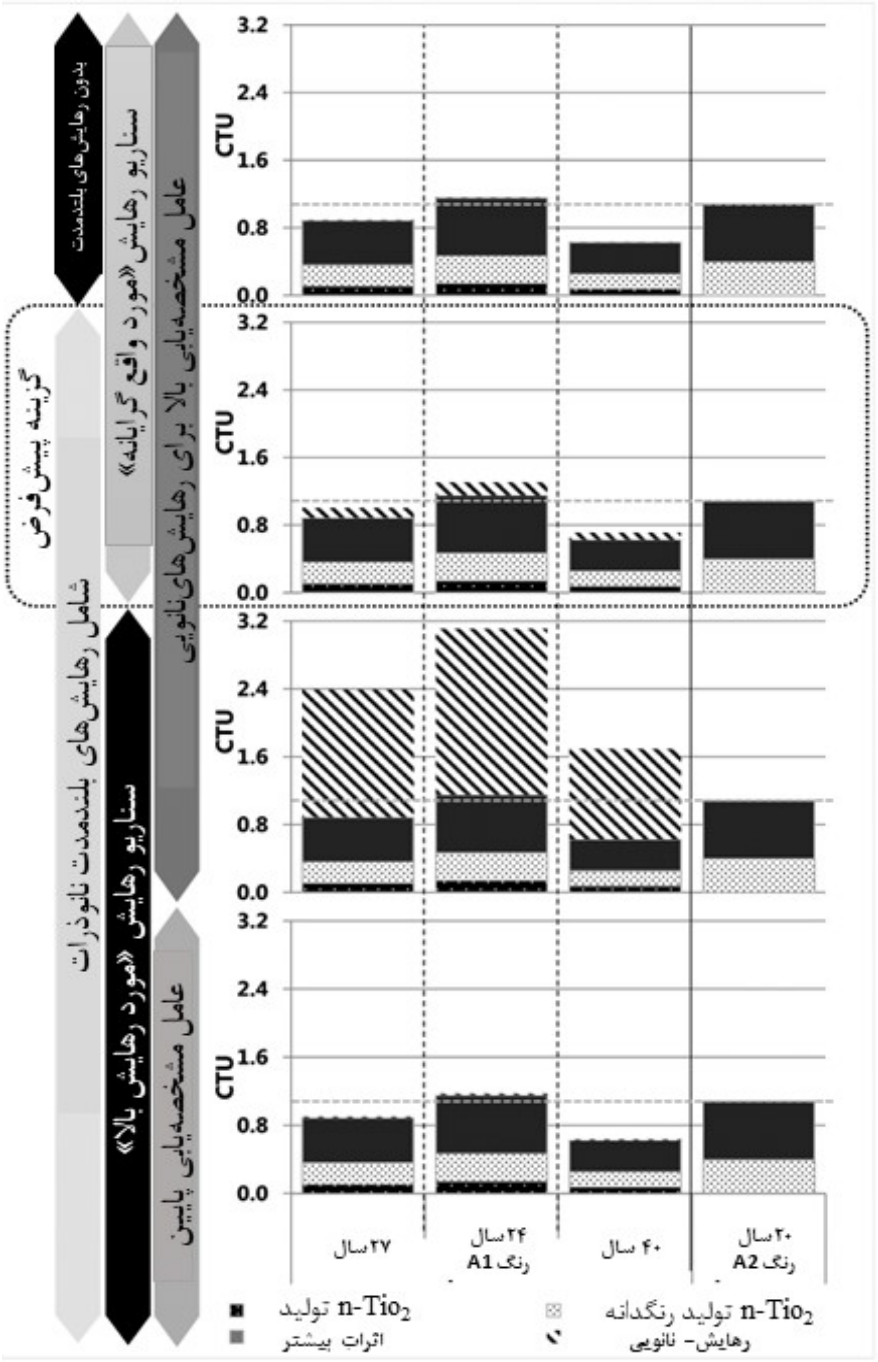


یادآوری- اثر محیط‌زیستی چرخه حیات کامل نسبت به بالاترین پیامد (٪ ۱۰۰=) در هر عامل نشان داده می‌شود. موارد نمایش داده‌شده در شکل شامل شاخص‌های «نقطه‌میانی ReCiPe»: «پتانسیل گرم‌شدن جهانی (GWP)»، «پتانسیل غنی‌سازی آب شیرین (FEP)[1]»، «پتانسیل کاهش سوخت فسیلی (FDP)[2]» و «پتانسیل اسیدی‌کردن زمین(TAP)[3]»، دو عامل سمیت از مدل USEtox، همچنین سه رده آسیب از روش «نقطه‌پایانی ReCiPe» هستند.

شکل ۷- تاثیر محیط‌زیستی چرخه حیات کامل (از تولید رنگ تا دفع نهایی آن) برای محافظت از $1\ m^2$ دیوار به مدت ۸۰ سال با رنگ‌های A1 و A2 (برای ترکیب داده، به جدول ۲ مراجعه شود)

هرچند تمام عامل‌ها بدون درنظرگرفتن رهایش احتمالی نانومواد ساخته‌شده، الگوی مشابهی را نمایش می‌دهند، اما رنگ A_1 به دلیل ذخایر رنگی[4] (به علت طول‌عمر[5] طولانی‌تر رنگ A_1)، اثراتی را نشان می‌دهد که حدود ٪ ۲۰ کمتر از اثرات رنگ A_2 است. الگوی نمایش داده‌شده در شکل ۸، گزارش نتایج ارائه‌شده درمورد nano-TiO_2 است [28] که بااستفاده از نتایج سناریو مدل‌سازی انتشارات احتمالی نانومواد ساخته‌شده درطول چرخه حیات، در ترکیب با فاکتور مشخصه‌یابی سمیت زیست‌بوم در آب شیرین با مدل USEtox به‌دست آمده‌است.

1- Freshwater Eeutrophication Potential
2- Fossil Fuel Depletion Potential
3- Terrestrial Acidification Potential
4- Saving of Paint
5- Life-time



یادآوری- نتیجه رنگ A_1 به‌عنوان کارکرد طول‌عمر آن (۲۴، ۲۷ و ۴۰ سال)، همچنین به‌عنوان کارکرد شمول (یا عدم شمول) رهایش بلندمدت (LT)[1]، سناریو رهایش واقعی و فاکتور مشخصه‌یابی برای رهایش ذرات nano-TiO_2 استفاده می‌شود.

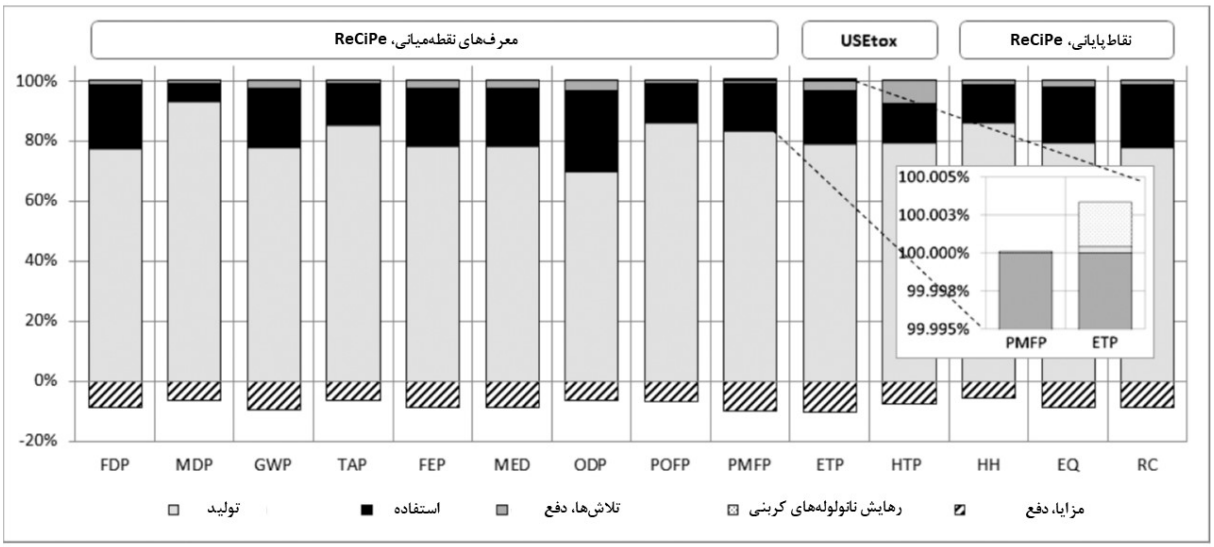
شکل ۸- پتانسیل سمیت زیست‌بوم (بیان‌شده در واحدهای مقایسه‌ای سمیت: CTU[2]) رنگ های A_1 و A_2 در طول چرخه حیات کامل برای محافظت از $1\ m^2$ دیوار طی ۸۰ سال

1- Long-term
2- Comparative Toxic Units

همانطور که در شکل ۸ در «گزینه پیش‌فرض» مشاهده می‌شود، اثرات این رهایش‌ها تقریبا به‌همان اندازه ذخایر رنگ است. هم‌زمان، عوامل زیادی وجود دارند که به میزان زیادی نامعین بوده و تغییرپذیری آنها اثر قابل‌توجهی بر مقایسه بین دو رنگ **A1** و **A2** دارد.

مثال ۳- «CNTs در الکترونیک»

در رابطه با این مطالعه، نتایج LCIA مجددا با روش ReCiPe، هم در سطح «نقطه‌میانی و هم نقطه‌پایانی» و چارچوب USEtox برای دو رده اثر سمیت (سمیت انسانی، سمیت زیست‌بوم) گزارش شده‌است. در شکل ۹ اثرات محیط‌زیستی کلی طی چرخه حیات کامل یک دستگاه تلویزیون ۳۶ اینچ FED با استفاده از CNTs در فناوری صفحه نمایش، نشان داده شده‌است.



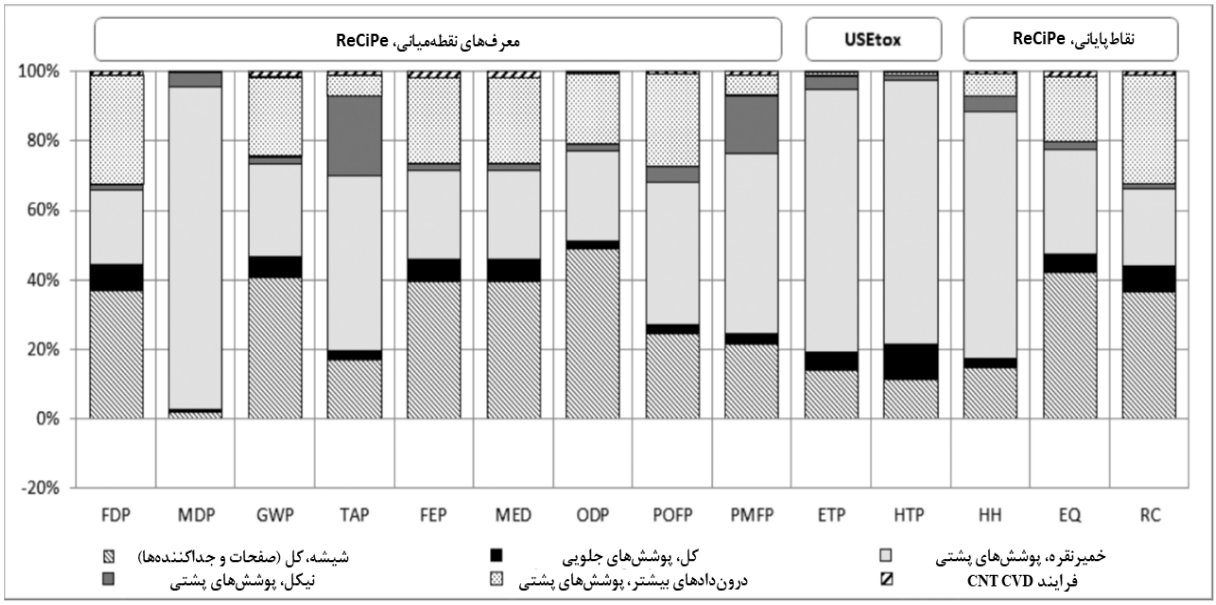
یادآوری- اثرات محیط‌زیستی به دو مرحله حیات تقسیم می‌شوند که در بخش بالایی شکل ۴ نمایش داده شده‌است، موارد نمایش داده شده شامل: «نقاط‌میانی ReCiPe» برای پتانسیل کاهش فسیلی (FDP، پتانسیل کاهش فلز (MDP)[1]، پتانسیل گرم‌شدن جهانی (GWP) ، پتانسیل اسیدی کردن زمین (TAP) ، پتانسیل غنی‌شدگی آب شیرین (FEP)، پتانسیل غنی‌شدگی دریایی (MEP)[2]، پتانسیل کاهش اوزن (ODP)[3]، پتانسیل تشکیل اکسیدکننده فوتوشیمیایی (POFP)[4]، پتانسیل تشکیل مواد ذره‌ای (PMFP)[5]؛ عوامل USEtox برای پتانسیل سمیت زیست‌بوم (ETP)[6] و پتانسیل سمیت انسانی (HTP)[7]؛ رده‌های آسیب «نقاط‌پایانی ReCiPe» سلامت انسانی (HH)[8]، کیفیت بوم‌سازگان (EQ)[9] و مصرف منابع (RC)[10].

شکل ۹- اثرات محیط‌زیستی یک دستگاه تلویزیون ۳۶ اینچی FED درطول چرخه حیات کامل

1- Metal Depletion Potential
2- Marine Eutrophication Potential
3- Ozone Depletion Potential
4- Photochemical Oxidant Formation Potential
5- Particulate Matter Formation Potential
6- The Usetox Factors For Ecotoxicity Potential
7- Human Toxicity Potential
8- The Recipe Endpoints Damage Categories Human Health
9- Ecosystem Quality
10- Resource Consumption

این نتایج، برتری مرحله تولید دستگاه را درمیان تمام عوامل LCIA نمایش داده‌شده، نشان می‌دهد. ارتباط رهایش‌های نانولوله‌های کربنی در عملیات پایان‌عمر در ضمیمه سمت راست شکل ۹ نمایش داده شده‌است.

برای پتانسیل تشکیل مواد ذره‌ای (PMFP)[1] عامل نقطه‌میانی ReCiPe این رهایش‌ها هنوز قابل‌رویت نیست درحالی‌که رهایش این نانولوله‌های کربنی، اثر کوچکی را در پتانسیل سمیت زیست‌بوم USEtox (یعنی ٪ ۰٫۰۰۳ به اثرات کل می‌افزایند) نشان می‌دهند. هنگام کاهش زاویه دید بر تولید واقعی پنل FED (حاوی CNTs)، عوامل اثر بررسی‌شده گوناگون، نشان می‌دهند که تولید CNT نقش بسیار جزئی در کل اثرات ایفا می‌کند (به شکل ۱۰ مراجعه شود).



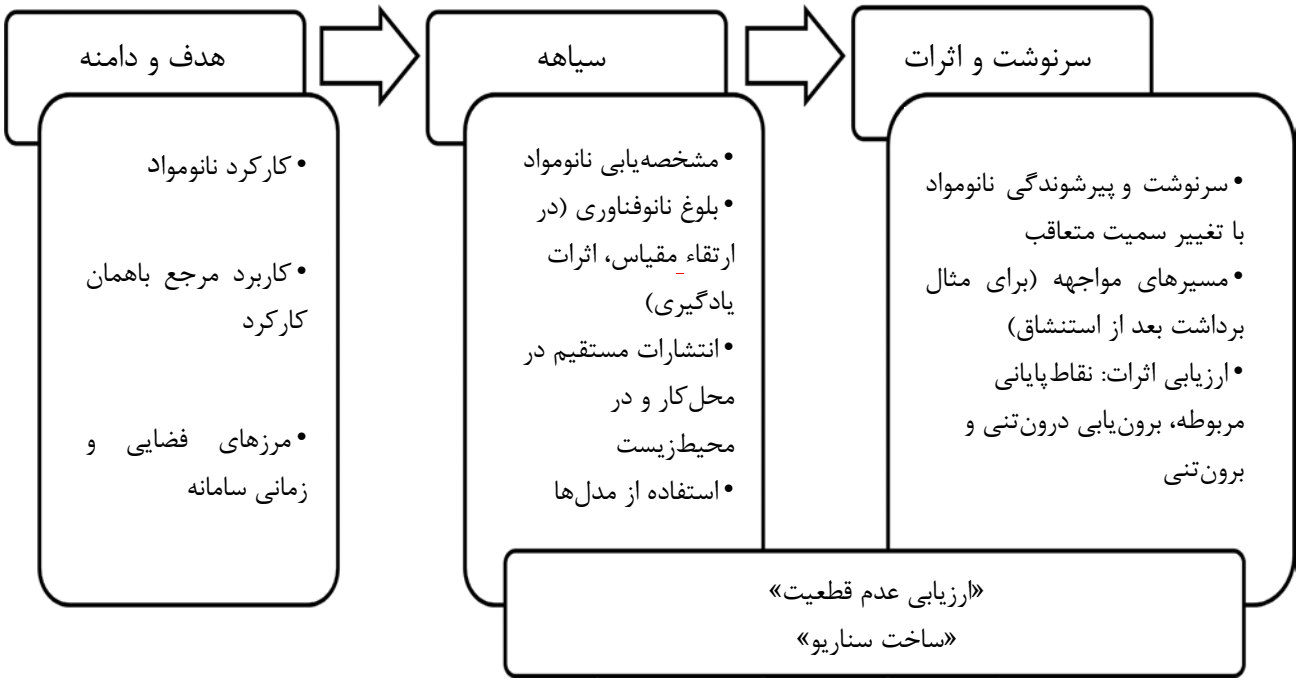
شکل ۱۰ – اثرات محیط‌زیستی تولید پنل FED (برای کوته‌نوشت‌های گزارش شده عوامل LCIA به شکل ۹ مراجعه شود)

۸ تفسیر چرخه حیات (به زیربند ۴-۵، استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۱۴۰۴۴: سال ۱۳۸۶ مراجعه شود)

شناسایی و بحث عناصر داده نانوویژه که به‌طرز معناداری به اثر رده‌ها کمک می‌کنند، بخشی از تفسیر نتایج است. به‌علاوه، نیاز است تا انطباق و تمامیت آن، مطابق با دامنه کاربرد و هدف مطالعه تایید شود.

1- Particulate Matter Formation Potential

در شکل ۱۱، خلاصه‌سازی کوتاهی از بندهای ۴ تا ۶ این استاندارد همراه با توضیح برخی از مرتبط‌ترین موارد نانوویژه برای بررسی در LCA نانومواد ساخته‌شده و محصولات نانوپدید ارائه شده‌است. تجزیه‌وتحلیل مطالعات LCA در زمینه کاربردهای نانو، خواه آنها شامل این موارد باشند و یا اگر حداقل این موارد را بحث‌کنند، ارزشمند است.



شکل ۱۱- جنبه‌های کلیدی انتخابی برای بررسی هنگام تفسیر یک مطالعه LCA نانوویژه. لطفا بادقت بازرسی شود که‌آیا موارد ستاره دار(•) موردتوجه قرارگرفته‌اند، درغیر این‌صورت ممکن است مطالعه نیاز به بهسازی جنبه‌ها داشته باشد

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

- آیا از روش‌های استانداردشده و پروتکل‌های هماهنگ‌سازی‌شده برای مشخصه‌یابی نانومواد استفاده شده‌است؟

- اگر نشده‌است: بررسی کنید که آیا روش‌های استانداردشده یا پروتکل‌های هماهنگ‌سازی‌شده‌ای ازقبل موجود هستند یا آیا روش‌های جایگزین بهینه‌تری استفاده می‌شود (در این خصوص مراجع ذی‌صلاح، همانند کمیسیون اروپا (EC)[1] یا سازمان‌هایی مانند OECD اسناد مرتبطی را منتشر می‌کنند)؛

1- European commission

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

- اگر نشده‌است: بررسی کنید آیا دامنه کاربردی مطالعه LCA شامل مسیرهای مواجهه مرتبطی می‌شود که در ارزیابی مواجهه درنظر گرفته نشده‌باشد. توصیه می‌شود هر مسیر نادیده‌گرفته‌شده‌ای توجیه شده‌باشد؛

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

- اگر نشده‌است: فرایندهای دگرگونی به‌ندرت در مطالعات LCA گنجانده می‌شوند. با وجود این، اگر سرنوشت، مواجهه و سمیت محصولات/مواد دگرگون‌شده به‌طور معناداری با محصول/ماده مادر متفاوت باشد، می‌توانند مرتبط باشند؛

- آیا خواص فیزیکی- شیمیایی که می‌توانند بر فراهمی‌زیستی، کینتیک، و دُز داخلی تاثیرگذار باشد، به‌میزان کافی شرح داده شده‌است؟

- برای دسترسی به فهرستی از خواص مرتبط و سودمندی آنها برای تفسیرمطالعه می‌توان به‌عنوان مثال به استاندارد CEN/TS 17010:2016 مراجعه کرد؛

- آیا عامل تاثیر از مرتبط‌ترین حالت‌های عمل سمی[1] درنظرگرفته شده‌است؟

- مطالعات سمیت اغلب فقط یک حالت عمل را در نظر می‌گیرند. به‌طور مطلوب، یک مجموعه یا حداقل حالت مبنای عمل[2] از مقالات شناخته می‌شوند و لذا توصیه می‌شود برای محاسبه عامل تاثیر، متون علمی درنظرگرفته شوند؛

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

- به‌واقع هیچ نانومواده‌ای همتای کاملا معادل ندارد. اما به‌هرحال، 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 منتشرشده از سوی مراجع ذی‌صلاح (مانند کمیسیون اروپا) یا سازمان‌هایی (مانند OECD) یافت می‌شود.

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

1- Modes of toxic action
2- Principal mode of action

- درغیر این‌صورت: 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.

۹ گزارش‌دهی (به بند ۵، استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۱۴۰۴۴: سال ۱۳۸۶ مراجعه شود)

۹-۱ کلیات

همانگونه که در رابطه با مطالعات LCA متداول در بند ۵ استاندارد ملی ایران شماره ۱۴۰۴۴: سال ۱۳۸۶شرح 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 تجزیه‌وتحلیل عدم قطعیت بخش جدایی‌ناپذیر از گزارش‌دهی باشد. در شکل ۱ (در بند ۴) در قالب یک مثال نشان داده‌شده‌است که چگونه عدم قطعیت می‌تواند برای خواننده قابل‌رویت و به سادگی قابل‌فهم شود. توصیه می‌شود مطالعات از تجزیه‌وتحلیل‌های کیفی به سمت تجزیه‌وتحلیل‌های کمی سوق داده شوند، اما همچنان یک چارچوب محکم برای پذیرش کمی منابع مهم در عدم قطعیت‌ها وجود ندارد.

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 ساخته‌شده در طی مراحل چرخه حیات بررسی‌شده، انجام شود. این خواص از اهمیت تعیین‌کننده‌ای برای تعیین صحه‌گذاری علمی LCAs نانوویژه، برخوردار است.

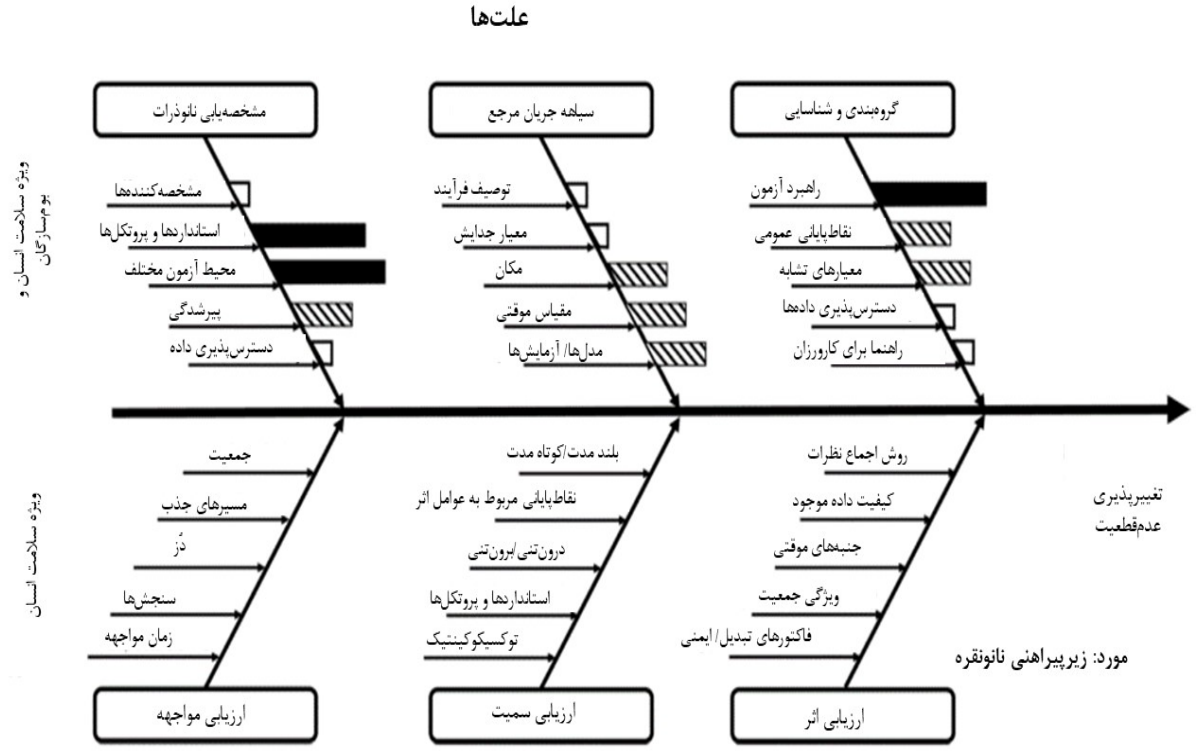
در چنین مطالعاتی مستندسازی از جنبه‌های نامعلوم[1] به‌عنوان یک عنصر مهم افزوده شناخته می‌شود، برای مثال: سیاهه داده نامعلوم، فاکتورهای مشخصه‌یابی نامعلوم (و بنابراین، ارزیابی‌های نامعلوم از رهایش‌ها به محیط‌زیست) و غیره. این کار به خواننده کمک می‌کند تا نقاط قوت و ضعف مطالعه را درک‌کرده و تفسیری نقادانه از مطالعه را ارایه کند.

1-Missing aspects

۹-۲ مثال‌ها

مثال ۱- «منسوجات با نانونقره (nano-Ag)»

برای هریک از سه مثال مطالعه‌شده، مقالاتی با جزئیات بیشتر در دسترس است ([6-8]) که حتی در مورد مثال‌های ارائه شده دیدگاهی را با جزئیات بیشتر، به‌همراه موارد تکمیلی مرتبط، فراهم می‌کند. در شکل ۱۲ کاربرد چارچوب تجزیه‌وتحلیل عدم قطعیت در بند ۴ نشان داده شده‌است.



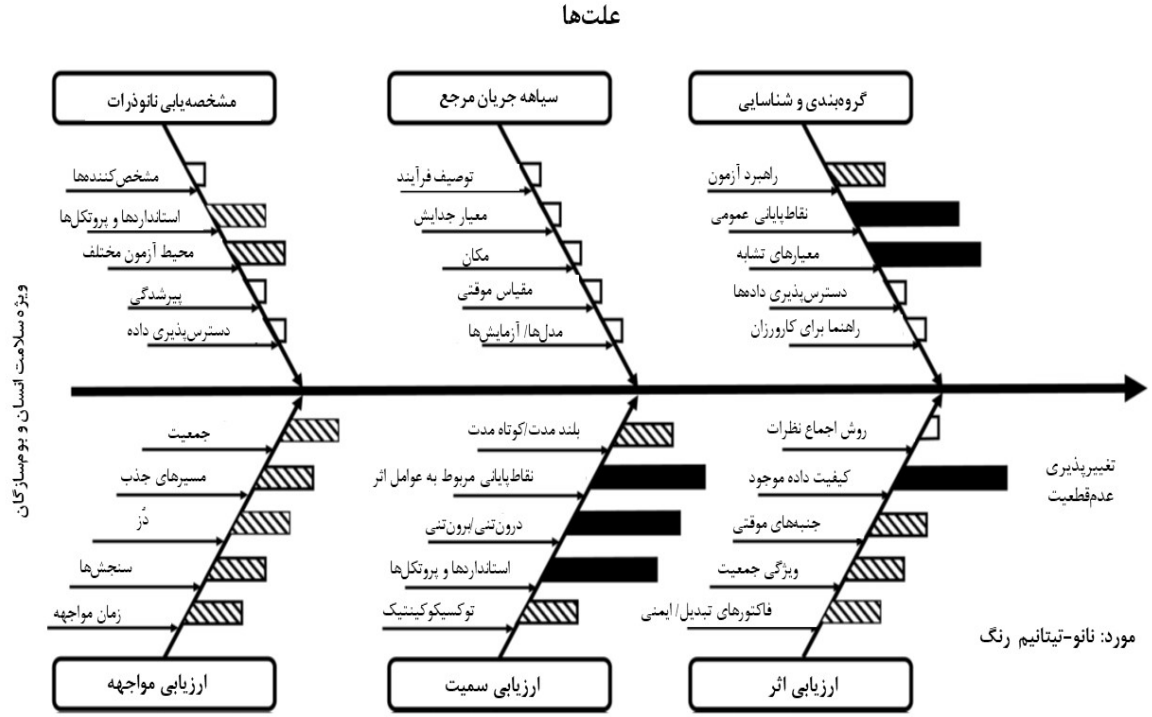
شکل ۱۲- عدم قطعیت نانوویژه و ارزیابی تغییرپذیری، به‌کاررفته در منسوجات نانونقره

تجزیه‌وتحلیل علت و معلولی در مثال زیرپیراهنی نانونقره، نشان می‌دهد که تمام بخش سمیت انسانی، جزئی از ارزیابی اثرات نبوده و از این رو در کل عدم قطعیت و تغییرپذیری (بخش پایین‌تر پیکان اصلی در شکل ۱۲) مشارکت ندارند. این تجزیه‌وتحلیل بر سمیت زیست‌بوم در انتشارات چرخه حیات از منسوجات نانونقره تمرکز دارد. داده مشخصه‌یابی مربوط به نانونقره به سهولت دردسترس است (بنابراین عدم قطعیت‌های پایین)، اما مشخصه‌یابی اساساً برپایه پروتکل‌های غیراستاندارد بوده و در محیط (واسط) متفاوت انجام شده‌است و لزوماً شرایط محیط‌زیستی واقع‌گرایانه را نشان نمی‌دهد.

یک چالش اساسی «پیرشوندگی» یعنی دگرگونی مواد شیمیایی در محیط‌زیست در گذر زمان است. ادغام بسیاری از شرایط محیط‌زیستی که بر سرنوشت محیط‌زیستی نانونقره اثر دارد، بسیار دشوار است. در رابطه با «سیاهه جریان مرجع»، داده اندازه‌گیری برای فرایندهای پیش‌زمینه و فرایندهای پس‌زمینه توسط پایگاه‌داده اکواینونت که سطح معینی از کیفیت را تضمین می‌کند، پوشش داده می‌شود. معیارهای جدایش[1] که به روش معمول و ویژه برای مقدار کوچکی از نانومواد ساخته‌شده موجود در محصول نانوپدید، استقرار می‌یابند، بخشی از LCI هستند. این مسئله به این دلیل است که هدف و دامنه کاربرد مطالعه به‌طور ذاتی/طبیعی کارکردهای نانومواد ساخته‌شده را درنظر می‌گیرد. «سیاهه جریان مرجع» منطقه‌ای‌شده نیستند (برخلاف تداخل‌های الکتریسیته ویژه هر کشور). مقیاس زمانی شامل سناریوهای مختلفی است که برای مثال توسعه فناوری را درنظر می‌گیرد. تنظیم طول میله‌ها از یک مقدار متوسط تا یک مقدار کوچک تحت بحث و گفتگو است، زیرا بیشتر LCAs شامل مقیاس زمانی با یک چنین روش ویژه‌ای نیستند. بااین‌حال، سناریوهای نیمه کمی تنها در بخش جزئی از تمام تاثیرات بالقوه ناشی از تغییرپذیری‌ها در داده برگرفته از دوره‌های زمانی مختلف، نقش دارند. میله‌های متوسط مربوط به آزمایش‌ها و مدل‌ها، از روش استدلالی برگرفته از کل این استاندارد تبعیت می‌کنند. درحالی‌که مدل‌ها و آزمایش‌ها به‌طور ویژه با نانومواد ساخته‌شده به‌طور مثال برای منسوجات نانونقره انطباق یابند، هنوز فضا برای بهبود بیشتر آزمایش‌ها و مدل‌ها یعنی گسترش و صحه‌گذاری بیشتر آنها وجود دارد. شناسایی و گروه‌بندی نانومواد ساخته‌شده موضوع نسبتاً جدیدی برای LCA است؛ هنوز یک راهبرد آزمون یا یک اجماع نظر در مورد اینکه آیا نقاط‌پایانی کنونی برای نانومواد ساخته‌شده قابل‌اجرا (و جامع) هستند، وجود ندارد. یک راهبرد آزمون مناسب، به‌طور معناداری قابلیت اطمینان و جامعیت نتایج سمیت را بهبود خواهد بخشید. اگر با استفاده از نقاط‌پایانی کنونی، روش LCIA در زمینه ارزیابی سمیت زیست‌بوم را دنبال کنید، از موضوع منحرف نمی‌شوید (فراموش نشود که نقاط‌پایانی ممکن نیست تمام خصیصه‌های سمیت نانومواد ساخته‌شده را شامل شود). یک راه‌حل موردتوافق در باره این سوال که «آیا این نانوماده مطابق نانوماده دیگر یا مشابه آن است» هنوز باید جستجو شود و ممکن است استفاده از داده‌های موجود پیشین برای نانومواد ساخته‌شده آسانتر از نانومواد ساخته‌شده (مشابه) جدید باشد. مثال منسوجات نانونقره براساس یک پایگاه‌داده قوی[2] بوده و نیاز به راهنمایی کارورزان از این منظر وجود ندارد، زیرا این طرح توسط یک گروه پژوهشی باتجربه انجام شده‌است.

1-Cut off criteria
2-Solid

مثال ۲- «پوشش‌های نما با نانو-دی‌اکسیدتیتانیم ($nano\text{-}TiO_2$)»



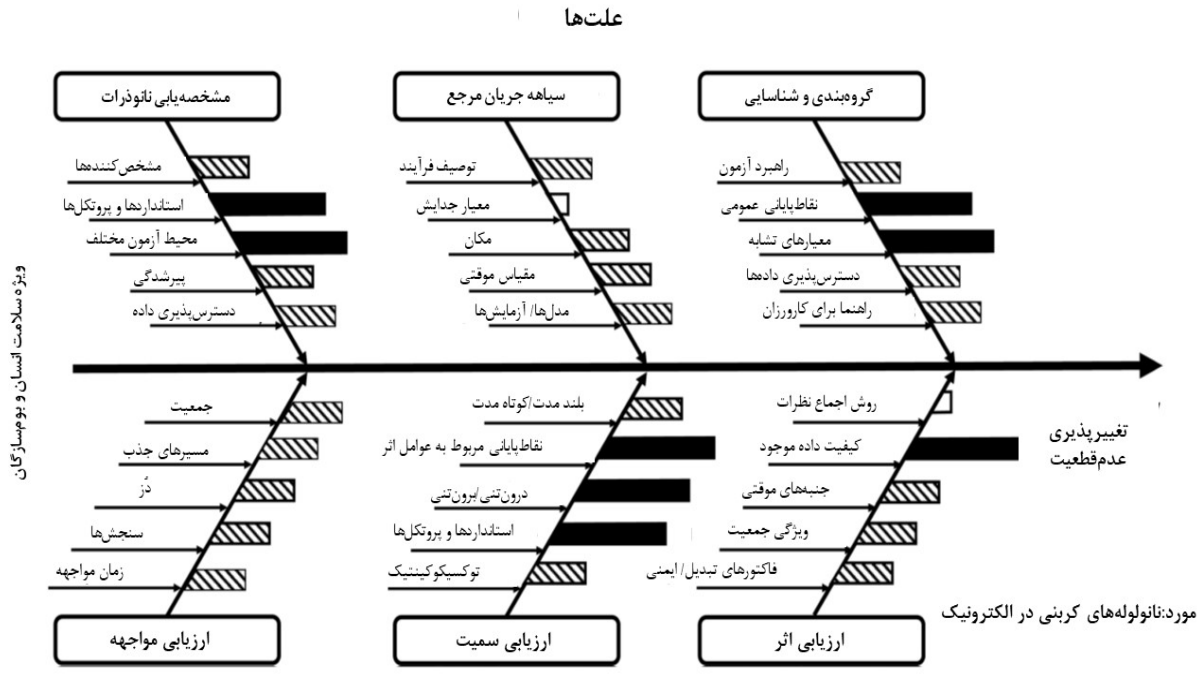
شکل ۱۳- ارزیابی تغییرپذیری و عدم قطعیت نانوویژه، همانگونه که در این استاندارد شرح داده‌شده، به‌کاررفته در مثال رنگ نانو- دی‌اکسیدتیتانیم

درحال‌حاضر، داده مشخصه‌یابی مربوط به نانو- دی‌اکسیدتیتانیم در دسترس است، (به جهت عدم قطعیت‌های پایین)، اما مشخصه‌یابی این داده‌ها برپایه پروتکل‌های غیراستاندارد و مربوط به انجام کار در در محیط‌های آزمایشی بوده و از این رو موقعیت محیط‌زیستی کاملا واقع‌گرایانه را نشان نمی‌دهد. آزمایش‌ها مربوط به «پیرشوندگی»، در شرایط تجربی، انجام و نتایج آن منتشر شده‌است [29]. در رابطه با «سیاهه جریان مرجع»، داده اندازه‌گیری برای فرایندهای پیش‌زمینه و فرایندهای پس‌زمینه توسط پایگاه‌داده اکواینونت پوشش داده می‌شود که سطح معینی از کیفیت را تضمین می‌کند. همانند مثال نانونقره، «سیاهه جریان مرجع» منطقه‌ای‌شده نیست (برخلاف تداخل‌های الکتریسیته ویژه هر کشور). مقیاس موقتی شامل سناریوهای مختلفی است که همانند تجزیه‌وتحلیل حساسیت آزمایش می‌شوند. میله‌های کوتاه برای آزمایش‌ها و مدل‌ها، پیامد تجزیه‌وتحلیل و آزمایش‌های گسترده‌ای هستند که در خصوص تمام رویکردهای این مثال رخ داده است (نتایج پروژه چارچوب هفتم اروپایی نانوهاوس[1]- شماره پذیرش[2] 247810). همانگونه که در مثال بالا اشاره شد، شناسایی و گروه‌بندی نانومواد ساخته‌شده یک موضوع نسبتا جدید در LCA است، یعنی همان موارد مربوط به نانو- دی‌اکسیدتیتانیم برای نانونقره هم صادق است.

1- NanoHOUSE
2- Grant no

همچنین این مثال بر مبنای یک داده قوی بوده و از آنجاکه پروژه با مشارکت محققین باتجربه انجام شده‌است راهنمایی برای کارورزان موردنیاز نیست. ارزیابی مواجهه هنوز منتظر یک مدل سرنوشت صحه‌گذاری‌شده علمی و منسجم برای گسترش چنین ذراتی است. یک عدم قطعیت متوسط که در اینجا با «SimpleBox4nano» (گزارش شده در مرجع [25]) انجام شده است، اولین رویکرد دردسترس است، اما بازهم نیاز است پالایش[1] بیشتری انجام شود تا بتواند با عناصر بیشتری، شناخته‌شده در سطح بین‌المللی، از روش‌های ارزیابی جنبه‌های توکسیکولوژی در مطالعات LCA (یعنی مدل USEtox [30]) ادغام/ترکیب شود. در سطح ارزیابی سمیت، یک دیدگاه کلی نظام‌مند این است که هنوز برای این نوع از نانومواد ساخته‌شده، بخش‌های بزرگی نامعلوم هستند. برای «ارزیابی اثرات»، علی‌رغم این واقعیت که USEtox به‌عنوان یک مدل موردتوافق برای ارزیابی سمیت دردسترس است (به‌عنوان آخرین اما نه کم اهمیت‌ترین مدل، منتج به میله‌های کوتاه برای روش اجماع نظرات می‌شود)، اما همچنان یک کمبود اساسی در اطلاعات کافی درباره نانومواد آزمایش‌شده در اینجا وجود دارد. ارتباط اثرات موقتی یا مربوط به جمعیت، به‌ندرت بررسی شده‌است و ایجاد عامل‌های تبدیل کافی به‌نظر بسیار سخت می‌رسد.

مثال ۳- « CNTs در الکترونیک»



شکل ۱۴- ارزیابی تغییرپذیری و عدم قطعیت نانوویژه، همانگونه که در این استاندارد شرح داده‌شده به‌کار رفته در مثال نانولوله‌های کربنی در الکترونیک

1- Refined

داده مشخصه‌یابی نانولوله‌های کربنی برپایه فرضیه‌ها و نظریه‌ها قرار دارد و هیچ کار تجربی در مورد مطالعه شرح داده شده، انجام نشده است. در رابطه با «سیاهه جریان مرجع»، داده کتب درسی برای فرایندهای پیش‌زمینه دردسترس است. فرایندهای پس‌زمینه از پایگاه داده اکواینونت که یک سطح معینی از کیفیت را تضمین می‌کند، به‌دست آمده‌است. شبیه به دو مثال دیگر، «سیاهه جریان مرجع» منطقه‌ای‌شده نیست. در این مطالعه زمان درنظر گرفته نمی‌شود. به‌دلیل چارچوب نسبتاً نظری کل مطالعه، بدون آزمایش‌های آنها، به «آزمایش‌ها/مدل‌ها» کمیت عدم قطعیت بسیار بالاتری در مقایسه با دو مثال دیگر اختصاص پیدا می‌کند. شناسایی و گروه‌بندی نانومواد ساخته‌شده همچنین برای CNTs نیز یک موضوع نسبتاً جدید است و دربرگیرنده مسائل مشابهی همچون مثال نانو- دی‌اکسیدتیتانیم و نانونقره است، هرچند با توجه به چیدمان کلی این مثال، عدم قطعیت/تغییرپذیری بالاتری را در موارد «دسترس‌پذیری داده» و «راهنمایی برای کارورزان» نشان می‌دهد. در رابطه با سه جنبه باقی‌مانده (یعنی مواجهه، سمیت و ارزیابی اثرات) مسائل مشابه همچنان که برای نانو- دی‌اکسیدتیتانیم صادق هستند، برای مثال CNT نیز صادق است و بنابراین نتایج ارزیابی عدم قطعیت منجر به الگوی مشابهی می‌شود.

۱۰ بررسی‌های انتقادی[1] (به بند ۶، استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۱۴۰۴۴: سال ۱۳۸۶ مراجعه شود)

یک عنصر کلیدی LCAs نانوویژه، ادغام نانومواد ساخته‌شده در محصولات برای نمایش‌دادن یک کارکرد نانوویژه است. بنابراین، لازم است تا تمام کارکردهای نانوویژه در «واحد کارکردی» یک LCA مستقل از سهم جرم واقعی نانومواد ساخته‌شده در محصول که اغلب خیلی کوچک است، گنجانده شود. محصول نانوبهبودیافته معمولا یک همتای غیرنانویی فعال‌شده برای ارزیابی‌های مقایسه‌ای دارد، مگر اینکه یک کارکرد جدید یا ترکیبی از کارکردها در آن ایجاد شده‌باشد. بدون یک محصول قابل‌قیاس، نتایج LCA قدرت تفسیری زیادی نخواهند داشت، مگر آنکه نقاط بحرانی محیط‌زیستی یا اثرات سلامت انسانی بعد از آن در امتداد چرخه حیات محصول بررسی شده‌باشند.

چالش‌های همسو با جمع‌آوری سیاهه برای نانومواد ساخته‌شده در مقایسه با مواد متداول، تغییرپذیری وسیع در خواص فیزیکی-شیمیایی است که ممکن است به روش خاصی بر رفتار محیط‌زیستی مرتبط با آنها تاثیر داشته باشد. باید به خاطر سپرده شود که یک نانوماده با ترکیب شیمیایی xy (برای مثال TiO_2) وجود ندارد بلکه تعداد بی‌شماری از نانومواد ساخته‌شده با این ترکیب شیمیایی ویژه «xy» وجود دارند. هرچند، برای تشخیص بین نانومواد ساخته‌شده از همان ترکیب شیمیایی، باید مقررات توسط جامعه علمی و تنظیم‌کنندگان مقررات ایجاد شود. گروه‌بندی این مواد ممکن است نیازمند یک راهکار عمل‌گرایانه باشد. از منظر یک LCA، شناسایی یک مجموعه پایه از خواص فیزیکی-شیمیایی لازم است تا این نانومواد ساخته‌شده متفاوت را بدون ابهام شرح دهند (و آنها را از یکدیگر تمیز دهند). به‌طور مطلوب، محدوده

1-Critical reviews

هرخاصیت می‌تواند به دسته‌های مقادیری که یکسان هستند، تقسیم شوند. این کار کاهش تعداد (بدون محدودیت) شکل‌های یک نانوماده خاص را به تعداد قابل‌کنترل نانومواد ساخته‌شده مختلف امکان‌پذیر می‌کند. هنگامی که چنین خوشه‌هایی از نانومواد تعریف می‌شوند، جمع‌آوری سیاهه برای LCA نانوویژه از طریق پتانسیل ساخت بر روی مطالعات/دانش پیشین از نانومواد ساخته‌شده مشابه، آسان‌تر می‌شود.

در سطح تولید نانومواد ساخته‌شده، این چالش سال‌ها به همین شکل باقی می‌ماند تا یک جمع‌آوری نظام‌مند از مجموعه سیاهه داده‌های دروازه-به-دروازه[1] به‌طور شفاف برای مهمترین نانومواد ساخته‌شده مستند شوند. در این مستندسازی لازم است تا به‌طرز مطلوبی گروه‌بندی/خوشه‌بندی نانومواد ساخته‌شده مشابهی که قبلا ذکر شده‌است، درنظر گرفته شود. چارچوب جمع‌آوری داده برای مواد متداول (به زیربند ۴-۳-۲، استاندارد ملی ایران شماره ۱۴۰۴۴: سال ۱۳۸۶مراجعه کنید) نیز می‌تواند با اصلاحات جزئی در مورد نانومواد ساخته‌شده (یعنی جمع‌آوری بیشتر خواص فیزیکی-شیمیایی) به‌کار رود. یک راهبرد احتمالی برای افزایش میزان داده‌هایی که تولید می‌شوند، می‌تواند درخواست برای دسترسی باز به مطالعات LCA با سرمایه‌گذاری دولتی، از جمله مجموعه‌داده استفاده‌شده باشد. پروتکل‌های هماهنگ و استانداردشده جمع‌آوری داده همراه با کنترل بالا-به-پایین و نگهداری داده، پیش‌شرطی است که با این وجود باید اجرا شود.

سرنوشت محیط‌زیستی و ارزیابی مواجهه نانومواد ساخته‌شده چالش برانگیز است: برحسب خواص فیزیکی-شیمیایی و محیط اطراف، نانومواد ساخته‌شده می‌توانند رفتارشان را تغییر دهند، در میان بسیاری از احتمالات بیشتر ممکن است پایدار بمانند، کلوخه شوند یا حل شوند. این رفتار به محل نهایی عمل آنها (یعنی تاثیر بر ارگانیسم آبی یا اثرات سلامتی به دلیل استنشاق توسط انسان‌ها) کمک می‌کند. مدل‌های سرنوشت محیط‌زیستی کنونی برای LCA هنوز به‌طور کامل مختص ذره نیستند و بنابراین، ممکن است با نمونه‌های مجزا انطباق داده شوند. انطباق‌های اولیه می‌توانند در مورد سرنوشت محیط‌زیستی (برای مثال «SimpleBox4nano») و مدل‌های مواجهه انسانی (برای مثال USEtox) یافت شوند. یک الزام کلیدی، سازگاری واحدهای اندازه‌گیری در طول چرخه حیات است. این مسئله با گزارش‌دهی خواص چندگانه فیزیکی-شیمیایی میسر خواهد شد. پس از آن تبدیل آسانتر خواهد بود، برای مثال تبدیل یک مساحت سطح ویژه به یک غلظت عددی و به‌علاوه به غلظت‌های جرمی و غیره. پروتکل‌های اندازه‌گیری هماهنگ‌شده بین‌المللی به کاهش قابلیت مقایسه مشخصه‌یابی‌های نانوذرات که در حال‌حاضر گه‌گاه نامعلوم هستند، کمک خواهد کرد.

هنگامی که سرنوشت محیط‌زیستی و مواجهه نانومواد ساخته‌شده محاسبه می‌شوند، نتایج می‌توانند با کمک اطلاعات علمی به شکل اثرات محیط‌زیستی یا سلامت انسانی، اندازه‌گیری و در رده‌های LCA رایج، بهتر ارزیابی شوند. مسیرهای مواجهه کلیدی برای بررسی مواجهه از طریق استنشاق (فضای بسته، شغلی) و به یک میزان کمتر، مواجهه دهانی از طریق روده (مثلا مواجهه مصرف‌کننده) هستند. مسیرهای کلیدی در

1- Gate-to-gate

محیط‌زیست ممکن است انتقال مسافت-بالا در اتمسفر (رهایش از دودکش‌ها) یا رهایش‌ها به درون جریان‌های آب (فاضلاب) از محصولات مصرفی باشد.

ارزیابی اثرات نه‌تنها به یک بررسی اجمالی مطلوب در سرنوشت/مواجهه نانومواد ساخته‌شده، بلکه به‌منظور قدرتمندترشدن آن به مطالعات سمیت مرتبط با نانو نیز وابسته است. اجرای مطالعات درون‌تنی برای هر نانوماده موردنظر، امکان‌پذیر و مطلوب نیست. توان بازدهی بالا در آزمون‌های برون‌تنی و متعاقب آن پیوند نتایج به نانومواد ساخته‌شده مشابه، می‌تواند تجزیه‌وتحلیل پیشرفته و قوی‌تری از سمیت نانومواد ساخته‌شده، فراهم کند. صحه‌گذاری با آزمون‌های درون‌تنی ممکن است هنوز موردنیاز باشد اما چنین آزمون‌هایی می‌توانند به حداقل، کاهش یابند. روال کنونی استفاده از EC_{50} و مقادیر مشابه ممکن است در آینده با تلاش برای اجرای مسیرهای نتیجه نامطلوب (AOPs) در LCA موردتردید قرار گیرد. چنین AOPs زنجیره‌هایی از اتفاقات کلیدی هستند که به آسانی می‌توانند در برون‌تن آزمایش شوند و حتی تجزیه‌وتحلیل سمیت‌های ترکیبی[1] را امکان‌پذیر سازند. نانومواد ساخته‌شده که نتایج مشابهی را برای رویدادهای کلیدی معین نشان می‌دهند ممکن است باهم گروه‌بندی شوند درحالی که به فاکتورهای اثر[2] واحد برای کل گروه‌های نانومواد ساخته‌شده بدون آزمون‌های بیشتر (اگر یک نانوماده در گروه از قبل به‌طور کامل آزمایش شود) منجر می‌شود. پیش‌نیاز اجرای چنین راهبرد آزمون، به‌طور بدیهی یافتن روش‌هایی برای مقایسه فاکتورهای اثر بر نانومواد ساخته‌شده با مواد شیمیایی متداول است. چنین اطلاعات توکسیکولوژیکی جدید ممکن است همچنین یک رتبه‌بندی سمیت نسبی برای مواد از قبل شناخته‌شده (یعنی مواد دارای یک فاکتور اثر مرتبط) فراهم کند. این نوع رتبه‌بندی می‌تواند همچون احتمال دیگری برای برآورد/تخمین فاکتور اثر برای نانومواد ساخته‌شده به‌کار رود.

بسیاری از منابع عدم قطعیت‌ها در سراسر این استاندارد موردتوجه قرار گرفته‌است. بااین‌حال، این مسئله نباید کارورزان LCA را از ادغام نانومواد ساخته‌شده در یک LCA باز دارد، بلکه توصیه می‌شود تا مرزهای روش‌شناسی LCA را به نحوی پیش‌برد که دامنه وسیع خواص نانومواد ساخته‌شده را بهتر محاسبه کند. از این طریق، مزایای حاصل همچنین نگرانی‌های محیط‌زیستی و سلامت انسانی ناشی از نانومواد ساخته‌شده و کاربردهای نانوپدید می‌توانند به شکل قابل‌فهم و متقاعدکننده‌ای با LCA شرح داده شوند. هرچند مانند مطالعات LCA مربوط به مواد متداول، ذی‌نفعان فقط به نتایجی اعتماد خواهند کرد که به‌صورت شفاف همراه با عدم قطعیت‌های مرتبط و تفسیرهای نقادانه گزارش شده باشند.

1-Mixture toxicities
2-Effect factors

پیوست الف

(آگاهی‌دهنده)

تجزیه‌وتحلیل عدم قطعیت در LCA نانومواد ساخته‌شده

الف-۱ کلیات

عدم قطعیت در کل ارزیابی چرخه حیات (LCA) نهفته است و تفسیر نتایج را پیچیده می‌کند. وضعیت عدم قطعیت برای LCA نانومواد ساخته‌شده، یک مسئله خاص همچون یک فناوری درحال ظهور، فرض می‌شود. در این پیوست انواع عدم قطعیت و منابع آن در LCA معرفی می‌شود و آنها را به نانومواد ساخته‌شده که برگرفته از متون علمی عدم قطعیت LCA غیر نانوویژه، LCAs نانوماده و گزارش‌های پروژه و گروه‌کاری OECD/FP7[1] است، مرتبط می‌کند. این پیوست شامل روش‌های مربوط به تفسیر عدم قطعیت‌ها و ارتباط آنها با وضعیت کنونی دانش نانوماده است.

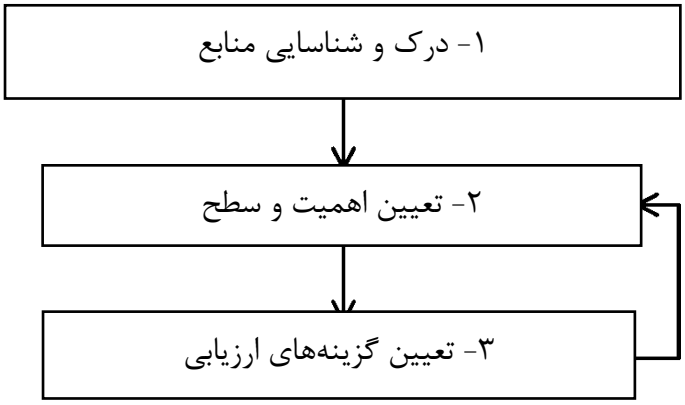
واژه «عدم قطعیت» مطابق با اهداف این پیوست برای شرح عدم قطعیت در مورد اندازه‌گیری نادرست، کمبود داده و غیره که می‌توانند با اندازه‌گیری دقیقتر کاهش یابند و هم تغییرپذیری که ریشه در گوناگونی در دنیای طبیعی دارد و نمی‌تواند با اندازه‌گیری بیشتر [12]، [13] کاهش یابد، استفاده می‌شود.

راهکار به‌کاررفته به موارد زیر تقسیم می‌شود:

۱- شناسایی منابع عدم قطعیت LCA؛
۲- درک اهمیت و سطح عدم قطعیت آن؛
۳- شناسایی روش‌های مناسب ارزیابی، که با چند فعالیت در مرحله ۳ و اهمیت عدم قطعیت در مرحله ۲ نشان داده می‌شود.

این مراحل در شکل **الف**-۱ تشریح شده‌است.

1- Organization for economic co-operation and development (OECD)/Seventh framework programme of the European Community for research and technological development including demonstration activities (FP7)



شکل الف-۱- روندنمای تجزیه‌وتحلیل عدم قطعیت

الف-۲- مرحله ۱: درک و شناسایی منابع عدم قطعیت

عدم قطعیت می‌تواند از منابع زیر به‌وجود آید:

الف- پارامتر عدم قطعیت. این پارامتر می‌تواند ناشی از نادرستی تجربی[۱] (اندازه گیری غیردقیق[۲])، غیرنماینده بودن[۳] (اندازه‌گیری ناقص[۴] یا قدیمی[۵]) یا کمبود داده[۶] (بدون اندازه‌گیری[۷]) باشد. برای نانومواد ساخته‌شده این عدم قطعیت‌ها می‌توانند خیلی بالا باشند و با عدم قطعیت شناختی[۸] (کمبود دانش مربوط به رفتار سامانه) ترکیب شوند؛

ب- عدم قطعیت شناختی. این موضوع هم به کمبود دانش درباره فرایندهای سیاهه مدل‌سازی‌شده، به‌طور مثال در رابطه با تولید نانوماده با مقیاس ارتقاءیافته[۹] از مقیاس- آزمایشگاهی و هم در ارزیابی اثرات به فاکتورهای مشخصه‌یابی نانوویژه نامعلوم، مربوط می‌شود؛

پ- مدل عدم قطعیت. این مورد هم به سیاهه و هم عدم قطعیت ارزیابی اثرات به دلیل ساده‌سازی جنبه‌هایی که نمی‌توانند به‌طورکامل در ساختار LCA مدل‌سازی شوند، مربوط می‌شود. برای LCIA یک منبع عدم قطعیت با مدل‌های سرنوشت محیط‌زیستی کنونی برای نانومواد ساخته‌شده، انطباق می‌یابند.

1- Empirical inaccuracy
2- Imprecise measurement
3- Unrepresentatively
4- Incomplete measurement
5- Outdated measurement
6- Lack of data
7- No measurement
8- Epistemological uncertainty
9- Scaling-up

ت- **عدم قطعیت به‌دلیل انتخاب‌ها.** این موضوع به انتخاب‌ها در واحد کارکردی، محدوده سامانه، تخصیص، روش مشخصه‌یابی و وزن‌دهی مربوط می‌شود. انتخاب‌های مربوط به واحد کارکردی چالش خاصی را برای نانومواد ساخته‌شده نشان می‌دهند، همانگونه که اغلب کارکردهای مختلف برای ماده توده‌ای نشان می‌دهند؛

ث- **تغییرپذیری فضایی.** این موضوع به پراکندگی در سرتاسر مکان‌های محیط‌زیستی، موقعیت‌های[1] جغرافیایی مختلف و انتشار در فضای بسته و در فضای باز (محیطی) اشاره می‌کند. هنگام بررسی انتشار در فضای بسته یا در فضای باز (محیطی) نانومواد تولیدشده، به‌صورت هواسل یا شکل‌های پودری، می‌توانند تفاوت بسیاری در سمیت داشته باشند. علیرغم تلاش‌هایی که برای افزایش غنای داده مربوط به انتشار انجام شده‌است، اما داده چاپ‌شده مربوط به بسیاری از نانومواد ساخته‌شده فقط برای تعداد محدودی از موقعیت‌ها وجود دارد؛

ج- **تغییرپذیری زمانی.** این مورد مربوط به زمان برپایه گوناگونی سیاهه اثرگذار و مراحل ارزیابی اثرات است. در رابطه با سیاهه، پایش بلندمدت تسهیلات تولید، مورد نیاز است؛

چ- **تغییرپذیری بین منابع و اشیاء.** این موضوع هم به تفاوت‌ها در درون‌داده‌ها و انتشارات و هم به تغییرپذیری در حساسیت‌های انسانی یا حیوانی نسبت به مواد سمی مربوط می‌شود. یک منبع عدم قطعیت در توسعه سیاهه، محدوده مقادیر در مقالات برای درون‌دادها و انتشارات است.

الف-۳ مرحله ۲: مدیریت عدم قطعیت- اهمیت و سطح

درک سهم نسبی هر عدم قطعیت به کل انواع مختلف عدم قطعیت‌های ایجادشده، هم برای تعیین اهمیت عدم قطعیت مربوطه و هم برای تعیین روش‌هایی برای کمک به مدیریت آن، کلیدی است. «تجزیه‌وتحلیل اهمیت عدم‌قطعیت» می‌تواند به تعریف اهمیت عدم‌قطعیت مرتبط کمک کند. این موضوع می‌تواند به‌طور کمی یا کیفی با استفاده از روش‌هایی همچون «تجزیه‌وتحلیل حساسیت» یا «شاخص‌های کیفیت داده» کنترل شود.

درک سطح عدم قطعیت برای تعیین روش‌های مدیریت مناسب مهم است. در شکل الف-۲، افزایش دانش و قطعیت از عدم قطعیت بالا (نادیده‌گرفتن[2]) به عدم قطعیت نسبتا پایین‌تر (عدم قطعیت آماری[3]) نشان داده شده‌است. هرگاه عدم قطعیت بالا باشد یک رویکرد کیفی مبتنی بر مشارکت کارشناسی، تایید و/یا توسعه سناریو، به‌طوری‌که توزیع احتمالات تعریف شده معلوم باشد، ممکن است بر ارزیابی‌های مبتنی بر آمار ارجحیت داشته باشد.

1- Site
2- Ignorance
3- Statistical uncertainty

شکل الف-۲- سطوح عدم قطعیت برگرفته شده از «راهنمای RIVM/MNP[1] برای ارزیابی عدم قطعیت و ارتباطات: کاتالوگ (کالانما) ابزار برای ارزیابی عدم قطعیت»

الف-۴ مرحله ۳- مدیریت عدم قطعیت-روش‌های ارزیابی

الف-۴-۱ کلیات

موارد زیر می‌توانند برای کمک به مدیریت، ارتباط و درک عدم قطعیت‌ها در LCA نانوماده به‌کاررروند.

الف-۴-۲ کاربرد پایگاه‌داده

بهبود پایگاه‌های‌داده LCA موجود برای گنجاندن نانومواد ساخته‌شده موردنیاز است تا پارامتر عدم قطعیت را کاهش دهد. این کار نیازمند اشتغال بیشتر در صنعت نانومواد ساخته‌شده‌است تا اطلاعات سیاهه بهتری به‌دست آید. در رابطه با متخصصان، درک شفاف مشخصه‌یابی‌هایی همچون ترکیب، اندازه ذره، پوشش‌دهی سطحی و عامل‌دارکردن[2] باید پیگیری شود تا سطح دسترس‌پذیری اطلاعات کنونی برای یک نانوماده ویژه تحت تجزیه‌وتحلیل، تعیین شود.

الف-۴-۳ ارزیابی کیفیت داده

با توجه به کمبود کیفیت سیاهه داده مربوط به نانو و دامنه سطوح اطمینان داده، ارزیابی کیفیت داده به روش کمی یا کیفی، مرحله مهمی در تفسیر مطالعات LCA نانوماده است.

الف-۴-۴ صحه‌گذاری داده و بازنگری منتقدانه

جایی‌که مجموعه داده‌های اندکی برای تولید نانومواد ساخته‌شده دردسترس است، اما پتانسیل بالایی برای کاربردهای صنعتی گوناگون آتی وجود دارد، صحه‌گذاری داده به توسعه مدل کمک کرده و یک روش تایید برای ایجاد فرضیات چرخه حیات را فراهم می‌آورد.

1- Netherlands Environmental Assessment Agency «Milieu- en Natuurplanbureau»
The agency forms a part of the National Institute for Public Health and the Environment
2- Functionalization

الف-۴-۵ تجزیه‌وتحلیل حساسیت

در اغلب موارد به دلیل ماهیت نوظهور نانومواد ساخته‌شده و محصولات حاوی نانومواد، فرضیات بسیاری ایجاد می‌شوند. بنابراین، این شکل از تجزیه‌وتحلیل اغلب مفید است.

الف- ۴-۶ تجزیه‌وتحلیل آماری

تجزیه‌وتحلیل مونت کارلو[1] می‌تواند برای ایجاد ارزیابی عدم قطعیت‌ها در داده LCA گردآوری شده، استفاده شود. نمونه‌های کاربرد مونت کارلو در LCA نانوماده را می‌توان در مطالعات انجام‌شده توسط والسر[2] و همکاران [6] و پیازا[3] و همکاران [31] مشاهده کرد. این موضوع به‌طور کلی برای داده پس‌زمینه همراه با تولید محصولات نانویی و نه داده نانوویژه با فرض کمبود عامل‌های اثرخاص، مورداستفاده است.

الف-۴-۷ مدل‌سازی سناریو

در LCA، نانومواد ساخته‌شده اغلب به‌دلیل ماهیت نوظهور فناوری، تعداد زیادی از فرضیات در رابطه با هر مرحله از چرخه حیات موردنیاز است. تجزیه‌وتحلیل سناریو روش مفیدی است تا فرضیات ایجادشده در مدل LCA ابتدایی را ارزشیابی کند.

سناریوها می‌توانند در یکی از سه دسته‌بندی مختلف زیر قرار گیرند:

- سناریوهای پیش‌گویانه- چه چیز اتفاق خواهد افتاد؟
- سناریوهای اکتشافی- چه چیز می‌تواند اتفاق بیفتد؟
- سناریوهای الزامی- چگونه یک هدف ویژه می‌تواند به‌دست آید؟

با توجه به سطح کنونی توسعه فناوری، سناریوهای اکتشافی رایج ممکن است استفاده شود تا چگونگی اثرگذاری تغییرات بالقوه در مراحل مختلف چرخه حیات (به احتمال زیاد در مرحله تولید زیرا این مرحله غنی‌ترین سطح اطلاعات LCA را دارد) را بر نتایج غیر نانوویژه ارزیابی کند. سناریوها می‌توانند برپایه نظرسنجی‌ها، کارگاه‌ها یا روش‌های دلفی [18] ایجاد شوند. نمونه‌هایی از کاربرد مدل‌سازی سناریو در LCA نانوماده در مرجع [32] یا در طرح اتحادیه اروپا[4] درسال ۲۰۱۳ ارائه شده‌است.

1- Monte Carlo
2- Walser
3- Piazza
4- EU-NanoSustain

پیوست ب

(آگاهی‌دهنده)

مطالعات موردی LCA در زمینه نانومواد ساخته‌شده

ب-۱ کلیات

جدول ب-۱ براساس جدول منتشرشده در مرجع [33]، یک بررسی اجمالی را از تمام مطالعات موردی LCA در زمینه نانومواد ساخته‌شده (MNM) که در سال‌های ۲۰۰۱ تا اواسط ۲۰۱۷ چاپ شده‌است، ارائه می‌دهد. در جدول ب-۱، در صفحات بعدی در مورد هر یک از این مطالعات موارد زیر ارائه شده‌است:

- یک مرجع علمی و واضح را که در آن نتایج این مطالعه چاپ شده‌است، ارائه می‌کند (درصورتی که یک مطالعه از طریق منابع علمی زیادی پوشش داده شده‌باشد، فقط یکی از این مقالات در اینجا فهرست شده‌است). اطلاعات جزئی‌تر این منابع در کتابنامه در پایان این استاندارد ارایه شده‌است؛
- بازنگری کلی از MNM پوشش‌داده‌شده با مطالعه مربوطه ارایه شده‌است (توجه‌شود که MNMs دامنه فزاینده‌ای از توصیف‌گرهای دارای پیشوند نانو همانند نانوشیء، نانوفیلم، نانولیف، نانولوله و غیره را پوشش می‌دهند)؛
- مشخصه‌یابی کوتاهی از مطالعه با نشان‌دادن نوع مطالعه، اطلاعات جامع درباره سامانه پیش‌زمینه ارائه شده‌است؛
- نشان داده شده‌است که چه نوع جریانات درونداد و برونداد در مطالعه مربوطه درنظر گرفته شده‌است و این‌که آیا به تعداد واقعی در مراجع معرفی شده، گزارش می‌شوند یا خیر.

مراجعی که با جدول ب-۱ پوشش داده نشده‌است، مراجعی هستند که به مطالعه موردی واقعی اشاره نداشته بلکه یا به چندین مطالعه موردی به روش‌اجرایی کلی می پردازند (مثلا [9]، [33] یا [34]) یا فقط به مسائل روش‌شناسی پرداخته شده‌است (برای مثال به مرجع [۲۸] مراجعه شود). بنابراین فهرست زیر نمی‌تواند یک بررسی اجمالی کامل از مقالات LCA در زمینه نانوفناوری درنظر گرفته شود.

– علائم کوته‌نوشت‌ها در جدول **ب**-۱ به شرح زیر است:

– **MNMs پوشش‌داده‌شده:**

"A" nano-TiO_2/ "B" nano-ZnO/ "C" nano-SiO_2/ "D" nano-FeO_x/ "E" nano-AlO_x/ "F" nano-CeO_2/

"G" nano-Ag/"H" CNT/"J" CNF/"K" graphene/"L" C60(fullerene)/"M" Quantum Dots/

"N" other MNM

- **نوع مطالعه:**

"I" مطالعه LCA گهواره تا گور/ "II" مطالعه LCA گهواره تا دروازه/ "III" مطالعه LCA ترکیبی(هیبریدی)[1]/ "IV" تجزیه‌وتحلیل انرژی/ "V" ردپای کربن/ "VI" مطالعه ارزیابی اثرات محیط‌زیستی (ELA)/ "VII" تجزیه‌وتحلیل اگسرژی[2]/ "VIII": مطالعه LCA پایان حیات (یعنی دروازه تا گور)

- **سامانه پیش‌زمینه:**

"+" شفافیت کامل، سطح فرایند-واحد/ "o"شفافیت جزئی، طرح فرایند جزئی/ "-" نبود شفافیت، نبود طرح فرایند

- **سیاهه داده:**

"-" هیچ‌مقداری گزارش نشده‌است، "V" مقادیر گزارش شده‌است (در متن استاندارد یا اطلاعات تکمیلی)

1- Hybrid
2- Exergy

جدول ب-۱- بررسی اجمالی مطالعات موردی LCA در حوزه نانومواد ساخته شده (MNM)، منتشرشده از سال ۲۰۰۱ تا اواسط سال ۲۰۱۷

برونداد							درونداد		مدل‌سازی			MNMs پوشش داده‌شده	مراجع	
پسماند	خاک		آب		هوا		انرژی	ماده	سیاهه داده	سامانه پیش‌زمینه	نوع مطالعه			
	سایر	نانوذرات	سایر	نانوذرات	سایر	نانوذرات								
							•	•	-	o	I	A	[35]	Greijer et al. 2001
							•	•	-	-	III	N	[36]	Lloyd and Lave 2003
							•	•	-	-	I	HM	[37]	Steinfeldt et al. 2004
							•	•	V	o	III	N	[38]	Lloyd et al. 2005
					•		•	•	V	o	IV,V	AN	[39]	Osterwalder et al. 2006
							•	•	V	o	I	N	[40]	Roes et al. 2007
							•	•	-	o	I	HM	[41]	Bauer et al. 2008
•					•		•	•	V	o	II	HM	[42]	Healy et al. 2008
			•		•		•	•	V	o	II	N	[43]	Joshi 2008
							•	•	V	o	II,IV	J	[44]	Khanna et al. 2008b
							•	•	V	o	IV	HL	[45]	Kushnir and Sanden 2008
	•				•		•	•	V	o	II.IV	H	[46]	Singh et al. 2008
							•	•	V	o	II	GN		Fthenakis et al. 2009
							•	•	-	o	II,IV	J	[47]	Khanna and Bakshi 2009
					•		•	•	V	o	II,VI,I	A	[48]	Grubb 2010
					•		•	•	V	o	III	A	[49]	Hassan 2010
			•		•		•	•	V	o	I	CH	[50]	Roes et al. 2010
				•		•	•	•	V	o	II	H	[51]	Steinfeldt et al. 2010
	•		•	•	•	•	•	•	V	o	I	GN	[6]	Walser et al. 2011
•							•	•	-	o	II	H	[52]	Wender and Seager, 2011
							•	•	V	o	II	N	[53]	de Figueirêdo et al. 2012
							•	•	V	o	II	N	[54]	Deorsola et al. 2012
•					•		•	•	-	o	II	H	[55]	Eckelman et al. 2012

جدول (ب-۱) ادامه

	مراجع	MNMs پوشش داده‌شده	مدل‌سازی			درونداد		برونداد						
			نوع مطالعه	سامانه پیش‌زمینه	سیاهه داده	ماده	انرژی	هوا		آب		خاک		پسماند
								نانوذرات	سایر	نانوذرات	سایر	نانوذرات	سایر	
Manda et al. 2012	[56]	A	II	o	V	•	•		•					
Pascu et al. 2012	[57]	D	II	o	V	•	•							
Tellaetexe et al. 2012	[58]	N	I	o	-	•	•							
Babaizadeh and Hassan, 2013	[59]	A	I	o	-	•	•		•					
Dahlben et al. 2013	[60]	H	I,II	o	-	•	•		•					
D'Errico et al. 2013	[61]	N	II	o	-	•	•							
Gao et al. 2013	[62]	CH	II,IV	+	V	•	•							
Griffiths et al. 2013	[63]	DN	II	+	V	•	•							
Griffiths et al. 2013a	[64]	H	II	+	V	•	•							
Jayapalan et al. 2013	[65]	A	II	-	-	•	•							
Le Corre et al. 2013	[66]	N	I,II	+	V	•	•		•					
Li et al. 2013	[67]	N	II	+	V	•	•							•
Mohr et al. 2013	[68]	CH	I	o	-	•	•							
Pini et al. 2013	[69]	A	I	o	-	•	•	•	•					•
Zuin et al. 2013	[70]	A	I	o	-	•	•		•					•
Arvidsson et al. 2014	[71]	K	II	+	V	•	•							•
Barberio et al. 2014	[72]	N	II	+	V	•	•	•						•
Gilbertson et al. 2014	[73]	H	II	+	V	•	•	•						
Li et al. 2014	[74]	N	I	+	V	•	•							•
OECD 2014	[75]	CN	I	o	-	•	•	•		•				•
Pizza et al. 2014	[31]	N	I	+	V	•	•							•
Schriijvers et al. 2014	[76]	N	I,II	+	V	•	•							
Thakur 2014	[77]	A	I	+	V	•	•							

جدول (ب-۱) ادامه

	مراجع	MNMs پوشش داده‌شده	مدل‌سازی			درونداد		برونداد						
			نوع مطالعه	سامانه پیش‌زمینه	سیاهه داده	ماده	انرژی	هوا		آب		خاک		پسماند
								نانوذرات	سایر	نانوذرات	سایر	نانوذرات	سایر	
Yaseneva et al. 2014	[78]	J	II	o	-	•	•							
Alaviitala and Mattila, 2015	[79]	N	I	-	-	•	•							
Arvidsson et al. 2015	[80]	N	II	+	V	•	•							
Ferrari et al. 2015	[81]	A	I	+	V	•	•	•	•					•
Gavankar et al. 2015	[82]	H	II	+	V	•	•							
Hischier, 2015	[8]	H	I	+	V	•	•	•	•	•				•
Hischier et al., 2015	[7]	AC G	I	+	V	•	•	•	•	•	•	•		•
Hicks et al. 2015	[83]	G	I	-	-	•	•			•				
Leng et al. 2015	[84]	N	II	-	-	•	•							
Manda et al. 2015	[85]	G	I	-	-	•	•							
Middlemas et al. 2015	[86]	A	II	o	V	•	•		•					
Notter et al. 2015	[87]	H	I	+	V	•	•		•		•			•
Ojeda et al. 2015	[88]	E	I	+	V	•	•		•					
Piccinno et al. 2015	[89]	N	II	+	V	•	•		•		•			•
Pini et al. 2015	[90]	A	II	o	-	•	•	•	•	•	•			•
Pourzahedi & Eckelman, 2015a	[91]	G	I	+	V	•	•		•					
Pourzahedi & Eckelman, 2015b	[92]	G	II	o	-	•	•							
Slotte et al. 2015	[93]	BE GN	II	o	V	•	•							
Tsang et al. 2015	[94]	L	II	o	-	•	•							
Arvidsson and Mollander, 2016	[95]	N	II	o	-	•	•							
Bobba 2016	[96]	N	II	+	V	•	•							
Busi et al. 2016	[97]	A	II	+	V	•	•							
Gifford et al. 2016	[98]	N	I	-	-	•	•							

جدول (ب-۱) ادامه

مراجع		نانومواد ساخته شده تحت پوشش	مدل‌سازی			درونداد		برونداد						
			نوع مطالعه	سامانه پیش‌زمینه	سیاهه داده	ماده	انرژی	هوا		آب		خاک		پسماند
								نانوذرات	سایر	نانوذرات	سایر	نانوذرات	سایر	
[99]	do Nascimento et al. 2016	N	II	+	V	•	•				•			
[100]	Miseljic and Olsen, 2016	ABN	I	+	-	•	•		•	•	•		•	•
[101]	Pati et al. 2016	G	I	+	V	•	•							
[102]	Scott & Cullen, 2016	KN	II	o	-	•	•		•					
[103]	Salieri and Hischier2016	H	II	+	V	•	•		•		•			•
[104]	Stamou and Antizar-Ladislao, 2016	AB	VIII	+	V					•	•	•	•	
[105]	Ticha et al. 2016	A	I	o	-	•	•							
[106]	Zhai et al. 2016	H	II	o	-	•	•							
[107]	Zhang et al. 2016	AB	I	+	V	•	•	•	•	•	•			•
[108]	Ahmed et al. 2017	N	II	+	V	•	•							
[109]	Feijoo et al. 2017	N	II	+	V	•	•							•
[110]	Caramazana-González et al. 2017	A	II	o	-	•	•							
[111]	Hicks and Theis 2017	G	I	o	V	•	•			•				
[112]	Hischier et al. 2017	A	I	+	V	•	•	•	•	•	•			•
[113]	Martins et al. 2017	D	II	+	V	•	•							•
[114]	Papadaki et al. 2017	B	II	o	-	•	•							
[115]	Pini et al. 2017a	A	I	+	V	•	•	•	•	•	•			•
[116]	Pini et al. 2017b	A	I	+	V	•	•	•	•	•	•			•
[117]	Pourzahedi et al. 2017a	G	II	+	V	•	•	•	•	•	•			•
[118]	Pourzahedi et al. 2017b	H	II	o	V	•	•							
[119]	Stieberova et al. 2017	B	II	o	-	•	•							
[120]	Upadhyayula et al. 2017	KN	I	o	-	•	•							
[121]	Wigger et al. 2017	N	I	o	-	•	•		•		•			•

کتابنامه

[1] Savolainen K., Alenius H., Norppa H., Pylkkänen L., Tuomi T., Kasper G. Risk Assessment Of Engineered Nanomaterials And Nanotechnologies — *Rev. Toxicol.* 2010, **269** pp. 92–104.

[2] Shatkin J.A., Kim B. Cellulose Nanomaterials: Life Cycle Risk Assessment, And Environmental Health And Safety Roadmap. *Environ. Sci. Nano*. 2015, **2** pp. 477–499.

[3] Walser T., Bourqui R.M., Studer C. Combination Of Life Cycle Assessment, Risk Assessment And Human Biomonitoring To Improve Regulatory Decisions And Policy Making For Chemicals. *Environ. Impact Assess. Rev.* 2017, **65** pp. 156–163.

[۴] استاندارد ملی ایران شماره ۱۹۹۹۷: سال ۱۳۹۸، مدیریت محیط زیست - ارزیابی چرخهٔ حیات– مثال‌های گویا درباره نحوه به‌کارگیری استاندارد ایران- ایزو شماره ۱۴۰۴۴ برای موقعیت‌های ارزیابی پیامد

[۵] استاندارد ملی ایران شماره ۲۲۶۵۴: سال ۱۳۹۸، مدیریت محیط زیستی- ارزیابی چرخه حیات– مثال‌هایی از نحوه کاربرد استاندارد ایران- ایزو شماره ۱۴۰۴۴ در تعریف هدف، دامنه و آنالیز فهرست موجودی

[6] Walser T., Demou E., Lang D.J., Hellweg S. Prospective Environmental Life Cycle Assessment Of Nanosilver T-Shirts. *Environ. Sci. Technol.* 2011, **45** (10) pp. 4570–4578

[7] Hischier R., Nowack B., Gottschalk F., Hincapie I., Steinfeldt M., Som C. Life Cycle Assessment Of Façade Coating Systems Containing Manufactured Nanomaterials. *Journal Of Nanoparticle Research*, 17, 68 (2015), 13 pp.

[8] Hischier R. Life Cycle Assessment Study Of A Field Emission Display Television Device. *Int. J. Life Cycle Assess.* 2015, **20** (1) pp. 61–73

[9] Hischier R., Walser T. Environmental Sustainability Assessment Of Engineered Nanomaterials: State Of Art & Strategies To Overcome Existing Gaps. *Sci. Total Environ.* 2012, **425** pp. 271–282

[10] Guinée J.B., Gorrée M., Heijungs R., Huppes G., Kleijn R., De Koning A. Et Al. *Life Cycle Assessment:An Operational Guide To The ISO Standards*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 2002

[11] Collins P.G., Avouris P. Nanotubes For Electronics. *Sci. Am.* 2000, pp. 62–69

[12] Björklund A.E. Survey Of Approaches To Improve Reliability In LCA . *Int. J. Life Cycle Assess.* 2002, **7** (2) pp. 64–72

[13] Huijbregts M. *Uncertainty And Variability In Environmental Life Cycle Assessment. Phd-Thesis*. University Of Amsterdam, Amsterdam, The Netherlands, 2001

[14] Pennington D., Payet J., Hauschild M. Aquatic Ecotoxicological Indicators In Life-Cycle Assessment. *Environ. Toxicol. Chem.* 2004, **23** (7) pp. 1796–1807

[15] Hischier R. Framework For LCI Modelling Of Nanoparticle Releases Along The Life Cycle. *Int J LCA* . 2014, **19** (4) pp. 838–849

[16] Walser T., Meyer D.E., Fransman W., Buist H., Kuijpers E., Brouwer D. Life-Cycle Assessment Framework For Indoor Emissions Of Synthetic Nanoparticles. *J. Nanopart. Res.* 2015, **17** pp. 245– 263

[17] Pesonen H.-L., Ekvall T., Fleischer G., Huppes G., Jahn C., Klos Z.S. Et Al. Framework For Scenario Development In LCA . *Int J LCA* . 2000, 5 (1) pp. 21–30

[18] Börjeson L., Höjer M., Dreborg K.-H., Ekvall T., Finnveden G. Scenario Types And Techniques: Towards A User's Guide. *Futures*. 2006, **38** pp. 723–739

[19] ECHA. *Guidance On Information Requirements And Chemical Safety Assessment. Chapter R.12: Use Descriptor System (Version 2)*. European Chemicals Agency, 2010.

[20] Müller N.C., Nowack B. Exposure Modeling Of Engineered Nanoparticles In The Environment. *Environ. Sci. Technol.* 2008, **42** pp. 4447–4453

[21] Scholz R.W., Tietje O. Embedded Case Study Methods. Thousand Oaks. Sage, London, 2002.

[22] Sonnemann G., Vigon B. Global Guidance Principles For Life Cycle Assessment Databases. A Basis For Greener Processes And Products. Unep/Setac Life Cycle Initiative. United Nations Environment Programme. Unep, Paris, France, 2011

[23] Ecoinvent Centre Ecospold V2 Data Format. St. Gallen (Switzerland), 2010.

[24] Ec-Jrc. Ilcd Format Sdk 1.1. European Commission, Joint Research Centre. Ec-Jrc, Ispra, Italy, 2012.

[25] Meesters J.A.J., Koelmans A.A., Quik J.T.K., Hendriks A.J., Van De Meent D. Multimedia Modeling Of Engineered Nanoparticles With Simplebox4nano: Model Definition And Evaluation. *Environ. Sci. Technol.* 2014, **48** pp. 5726–5736

[26] Ec. *Euses, The European Union System For The Evaluation Of Substances. National. Available From European Chemicals Bureau, Ispra (Italy)*. National Institute For Public Health And The Environment, Bilthoven, The Netherlands, 1996

[27] Krug H.F., Wick P. Nanotoxicology: An Interdisciplinary Challenge. *Angew. Chem. Int. Ed.* 2011, **50** pp. 1260–1278.

[28] SALIERI B., RIGHI S., PASTERIS A., OLSEN S.I. Freshwater Ecotoxicity Characterisation Factor For Metal Oxide Nanoparticles: A Case Study On Titanium Dioxide Nanoparticle. *Sci. Total Environ.* 2015, **505** pp. 494–502

[29] Al-Kattan A., Wichser A., Vonbank R., Brunner S., Ulrich A., Zuin S. Et Al. Release Of Tio2 From Paints Containing Pigment-Tio2 Or Nano-TiO_2 By Weathering. *Environ. Sci. Process. Impacts*. 2013, **15** pp. 2186–2193

[30] Rosenbaum R., Bachmann T.M., Swirsky Gold L., Huijbregts M.A.J., Jolliet O., Juraske R. Et Al. Usetox—The UNEP-SETAC Toxicity Model: Recommended Characterisation Factors For Human Toxicity And Freshwater Ecotoxicity In Life Cycle Impact Assessment. *Int. J. Life Cycle Assess.* 2008, **13** pp. 532–546

[31] Pizza A., Metz R., Hassanzadeh M., Bantignies J.-L. Life Cycle Assessment Of Nanocomposites Made Of Thermally Conductive Graphite Nanoplatelets. *Int. J. Life Cycle Assess.* 2014, **19** pp. 1226–1237

[32] OECD. *Guidance Manual Towards The Integration Of Risk Assessment Into Life Cycle Assessment Of Nano-Enabled Applications*. OECD Publishing, Paris, France, 2015

[33] Salieri, B., Turner, D. A., Nowack, B., & Hischier, R. (2018). Life Cycle Assessment Of Manufactured Nanomaterials: Where Are We? Nanoimpact, 10, 108-120 (2017).

[34] Miseljic M., Olsen S.I. Life-Cycle Assessment Of Engineered Nanomaterials: A Literature Review Of Assessment Status. J Nanopart Res, 16, 2427 (2014), **33** pp.

[35] Greijer H., Karlson L., Lindquist S.-E., Hagfeldt A. Environmental Aspects Of Electricity Generation From A Nanocrystalline Dye Sensitized Solar Cell System. *Renew. Energy*. 2001, 23 pp. 27–39

[36] Lloyd S.M., Lave L.B. Life Cycle Economics And Environmental Implications Of Using Nanocomposites In Automobiles. *Environ. Sci. Technol.* 2003, **37** pp. 3458–3466

[37] Steinfeldt M., Petschow U., Haum R., Von Gleich A. *Nanotechnology And Sustainability*. Discussion Paper No. 65/04 Of IOEW, Institut Für Ökologische Wirtschaftsforschung Gmbh, Berlin (Germany), 2004.

[38] Lloyd S.M., Lave L.B., Matthews H.S. Life Cycle Benefits Of Using Nanotechnology To Stabilize Platinum-Group Metal Particles In Automotive Catalysts. *Environ. Sci. Technol.* 2005, **39** pp. 1384–1392

[39] Osterwalder, N., Capello, C., Hungerbühler, K. And Stark, W. J. Energy Consumption During Nanoparticle Production: How Economic Is Dry Synthesis? *Journal Of Nanoparticle Research*, Online-First, DOI 10.1007/S11051-005-8384-7 (2006).

[40] Roes A.L., Marsili E., Nieuwlaar E., Patel M.K. Environmental And Cost Assessment Of A Polypropylene Nanocomposite. *J. Polym. Environ.* 2007, **15** pp. 212–226

[41] Bauer, C., Buchgeister, J., Hischier, R., Poganietz, W. R., Schebek, L. And Warsen, J. Environmental Prospects In Products - A Framework For Life Cycle Thinking On Nano Scales. *Journal Of Cleaner Production*, 16, 8-9 (2008), 910-926.

[42] Healy M.L., Dahlben L.J., Isaacs J.A. Environmental Assessment Of Single-Walled Carbon Nanotube Processes. *J. Ind. Ecol.* 2008, **12** (3) pp. 376–393

[43] Joshi S. Can Nanotechnology Improve The Sustainability Of Biobased Products? - The Case Of Layered Silicate Biopolymer Nanocomposites. *J. Ind. Ecol.* 2008, **12** (3) pp. 474–489

[44] Khanna V., Bakshi B.R., Lee L.J. Carbon Nanofiber Production. Life Cycle Energy Consumption And Environmental Impact. *J. Ind. Ecol.* 2008, **12** (3) pp. 394–410

[45] Kushnir C., Sanden B.A. Energy Requirements Of Carbon Nanoparticle Production. *J. Ind. Ecol.* 2008, **12** (3) pp. 360–375

[46] Singh A., Lou H.H., Pike R.W., Agboola A., Li X., Hopper J.R. Et Al. Environmental Impact Assessment For Potential Continuous Processes For The Production Of Carbon Nanotubes. *Am. J.Environ. Sci.* 2008, **4** (5) pp. 522–534

[47] Khanna V., Bakshi B.R. Carbon Nanofiber Polymer Composites: Evaluation Of Life Cycle Energy Use. *Environ. Sci. Technol.* 2009, **43** pp. 2078–2084

[48] Grubb G.F. *Improving The Environmental Performance Of Manufacturing Systems Via Exergy,Techno-Ecological Synergy, And Optimization*. Ohio State University, Columbus: 2010

[49] Hassan M.M. Quantification Of The Environmental Benefits Of Ultrafine/Nanotitanium Dioxide Photocatalyst Coatings For Concrete Pavement Using Hybrid Life-Cycle Assessment. *J. Infrastruct. Syst.* 2010, 16 (2) pp. 160–166

[50] Roes A.L., Tabak L.B., Shen L., Nieuwlaar E., Patel M.K. Influence Of Using Nanoobjects As Filler On Funtionality-Based Energy Use Of Nanocomposites. *J. Nanopart. Res.* 2010, 12 (6) pp. 2011–2028

[51] Steinfeldt M., Von Gleich A., Petschow U., Pade C., Sprenger R.-U. *Entlastungseffekte Für Die Umwelt Durch Nanotechnische Verfahren Und Produkte. Schriftenreihe Des IÖW 177/04,Umweltbundesamt*. UBA, Berlin, Germany, 2010

[52] Wender B.A., Seager T.P. *Towards Prospective Life Cycle Assessment: Single Wall CarbonNanotubes For Lithium-Ion Batteries*. IEEE, Chicago: 2011

[53] De Figueirêdo M.C.B., Rosa M.F., Ugaya C.M.L., Moreila De Souza Filho M.S., Carneiro Da Silva Braid A.C., De Melo L.F.L. Life Cycle Assessment Of Cellulose Nanowhiskers. *J. Clean. Prod.* 2012, 35 Pp. 130–139

[54] Deorsola F.A., Russo N., Blengini G.A., FINO D. Synthesis, Characterization And Environmental Assessment Of Nanosized Mos2 Particles For Lubricants Applications. *Chem. Eng. J.* 2012, **195-196** pp. 1–6

[55] Eckelman M.J., Mauter M.S., Isaacs J.A., Elimelech M. New Perspectives On Nanomaterial Aquatic Ecotoxicity: Production Impacts Exceed Direct Exposure Impacts For Carbon Nanotubes. *Environ.Sci. Technol.* 2012, **46** pp. 2902–2910

[56] Manda, B. M. K., Blok, K. And Patel, M. K. Innovations In Papermaking: An LCA Of Printing And Writing Paper From Conentional And High Yield Pulp. *Science Of The Total Environment*, 439(2012),307-320.

[57] Pascu O., Carenza E., Gich M., Estradé S.N., Peiró F., Herranz G. Et Al. Surface Reactivity Of Iron Oxide Nanoparticles By Microwave-Assisted Synthesis. *Comparison With The Thermal Decomposition Route. The Journal Of Physical Chemistry C*. 2012, **116** pp. 15108–15116

[58] Tellaetxe A., Blazquez M., Arteche A., Egizabal A., Ermini V., Rose J. Et Al. Life Cycle Assessment Of The Application Of Nanoclays In Wire Coating. *IOP Conf. Series: Materials Science And Engineering*, 40, 012014 (2012), 13 pp.

[59] Babaizadeh H., Hassan M. Life Cycle Assesment Of Nano-Sized Titanium Dioxide Coating On Residential Windows. *Constr. Build. Mater.* 2013, **40** pp. 314–321

[60] Dahlben L.J., Eckelman M.J., Hakimian A., Somu S., Isaacs J.A. Environmental Life Cycle Assessment Of A Carbon Nanotube-Enabled Semiconductor Device. *Environ. Sci. Technol.* 2013, **47** pp. 8471–8478

[61] D'errico F., Plaza G.G., Giger F., Kim S.K. Final Assessment Of Preindustrial Solid-State Route For High-Performance Mg-System Alloys Production: Concluding The EU Green Metallurgy Project. *JOM*. 2013, **65** (10) pp. 1293–1302

[62] Gao T., Jelle B.P., Sandberg L.I.C., Gustavsen A. Monodisperse Hollow Silica Nanospheres For Nano Insulation Materials: Synthesis, Characterization, And Life Cycle Assessment. *ACS Appl.Mater. Interfaces*. 2013, **5** pp. 761–767

[63] Griffiths O.G., Owen R.E., O'byrne J.P., Mattia D., Jones M.D., Mcmanus M.C. Using Life Cycle Assessment To Measure The Environmental Performance Of Catalysts And Directing Research In The Conversion Of CO2 Into Commodity Chemicals: A Look At The Potential For Fuels From 'Thinair'. *RSC Advances*. 2013, **3** pp. 12244–12254

[64] Griffiths O.G., O'byrne J.P., Torrente-Murciano L., Jones M.D., Mattia D., Mcmanus M.C.Identifying The Largest Environmental Life Cycle Impacts During Carbon Nanotube Synthesis Via Chemical Vapour Deposition. *J. Clean. Prod.* 2013, **42** pp. 180–189

[65] Jayapalan A.R., Lee B.Y., Kurtis K.E. Can Nanotechnolgy Be 'Green'? Comparing Efficacy Of Nano And Microparticles In Cementitious Materials. *Cement Concr. Compos.* 2013, **36** pp. 16–24

[66] Lecorre D., Hohenthal C., Dufresne A., Bras J. Comparative Sustainability Assessment Of Starch Nanocrystals. *J. Polym. Environ.* 2013, **21** (1) pp. 71–80

[67] Li Q., Mcginnis S., Sydnor C., Wong A., Renneckar S. Nanocellulose Life Cycle Assessment. *AcsSustain. Chem.& Eng.* 2013, **1** pp. 919–928

[68] Mohr N.J., Meijer A., Huijbregts M.A.J., Reijnders L. Environmental Life Cycle Assessment Of Roofintegrated Flexible Amorphous Silicon/Nanocrystalline Silicon Solar Cell Laminate. *Prog. Photovolt. Res. Appl.* 2013, **21** pp. 802–815

[69] Pini, M., Cedillo González, E. I., Neri, P., Siligardi, C. And Ferrari, A. M. *Life Cycle Assessment Of NanoTiO2 Coated Self-Cleaning Float Glass*. 2013.

[70] Zuin S., Scanferla P., Brunelli A., Marcomini A., Wong J.E., Wennekes W. Et Al. Layer-By-Layer Deposition Of Titanium Dioxide Nanoparticles On Polymeric Membranes: A Life Cycle Assessment Study. *ACS Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2013, **52** pp. 13979–13990

[71] Arvidsson R., Kushnir D., Sandén B.A., Molander S. Prospective Life Cycle Assessment Of Graphene Production By Ultrasonication And Chemical Reduction. *Environ. Sci. Technol.* 2014, **48** pp. 4529–4536

[72] Barberio G., Scalbi S., Buttol P., Masoni P., Righi S. Combining Life Cycle Assessment And Qualitative Risk Assessment: The Case Study Of Alumina Nanofluid Production. *Sci. Total Environ.*2014, **496** pp. 122–131

[73] Gilbertson L.M., Busnaina A.A., Isaacs J.A., Zimmerman J.B., Eckelman M.J. Life Cycle Impacts And Benefits Of A Carbon Nanotube-Enabled Chemical Gas Sensor. *Environ. Sci. Technol.* 2014, **48** pp. 11360–11368

[74] Li B., Gao X., Li J., Yuan C. Life Cycle Environmental Impact Of High-Capacity Lithium Ion Battery With Silicon Nanowires Anode For Electric Vehicles. *Environ. Sci. Technol.* 2014, **48** pp. 3047– 3055

[75] OECD. *Nanotechnology And Tyres: Greening Industry And Transport*. OECD Publishing, Paris, France, 2014

[76] Schrijvers D.L., Leroux F., Verney V., Patel M.K. Ex-Ante Life Cycle Assessment Of Polymer Nanocomposites Using Organo-Modified Layered Double Hydroxides For Potential Application In Agricultural Films. *Green Chem.* 2014, **16** pp. 4969–4984

[77] Thakur A. *Comparative Life Cycle Assessment Of Sunscreen Lotion Using Organic Chemicals Versus Nano-Titanium Dioxide As UV Blocker*. Arizona State University, Tempe: 2014

[78] Yaseneva P., Marti C.F., Palomares E., Fan X., Morgan T., Perez P.S. Et Al. Efficient Reduction Of Bromates Using Carbon Nanofibre Supported Catalysts: Experimental And A Comparative Life Cycle Assessment Study. *Chem. Eng. J.* 2014, **248** pp. 230–241

[79] Alaviitala T., Mattila T.J. Engineered Nanomaterials Reduce But Do Not Resolve Life Cycle Environmental Impacts Of Power Capacitors. *J. Clean. Prod.* 2015, **93** Pp. 347–353

[80] Arvidsson R., Nguyen D., Svanström M. Life Cycle Assessment Of Cellulose Nanofibrils Production By Mechanical Treatment And Two Different Pretreatment Processes. *Environ. Sci. Technol.* 2015, **49** pp. 6881–6890

[81] Ferrari, A. M., Pini, M., Neri, P. And Bondioli, F. Nano-TiO2 Coatings For Limestone: Which Sustainability For Cultural Heritage? *Coatings*, 5(2015), 232-245.

[82] Gavankar S., Suh S., Keller A.A. The Role Of Scale And Technology Maturity In Life Cycle Assessment Of Emerging Technologies - A Case Study On Carbon Nanotubes. *J. Ind. Ecol.* 2015, **19** (1) pp. 51–60

[83] Hicks A.L., Gilbertson L.M., Yamani J.S., Theis T.L., Zimmerman J.B. Life Cycle Payback Estimates Of Nanosilver Enabled Textiles Under Different Silver Loading, Release, And Laundering Scenarios Informed By Literature Review. *Environ. Sci. Technol.* 2015, **49** pp. 7529–7542

[84] Leng W., Pati P., Vikesland P.J. Room Temperature Seed Mediated Growth Of Gold Nanoparticles: Mechanistic Investigations And Life Cycle Assessment. *Environ. Sci. Nano*. 2015, **2** pp. 440–453

[85] Manda B.M.K., Worrell E., Patel M.K. Prospective Life Cycle Assessment Of An Antibacterial T-Shirt And Supporting Business Decisions To Create Value. *Resour. Conserv. Recycling*. 2015, **103** pp. 47–57

[86] Middlemas S., Fang Z.Z., Fan P. Life Cycle Assessment Comparison Of Emerging And Traditional Titanium Dioxide Manufacturing Processes. *J. Clean. Prod.* 2015, **89** pp. 137–147

[87] Notter D., Kouravelou K., Karachalios T., Daletou M.K., Haberland M.T. Life Cycle Assessment Of PEM FC Applications: Electric Mobility And U-CHP. *Energy Environ. Sci.* 2015, **8** pp. 1969–1985

[88] Ojeda, K. A., Herrera, A. P., Sierra, M. J. And Tamayo, K. Evaluación Del Impacto Ambiental Del Uso De Nanopartículas De Alúmina Como Aditivo De Mezclas Biodiesel/Diésel Mediante Análisis De Ciclo De Vida [Environmental Impact Study By Life Cycle Assessment Of The Use Of Alumina Nanoparticles As An Additive In Biodiesel/Diesel Blends]. *Ingenieria Y Competitividad*, 17, 1 (2015), 133-142.

[89] Piccinno F., Hischier R., Seeger S., Som C. Life Cycle Assessment Of A New Technology To Extract, Functionalize And Orient Cellulose Nanofibers From Food Waste. *ACS Sustain. Chem.& Eng.* 2015, 3 (6) pp. 1047–1055

[90] Pini M., Rosa R., Neri P., Bondioli F., Ferrari A.M. Environmental Assessment Of A Bottom-Up Hydrolytic Synthesis Of TiO2 Nanoparticles. *Green Chem.* 2015, **17** (1) pp. 518–531

[91] Pourzahedi L., Eckelman M.J. Environmental Life Cycle Assessment Of Nanosilver-Enabled Bandages. *Environ. Sci. Technol.* 2015, **49** pp. 361–368

[92] Pourzahedi L., Eckelman M.J. Comparative Life Cycle Assessment Of Silver Nanoparticle Synthesis Routes. *Environ. Sci. Nano*. 2015, **2** (4) pp. 361–369

[93] Slotte M., Metha G., Zevenhoven R. Life Cycle Indicator Comparison Of Copper, Silver, Zinc And Aluminum Nanoparticle Production Through Electric Arc Evaporation Or Chemical Reduction. *Int. J.Energy Environ. Eng.* 2015, **6** (3) pp. 233–243

[94] Tsang M.P., Sonnemann G.W., Bassani D.M. A Comparative Human Health, Ecotoxicity, And Product Environmental Assessment On The Production Of Organic And Silicon Solar Cells. *Prog. Photovolt. Res. Appl.* 2016, **24** (5) Pp. 645–655

[95] Arvidsson, R. And Molander, S. Prospective Life Cycle Assessment Of Epitaxial Graphene Production At Different Manufacturing Scales And Maturity. *Journal Of Industrial Ecology* (2016), N/A-N/A.

[96] Bobba S., Deorsola F.A., Blengini G.-A., Fino D. LCA Of Tungsten Disulphide (WS2) Nano-Particles Synthesis: State Of Art And From-Cradle-To-Gate LCA . *J. Clean. Prod.* 2016, **139** pp. 1478–1484

[97] Buist H.E., Hischier R., Westerhout J., Brouwer D.H. Derivation Of Health Effect Factors For Nanoparticles To Be Used In LCIA . *Nanoimpact*. 2017, **7** pp. 41–53

[98] Gifford M., Chester M., Hristovski K., Westerhoff P. Reducing Environmental Impacts Of Metal (Hydr)Oxide Nanoparticle Embedded Anion Exchange Resins Using Anticipatory Life Cycle Assessment. *Environ. Sci. Nano*. 2016, **3** (6) pp. 1351–1360

[99] Do Nascimento D.M., Dias D.F., Araújo C.P. Junior., Rosa M.F., Morais J.P.S., Figueirêdo M.C.B. A Comprehensive Approach For Obtaining Cellulose Nanocrystal From Coconut Fiber. Part II: Environmental Assessment Of Technological Pathways. *Ind. Crops Prod.* 2016, **93** pp. 58–65

[100] Miseljic M., Olsen S.I. Life Cycle Assessment Of Functionally Enhanced Polymers—Engineered Nanomaterials Or Conventional Additives? *J. Nanosci. Nanotechnol.* 2016, **16** (8) pp. 8007–8018

[101] Pati P.M.S., Vikesland P.J. Waste Not Want Not: Life Cycle Implications Of Gold Recovery And Recycling From Nanowaste. *Environ. Sci. Nano*. 2016, **3** (5) pp.

1133–1143

[102] Scott R.P., Cullen A.C. Reducing The Life Cycle Environmental Impacts Of Kesterite Solar Photovoltaics: Comparing Carbon And Molybdenum Back Contact Options. *Int. J. Life Cycle Assess.* 2016, **21** (1) pp. 29–43

[103] Salieri B., Hischier R. Nanotechnology And Hydrogen Production: A LCA Study On Photocatalytic Hydrogen Production With Nanocarbon-Inorganic Hybrid Material. In *Proceedings Of The X Convegno Scientifico Della Rete Italiana Di LCA . Life Cylce Thinking, Sostenibilita' Ed Economia Circolare* (Ravenna, 23-24 July, 2016). ENEA, [Insert City Of Publication],[Insert 2016 Of Publication].

[104] Stamou I., Antizar-Ladislao B. A Life Cycle Assessment Of The Use Of Compost From Contaminated Biodegradable Municipal Solid Waste With Silver And Titanium Dioxide Nanoparticles. *J. Clean. Prod.* 2016, **135** pp. 884–891

[105] Tichá M., Žilka M., Stieberová B., Freiberg F. Life Cycle Assessment Comparison Of Photocatalytic Coating And Air Purifier. *Integr. Environ. Assess. Manag.* 2016, **12** (3) pp. 478–485

[106] Zhai P., Isaacs J.A., Eckelman M.J. Net Energy Benefits Of Carbon Nanotube Applications. *Appl. Energy*. 2016, **173** pp. 624–634

[107] Zhang, H., Hortal, M., Dobon, A. And Al., E. Selection Of Nanomaterial-Based Active Agents For Packaging Application: Using Life Cycle Assessment (LCA) As A Tool. *Packaging Technology And Science*(2016), N/A-N/A.

[108] Ahmed A., Hassan I., Ibn-Mohammed T., Mostafa H., Reaney I.M., Koh L.S.C. Et Al. Environmental Life Cycle Assessment And Techno-Economic Analysis Of Triboelectric Nanogenerators. *Energy Environ. Sci.* 2017, **10** (3) pp. 653–671

[109] Feijoo S., González-García S., Moldes-Diz Y., Vazquez-Vazquez C., Feijoo G., Moreira M.T. Comparative Life Cycle Assessment Of Different Synthesis Routes Of Magnetic Nanoparticles. *J. Clean. Prod.* 2017, **143** pp. 528–538

[110] Caramazana-Gonzalez P., Dunne P.W., Gimeno-Fabra M., Zilka M., Ticha M., Stieberova B. Et Al. Assessing The Life Cycle Environmental Impacts Of Titania Nanoparticle Production By Continuous Flow Solvo/Hydrothermal Syntheses. *Green Chem.* 2017, **19** (6) pp. 1536–1547

[111] Hicks A.L., Theis T.L. A Comparative Life Cycle Assessment Of Commercially Available Household Silver-Enabled Polyester Textiles. *Int. J. Life Cycle Assess.* 2017, **22** (2) pp. 256–265

[112] Hischier R., Salieri B., Pini M. Most Important Factors Of Variability And Uncertainty In An LCA Study Of Nanomaterials – Findings From A Case Study With Nano Titanium Dioxide. *Nanoimpact*. 2017, **7** pp. 17–26

[113] Martins F., Machado S., Albergaria T., Delerue-Matos C. LCA Applied To Nano Scale Zero Valent Iron Synthesis. *Int. J. Life Cycle Assess.* 2017, **22** (5) pp. 707–714

[114] Papadaki, D., Foteinis, S., Mhlongo, G. H. And Al., E. Life Cycle Assessment Of Facile Microwave-Assisted Zinc Oxide (Zno) Nanostructures. *Sci. Total Environ.* 2017, **586** pp. 566–575

[115] Pini M., Bondioli F., Montecchi R., Neri P., Ferrari A.M. Environmental And Human Health Assessment Of Life Cycle Of NanoTiO_2 Functionalized Porcelain Stoneware Tile. *Sci. Total Environ.* 2017, **577** pp. 113–121

[116] Pini M., Cedillo González E.I., Neri P., Siligardi C., Ferrari A.M. Assessment Of Environmental Performance Of TiO_2 Nanoparticles Coated Self-Cleaning Float Glass. *Coatings*, 7,8(2017), 16 pp.

[117] Pourzahedi L., Vance M.E., Eckelman M.J. Life Cycle Assessment And Release Studies For 15 Nanosilver-Enabled Consumer Products: Investigating Hotspots And Patterns Of Contribution. *Environ. Sci. Technol.* 2017

[118] Pourzahedi L., Zhai P., Isaacs J.A., Eckelman M.J. Life Cycle Energy Benefits Of Carbon Nanotubes For Electromagnetic Interference (EMI) Shielding Applications. *J. Clean. Prod.* 2017, **142** (Part 4) pp. 1971–1978

[119] Stieberova B., Zilka M., Ticha M., Freiberg F., Caramazana-González P., Mckechnie J. Et Al. Application Of Zno Nanoparticles In A Self-Cleaning Coating On A Metal Panel: An Assessment Of Environmental Benefits. *Acs Sustain. Chem.& Eng.* 2017, **5** (3) pp. 2493–2500.

[120] Upadhyayula V.K.K., Meyer D.E., Gadhamshetty V., Koratkar N. Screening-Level Life Cycle Assessment Of Graphene-Poly(Ether Imide) Coatings Protecting Unalloyed Steel From Severe Atmospheric Corrosion. *Acs Sustain. Chem.& Eng.* 2017, **5** (3) pp. 2656–2667.

[121] Wigger H., Steinfeldt M., Bianchin A. Environmental Benefits Of Coatings Based On Nano-Tungsten-Carbide Cobalt Ceramics. *J. Clean. Prod.* 2017, **148** pp. 212–222

[122] ISO/TS 18220:2016, *Water Quality - Larval Development Test With The Harpacticoid Copepod Nitocra Spinipes*

[۱۲۳] استاندارد ملی ایران-ایزو شماره ۱-۸۰۰۰۴: سال ۱۳۹۵، فناوری نانو- واژه‌نامه-قسمت ۱: اصطلاحات اصلی

[۱۲۴] استاندارد ملی ایران – ایزو شماره ۲-۸۰۰۰۴: سال ۱۳۹۵، فناوری نانو- واژه‌نامه- قسمت ۲: نانواشیاء.

[125] EN ISO 19020:2017, *Microbiology Of The Food Chain - Horizontal Method For The Immunoenzymatic Detection Of Staphylococcal Enterotoxins In Foodstuffs (ISO 19020:2017)*

[۱۲۶] استاندارد ملی ایران شماره ۴۷۲۳: سال ۱۳۹۰، واژه¬نامه اندازه‌شناسی- مفاهیم پایه و عمومی و اصطلاحات مربوط

[127] EN ISO 14021:2001, *Environmental labels and declarations - Self-declared environmental claims (Type II environmental labelling) (ISO 14021:2001)*

یادآوری- استاندارد ملی ایران شماره ۱۵۹۴۶: ۱۳۹۷، برچسب‌ها و اظهاریه‌های محیط‌زیستی- ادعاهای محیط‌زیستی خوداظهاری (برچسب‌گذاری محیط‌زیستی نوع II) براساس استاندارد EN ISO 14021:2016 تدوین شده‌است.

[128] ISO/TS 9000:2005, *Quality management systems - Fundamentals and vocabulary (ISO 9000:2005)*

یادآوری- استاندارد ملی ایران– ایزو شماره ۹۰۰۰: ۱۳۹۶، سیستم های مدیریت کیفیت- مبانی و واژگان براساس استاندارد EN ISO 9000:2015 تدوین شده‌است.