



جمهوری اسلامی ایران
Islamic Republic of Iran
سازمان ملی استاندارد ایران

Iran National Standards Organization



استاندارد ملی ایران

۲۳۴۴۲

چاپ اول

۱۴۰۲



دارای محتوای رنگی

INSO

23442

1st Edition

2024

Identical with
ISO/TR: 22293:
2021

فناوری نانو- ارزشیابی روش‌های ارزیابی
رهایش نانومواد از چندسازه‌های بسپاری
تجاری حاوی نانو مواد

**Nanotechnology- Evaluation of methods for
assessing the release of nanomaterials from
commercial, nanomaterial-containing
polymer composites**

ICS: 07.120

استاندارد ملی ایران شماره ۲۳۴۴۲ (چاپ اول): سال ۱۴۰۲

سازمان ملی استاندارد ایران

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

صندوق پستی: ۱۴۱۵۵-۶۱۳۹ تهران- ایران

تلفن: ۵-۸۸۸۷۹۴۶۱

دورنگار: ۸۸۸۸۷۱۰۳ و ۸۸۸۸۷۰۸۰

کرج - شهر صنعتی، میدان استاندارد

صندوق پستی: ۳۱۵۸۵-۱۶۳ کرج - ایران

تلفن: ۸-۳۲۸۰۶۰۳۱ (۰۲۶)

دورنگار: ۳۲۸۰۸۱۱۴ (۰۲۶)

رایانامه: standard@inso.gov.ir

وبگاه: <http://www.inso.gov.ir>

Iran National Standards 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 موجب بند یک ماده ۷ قانون تقویت و توسعه نظام استاندارد، ابلاغ شده در دی ماه ۱۳۹۶، وظیفه تعیین، تدوین و نشر استانداردهای ملی را به عهده 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 مشارروپوش آگاهانه و منصفانه 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 پیشنهادهای در کمیته ملی مرتبط با آن رشته طرح و در صورت تصویب، به عنوان 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 در کمیته ملی طرح، بررسی و در صورت تصویب، به عنوان استاندارد ملی ایران چاپ و منتشر می‌شود. بدین ترتیب، استانداردهایی ملی تلقی می‌شود که بر اساس مقررات استاندارد ملی ایران شماره ۵ تدوین و در کمیته 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)^۱، کمیسیون بین‌المللی الکتروتکنیک (IEC)^۲ و سازمان بین‌المللی اندازه‌شناسی قانونی (OIML)^۳ است و به عنوان تنها رابط^۴ کمیسیون کدکس غذایی (CAC)^۵ 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 محیط زیستی 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 استانداردهای کالاهای صادراتی و درجه‌بندی آن را اجباری کند. همچنین برای اطمینان بخشیدن به استفاده‌کنندگان از خدمات سازمان‌ها و مؤسسات فعال در زمینه مشاوره، آموزش، بازرسی، ممیزی و صدورگواهی سیستم‌های مدیریت کیفیت و مدیریت محیط زیستی، آزمایشگاه‌ها و مراکز واسنجی (کالیبراسیون) وسایل سنجش، سازمان ملی استاندارد این‌گونه سازمان‌ها و مؤسسات را بر اساس ضوابط نظام تأیید صلاحیت ایران ارزشیابی می‌کند و در صورت احراز شرایط لازم، گواهینامه تأیید صلاحیت به آن‌ها اعطا و بر عملکرد آن‌ها نظارت می‌کند. ترویج دستگاه بین‌المللی یکاها، کالیبراسیون 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 of Legal Metrology (Organisation Internationale de Metrologie Legals)

4- Contact point

5- Codex Alimentarius Commission

کمیسیون فنی تدوین استاندارد

«فناوری نانو- ارزیابی روش‌های ارزشیابی رهایش نانومواد از چندسازه‌های بسیاری تجاری حاوی نانومواد»

سمت و/یا محل اشتغال:

مدیر تحقیق و توسعه- شرکت آرال تجهیز آزما

رئیس:

صادق حسنی، صدیقه
(دکتری شیمی تجزیه- الکتروشیمی)

دبیر:

مدیر فنی- آزمایشگاه‌های مرکز پژوهش‌های کاربردی علوم زمین
البرز

نجفی اصلی پاشاکی، شبنم
(دکتری شیمی تجزیه)

اعضا: (اسامی به ترتیب حروف الفبا)

کارشناس مسئول- گروه استاندارد و ایمنی ستاد فناوری‌های نانو
و میکرو

اسلامی‌پور، الهه
(کارشناسی ارشد زیست‌شناسی)

عضو هیئت علمی- دانشگاه تهران

اکبری، بابک
(دکتری مهندسی و علم مواد)

سرپرست معاونت- آزمایشگاه‌های مرکز پژوهش‌های کاربردی
علوم زمین البرز

برخی، محمد
(کارشناسی ارشد شیمی معدنی)

معاون مدیر- پژوهش و مستندسازی پژوهشگاه مواد و انرژی

ترک نیک، فاطمه سادات
(دکتری مهندسی مواد)

عضو هیئت علمی- دانشکده فنی دانشگاه ارومیه

تکیه معروف، باهره
(دکتری مهندسی و علم مواد)

رئیس هیئت مدیره- شرکت راصد توسعه فناوری‌های پیشرفته

سهرابی جهرمی، ابوذر
(دکتری نانوفناوری)

مشاور- گروه استاندارد و ارزشیابی ستاد توسعه فناوری‌های نانو و
میکرو

سیفی، مهوش
(کارشناسی ارشد مدیریت دولتی)

عضو هیئت علمی- دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی

فرهنگ دهقان، سمیه
(دکتری بهداشت حرفه‌ای)

اعضا: (اسامی به ترتیب حروف الفبا)

لسان خوش، رسول

(دکتری مهندسی و علم مواد)

منهاج‌بناء، رابعه

(دکتری سم‌شناسی)

ویراستار:

سیفی، مهوش

(کارشناسی ارشد مدیریت دولتی)

سمت و/یا محل اشتغال:

هیئت مدیره - شرکت بسیار پیشرفته شریف

مدیر عامل - شرکت راهبران توسعه سبز

مشاور - گروه استاندارد و ارزشیابی ستاد توسعه فناوری‌های نانو و میکرو

فهرست مندرجات

صفحه	عنوان
ز	پیش‌گفتار
ح	مقدمه
۱	۱ هدف و دامنه کاربرد
۱	۲ مراجع الزامی
۱	۳ اصطلاحات و تعاریف
۵	۴ کوتاه‌نوشت‌ها
۶	۵ شناخت محصولات نانوپدید
۶	۱-۵ تحلیل مسیر برای زنجیره تامین
۱۲	۲-۵ تاثیر مشخصه‌های زمینه و MNM بر میزان و شکل رهایش
۲۳	۶ عوامل موثر بر انتخاب روش اندازه‌گیری رهایش
۲۳	۱-۶ کلیات
۲۴	۲-۶ حالت‌های رهایش
۳۱	۳-۶ چارچوب پشتیبان تصمیم‌گیری برای تعیین استحاله‌های نیازمند بررسی با مثال
۳۴	۷ رویکردهایی برای آشکارسازی و کمی‌سنجی مواد رهایش‌یافته مرتبط با نانوموادساخته‌شده افزوده‌شده
۳۴	۱-۷ کلیات
۳۵	۲-۷ روش‌های نمونه‌برداری از مواد رهایش‌یافته
۴۱	۳-۷ روش‌های آماده‌سازی نمونه‌هایی از مواد رهایش‌یافته برای آنالیز بعدی
۴۵	۴-۷ چالش‌های اندازه‌گیری
۴۹	۵-۷ ملاحظات برای آشکارسازی، کمی‌سنجی و تعیین خواص مواد رهایش‌یافته
۵۰	۶-۷ روش‌های اندازه‌گیری کاربردی
۵۱	۸ شناسایی نیازها برای استانداردها، روش‌ها، دستگاه‌ها، چارچوب‌های تصمیم‌گیری و تحقیق
۵۱	۱-۸ کلیات
۵۱	۲-۸ روش‌های بالقوه بهبودیافته/جدید
۵۲	۳-۸ مطالعات بین‌آزمایشگاهی
۵۴	۴-۸ پروتکل‌ها و سنجش‌ها
۵۵	۵-۸ فرصت‌های استانداردسازی روش‌ها
۵۶	۶-۸ چارچوب‌های تصمیم‌گیری
۶۰	پیوست الف (آگاهی‌دهنده) مثال‌های مطالعه موردی
۸۶	کتاب‌نامه

پیش‌گفتار

استاندارد «فناوری نانو- ارزیابی روش‌های ارزشیابی رهایش نانومواد از چندسازه‌های بسیاری تجاری حاوی نانومواد» که پیش‌نویس آن در کمیسیون‌های مربوط بر مبنای پذیرش استانداردهای بین‌المللی/منطقه‌ای به عنوان استاندارد ملی ایران به روش اشاره شده در مورد الف، بند ۷، استاندارد ملی ایران شماره ۵ تهیه و تدوین شده، در یکصد و چهل و یکمین اجلاس کمیته ملی استاندارد فناوری نانو مورخ ۱۴۰۲/۱۱/۱۴ تصویب شد. اینک این استاندارد به استناد بند یک ماده ۷ قانون تقویت و توسعه نظام استاندارد، ابلاغ شده در دی ماه ۱۳۹۶، به عنوان استاندارد ملی ایران منتشر می‌شود.

استانداردهای ملی ایران براساس استاندارد ملی ایران شماره ۵ (استانداردهای ملی ایران- ساختار و شیوه نگارش) تدوین می‌شوند. برای حفظ همگامی و هماهنگی با تحولات و پیشرفت‌های ملی و جهانی در زمینه 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، مورد توجه قرار خواهد گرفت. بنابراین، باید همواره از آخرین تجدیدنظر استانداردهای ملی ایران استفاده کرد.

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

ISO/TR 22293: 2021, Nanotechnologies — Evaluation of methods for assessing the release of nanomaterials from commercial, nanomaterial-containing polymer composites

۱-۰ کلیات

استفاده از نانومواد ساخته شده (MNMs)^۱ در محصولات مصرفی و کاربردهای آنها به دلیل بهره‌برداری تولیدکنندگان از خواص منحصر به فرد نانومواد، در حال رشد است. استفاده از MNMs یک شاخصه رایج روزافزون در انواع رو به رشد برنامه‌های کاربردی تجاری و محصولات مصرفی، از تراشه‌های رایانه‌ای گرفته تا چوب‌های گلف، است. به همین اندازه نگرانی‌هایی نیز وجود دارد در مورد اینکه چه چیزی از محصولات حاوی MNM رهاش^۲ می‌شود یا می‌تواند رهاش یابد و ریسک‌ها و اثرات بالقوه مواجهه چنین رهاش‌هایی چیست. این خواص منحصر به فرد، ارزش تجاری قابل توجهی دارند و امکان تولید محصولاتی را فراهم می‌کنند که مشخصه‌های نوینی را ارائه می‌دهند. ممکن است MNM در جامدات جاسازی شده^۳ باشد، ممکن است در سیال معلق باشد یا ممکن است به سطح محصولات جامد متصل شود. درک آنچه از محصولات حاوی MNM رهاش می‌یابد برای برنامه‌ریزی و مدیریت توسعه و استفاده ایمن از آن محصولات مهم است.

هدف این استاندارد کمک به درک از طریق ارائه راهنمایی برای کسب اطلاعاتی است که باید در تعیین روش‌های شناسایی و ارزشیابی رهاش MNMs از زمینه‌ها^۴، در نظر گرفته شوند. همچنین ارائه چارچوبی برای درک این که چگونه این روش‌ها و اطلاعاتی که آنها تولید می‌کنند می‌تواند از تصمیم‌گیری و شناسایی فرصت‌هایی برای توسعه استانداردها در این حوزه حمایت کند.

این استاندارد از طریق بررسی اولیه پتانسیل رهاش MNM و از طریق تمرکز بر سناریوهای استفاده واقع بینانه که در آن مواجهه با MNM رهاش یافته ممکن است رخ دهد، از تصمیم‌گیری‌های مربوط به توسعه محصول و استفاده از آن پشتیبانی عملی می‌کند.

کاربران مورد نظر این استاندارد عبارتند از:

- کسانی که قصد توسعه یا تطبیق ویژگی‌های فنی برای استفاده MNM در محصولات تجاری را دارند؛
- مدیران ریسک، تولیدکنندگان محصول، کارورزان اندازه‌گیری مواجهه یا سایر ذی‌نفعانی که به دنبال رهنمود در مورد در دسترس بودن و استفاده روش‌ها برای اندازه‌گیری رهاش‌هایی هستند که ممکن است با استفاده از MNMs خاص در چندسازه‌ها رخ دهد؛
- توسعه‌دهندگان روش‌ها و آمایش دستگاه‌ها^۵ که به دنبال شناسایی نیازهای جامعه مدیریت ریسک هستند؛

1- Manufactured nanomaterials
 2- Released
 3- Embeded
 4- Matrices
 5- Instrumentation

- کسانی که برنامه‌های تحقیقاتی پایه و کاربردی را برای اندازه‌گیری و مدل‌سازی طرح‌ریزی می‌کنند تا از تصمیم‌گیری‌ها در مورد استفاده‌های ایمن پایدار از MNM حمایت کنند.

بررسی ساختاری اطلاعات مربوط به انتخاب روش‌های اندازه‌گیری MNM ارائه‌شده در این استاندارد مورد نیاز است، زیرا فناوری‌های تولید MNM، کاربردهای آن‌ها و روش‌های اندازه‌گیری MNM اغلب به‌طور همزمان در حال توسعه هستند و توسعه روش‌های اندازه‌گیری در برخی موارد می‌تواند از نیازهای توسعه محصول عقب بماند. علاوه‌براین، نیاز به اندازه‌گیری مشخصه‌های خاص MNM رهایش‌یافته نیز می‌تواند با درک بیشتر آنچه ممکن است باعث سمیت برای یک نوع خاص از MNM شود، تکامل یابد. این رابطه بین روش‌های اندازه‌گیری نوظهور و اطلاعات در حال ظهور در مورد سمیت، وجود یک رویکرد ساختاریافته برای بازنگری نیازهای اندازه‌گیری را مهم‌تر می‌کند، بنابراین داده‌ها برای حمایت از تصمیم‌گیری‌ها با استفاده از به‌روزترین و مناسب‌ترین روش‌های اندازه‌گیری هدف، جمع‌آوری می‌شوند. در نهایت، فرایند انتخاب **یک** نانومواد ساخته‌شده چندسازه خاص برای یک محصول باید شامل در نظر گرفتن این باشد که آیا روش‌های اندازه‌گیری موجود برای ارزشیابی شرایط استفاده از آن نانومواد ساخته‌شده چندسازه امکان‌پذیر است یا خیر. توجه به این موضوع لازم است زیرا بسیاری از روش‌های در دسترس برای تحقیق یا برای بررسی شرایط کنترل‌شده در تنظیمات بهداشت صنعتی برای نیازهای اندازه‌گیری واقع‌بینانه که مصرف‌کنندگان ممکن است در مواجهه آن قرار گیرند، مفید نیست. در برخی موارد، انجام این روش‌ها در خارج از آزمایشگاه بسیار دشوار است و در موارد دیگر روش‌ها بسیار پرزحمت هستند که برای پشتیبانی از تصمیم‌گیری روزمره امکان‌پذیر نیستند.

توسعه چارچوب تصمیم‌گیری ارائه‌شده در این استاندارد تا حد زیادی مبتنی بر تجزیه و تحلیل‌های اولیه است که بر رهایش از بسپارهای پلی‌آمید^۱ یا اپوکسی متمرکز است و نانولوله‌های کربنی چند دیواره (MWCNT)^۲ به آن اضافه شده‌اند. با این وجود، این چارچوب را می‌توان برای آگاهی از شیوه انتخاب روش‌هایی برای شناسایی و ارزشیابی رهایش گسترده وسیعی از MNMs و انواع زمینه‌ها، همانطور که در مطالعات موردی در پیوست الف توضیح داده شده است، استفاده کرد. مطالعات موردی به دلیل در دسترس بودن اطلاعات و روش‌های مربوط به کاربردهای واقعی چندسازه‌های بسپاری MNM انتخاب شده‌اند.

رهایش از نانوچندسازه‌های بسپاری می‌تواند از طریق فرایندهایی مانند تخریب فیزیکی، شیمیایی یا حرارتی یک زمینه بسپاری اتفاق بیفتد و منجر به ایجاد ذراتی شود که ممکن است شامل مخلوطی از MNM آزاد، بسپار آزاد و MNM متصل به زمینه باشد. این استاندارد بر اولین رهایش در مواجهه انسان یا یک مسیر جریان خروجی^۳ متمرکز است. با آگاهی به این که سرنوشت^۴ و جابه‌جایی بعدی MNM می‌تواند به‌دنبال رهایش اولیه رخ دهد، ملاحظات اصلی این استاندارد این است که چگونه و در کجا رهایش MNMs در زمینه

1- Polyamide

2- Multi-Wall Carbon Nanotubes

3- Effluent

4- Fate

استفاده مصرفی یا تجاری رخ می‌دهد و نیاز به پایش احتمال مواجهه بالقوه انسانی است. اگرچه سایر مرحله‌های چرخه حیات محصولات حاوی MNM به‌طور مختصر برای فراهم کردن محتوا، مورد بحث قرار گرفته است، جزئیات سرنوشت و رویدادهای جابه‌جایی بعدی مورد توجه قرار نگرفته است.

هدف نهایی، استفاده از ساختار گزارش این استاندارد به‌عنوان پایه‌ای برای رسیدگی به رهایش سایر MNMs از زمینه‌های دیگر در نسخه‌های بعدی استاندارد است.

۲-۰ چارچوب تصمیم‌گیری

۱-۲-۰ کلیات

در توسعه چارچوب تصمیم‌گیری ارائه‌شده در این استاندارد، دو مفهوم کلیدی که در پرداختن به مسائل مربوط به مدیریت ریسک در حمایت از تصمیم‌گیری مفید هستند، استفاده شده است. اولین مفهوم «فرمول‌بندی مشکل» است [1]. این مفهوم، هدف و زمینه تحلیل و ماهیت تصمیمی را که قرار است از آن حمایت شود، توضیح می‌دهد. با روشن ساختن این مساله، تحلیل حمایت از تصمیم خاص انجام می‌شود، این رویکرد کمک می‌کند تا اطمینان حاصل شود که تحلیل بر روش‌هایی که کاربرد عملی در آن تصمیم‌گیری دارند، متمرکز می‌شود. دومین مفهوم کلیدی «مناسب برای هدف» است. به‌عبارت دیگر، ماهیت رویکرد تحلیلی مورد استفاده باید برای پرداختن به تصمیم مدیریت ریسک خاص، کافی و مناسب باشد. این مطلب شامل اطمینان از این است که عمق تحلیل، شامل درنظر گرفتن منابع و بزرگی بالقوه عدم قطعیت، با اطلاعات مورد نیاز برای پشتیبانی از تصمیم سازگار است. در متن این استاندارد، این بدان معنی است که امکان‌سنجی در انتخاب روش‌های آنالیزی مهم است.

۲-۲-۰ کاربرد مفاهیم

در به‌کارگیری این مفاهیم برای انتخاب روش‌هایی برای شناسایی و ارزشیابی رهایش MNMs از زمینه‌ها، فرمول‌بندی مسئله شامل ارزشیابی پتانسیل مواجهه انسان با جزء محصول نانوپدید (NEP)^۱ است که حاوی MNM و پتانسیل MNM برای رهایش از آن جزء است.

برای ارزشیابی پتانسیل مواجهه انسان، درک طراحی محصول و سناریوهای استفاده بالقوه مورد نیاز است. به‌عنوان مثال، اگر جزء حاوی MNM به‌طور کامل در یک محصول مصرفی محصور شده باشد یا بخشی از یک ماشین باشد که در آن فقط حین تعمیر و نگهداری قابل دسترسی است، موقعیت‌های محدودی برای مواجهه انسان به‌عنوان بخشی از رویداد رهایش وجود دارد. توصیف سناریوهای استفاده بالقوه نیز برای درک ماهیت بالقوه مواجهه انسان (به‌عنوان مثال تماس مستقیم پوستی در مقابل استنشاق MNM رهایش‌یافته) و همچنین شرایط مربوط به سایش و پیری بالقوه (مانند پتانسیل و ماهیت سایش، دما، حضور یا عدم حضور آب و نور UV) بسیار بحرانی است.

1- Nano-Enabled Product

این مولفه‌های فرمول‌بندی مسئله می‌توانند به تعیین این که سناریوهای رهایش بالقوه و همچنین ماهیت روش‌های تحلیلی لازم نیاز به آزموده‌شدن دارند، کمک کند. بنابراین این موضوع می‌تواند در تعیین اینکه آیا ارزشیابی ریسک انتخاب ترکیب‌بندی^۱ محصول بدون سرمایه‌گذاری قابل توجه در توسعه روش‌های تحلیلی معین امکان‌پذیر است یا خیر، مفید باشد.

۰-۲-۳ رویکرد لایه‌ای^۲

در برخی شرایط، یک رویکرد لایه‌ای، مانند مواردی که در بند ۸ توضیح داده شده است، می‌تواند مفید باشد. به‌عنوان مثال، اگر رهایش خارج از ساختار محدود مورد انتظار نیست (مثلاً اگر MNM در یک گوشی تلفن قرار دارد و رهایش منجر به قرار گرفتن در مواجهه با مصرف‌کننده نمی‌شود)، یک روش تحلیلی که به سادگی MNM را شناسایی می‌کند، می‌تواند کافی باشد. در موارد دیگر، یک توصیف کیفی ممکن است برای پیش‌بینی پتانسیل برهم‌کنش‌های بعدی با مواد دیگر و در نهایت سرنوشت و جابجایی MNM مفید باشد. از چنین اطلاعاتی می‌توان برای مثال در تصمیم‌گیری در انتخاب بین طراحی‌ها یا محصولات جایگزین استفاده کرد.

۰-۲-۴ چالش‌هایی همراه با ارزیابی کمی ریسک

در نهایت، در برخی موارد ممکن است ارزشیابی کمی رهایش MNM به‌عنوان ورودی در ارزیابی کمی ریسک ضروری باشد. در چنین مواردی، مهم است تا اطمینان حاصل شود که اندازه‌گیری‌های مواجهه‌ای به‌گونه‌ای انجام شوند که یکپارچه‌سازی با داده‌های مخاطره‌آمیز برای ارزشیابی ریسک را تسهیل کند. این یکپارچه‌سازی شامل ارزشیابی مشخصه‌های MNM با در نظر گرفتن عوامل کلیدی تعیین‌کننده سمیت (به‌عنوان مثال درجه انبوهگی^۳ و عامل دارشدگی) و گزارش مواجهه در واحدهای دُز مربوط است. در حال حاضر تکمیل ارزشیابی از این نوع، چالش مهمی را ارائه می‌کند زیرا عوامل کلیدی تعیین‌کننده سمیت و واحدهای دُز مناسب هنوز در بسیاری از موقعیت‌ها در حال شناسایی هستند.

۰-۲-۵ الزامات داده

همانطور که در این استاندارد توضیح داده شد، داده‌های کلیدی مورد نیاز برای پشتیبانی از تصمیمی که مرتبط با توسعه و استفاده محصول است شامل موارد زیر می‌شود:

- شرح NEP و جایی از محصول که MNM در آن یافت می‌شود؛

- شرح سناریوهای استفاده متداول، از جمله فراوانی استفاده و جمعیت‌های مربوطه؛

- شرح سازوکارهای تخریب بالقوه که می‌تواند منجر به رهایش تحت سناریو(های) مورد نظر شود؛

1- Composition
2- Tiered approach
3- Aggregation

- شرح نانومواد؛

- توصیفی از زمینه چندسازه و مقاومت آن در برابر تخریب تحت سناریو(های) استفاده مورد نظر.

براساس این اطلاعات، ارزیاب می‌تواند پتانسیل رهایش (از جمله نرخ رهایش) و محیط‌های احتمالی که ممکن است رهایش در آن رخ دهد را تعیین کند. این پارامترها به‌نوبه خود ماهیت نمونه‌برداری و روش‌های تحلیلی را که ممکن است مورد نیاز باشد، مشخص می‌کند.

۳-۰ ساختار استاندارد و استفاده

پس از یک بحث مختصر در مورد چگونگی ارتباط موضوع این استاندارد با تجزیه و تحلیل چرخه‌حیات، این استاندارد به ساختار بسپار و MNM جاسازی شده و این‌که این ساختارها چگونه نیازهای روش‌های اندازه‌گیری را از طریق تأثیر آن‌ها بر نرخ و شکل رهایش اطلاع می‌دهند، می‌پردازد (به بند ۵ مراجعه شود). بند ۶ توضیح می‌دهد که چگونه واجهنگی^۱ نسبی زمینه بسپاری و MNM جاسازی شده، نیازهای روش‌های اندازه‌گیری را از طریق تأثیر آن‌ها بر ماهیت رهایش حاصل، بیان و یک چارچوب تصمیم‌گیری لایه‌ای (مرحله‌ای) را پیشنهاد می‌کند که کدام استحاله‌ها^۲ در نقطه رهایش باید در نظر گرفته شوند. نمونه‌های کار شده با استفاده از چارچوب تصمیم‌گیری که در زیربند ۶-۳ مشخص شده است در پیوست الف ارائه شده است. بند ۷ به روش‌هایی برای اندازه‌گیری و توصیف مشخصه‌های مواد رهایش یافته، از جمله روش‌های نمونه‌برداری در محیط‌های مختلف، روش‌های آماده‌سازی و آنالیز نمونه و چالش‌های اندازه‌گیری اشاره می‌کند. بند ۸ به خلأهای باقی‌مانده و داده‌های مورد نیاز می‌پردازد و به‌طور خلاصه چند چارچوب تصمیم‌گیری موجود را برای حمایت از مدیران ریسک در تعیین اطلاعات و روش‌های نمونه‌برداری مورد نیاز برای پشتیبانی از تصمیمات طراحی و توسعه محصول بررسی می‌کند.

پیش‌بینی می‌شود که اطلاعات ارائه شده در این استاندارد برای کمک به تولیدکنندگان و کارگزاران نظارتی برای شناسایی واضح‌تر محصولات و سناریوهای با پتانسیل کم مواجهه مصرف‌کننده (مثلاً جایی که MNM بخشی از یک جزء است که به‌طور کامل محصور شده است) و محصولات و سناریوهای با پتانسیل مواجهه بالاتر (به‌عنوان مثال MNM که در تماس مداوم با پوست انسان است یا تحت شرایط هوازدگی^۳ شدید استفاده می‌شود) راهکارهایی بیابد. این استاندارد همچنین قصد دارد، در مرحله طراحی محصول، به ارزشیابی این‌که چگونه تغییرات در افزودنی‌ها، پوشش‌ها یا ترکیب‌بندی MNM بر نرخ رهایش MNM و نیازهای اندازه‌گیری تأثیر می‌گذارد، کمک کند.

1- Resilience
2- Transformation
3- Weathering

فناوری نانو- ارزشیابی روش‌های ارزیابی رهایش نانومواد از چندسازه‌های بسیاری تجاری حاوی نانومواد

۱ هدف و دامنه کاربرد

هدف از تدوین این استاندارد، بررسی و ارزشیابی کاربردپذیری روش‌های موجود برای ارزیابی مواد رهایش‌یافته از چندسازه‌های بسیاری تجاری در حمایت از تصمیم‌گیری‌های ایمنی و استفاده از محصول است و روش‌های تجدیدنظر شده یا تکمیلی مورد نیاز را شرح می‌دهد. این استاندارد مستقیماً بر توصیف روش‌ها متمرکز نیست، بلکه هدف، توصیف اطلاعاتی است که در انتخاب روش‌ها برای حمایت از تصمیم‌گیری مناسب در نظر گرفته می‌شوند.

۲ مراجع الزامی

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

در صورتی که به مرجعی با ذکر تاریخ نشری ارجاع داده شده باشد، اصلاحیه‌ها و تجدیدنظرهای بعدی آن برای این استاندارد الزام‌آور نیست. در مورد مراجعی که بدون ذکر تاریخ نشری به آن‌ها ارجاع داده شده است، همواره آخرین تجدیدنظر و اصلاحیه‌های بعدی برای این استاندارد الزام‌آور است. استفاده از مرجع زیر برای کاربرد این استاندارد الزامی است:

2-1 ISO/TS 80004 (all parts), Nanotechnologies — Vocabulary

یادآوری- مجموعه استانداردهای ملی ایران- ایزو شماره ۸۰۰۰۴ و مجموعه استانداردهای ملی ایران شماره ۱۸۳۹۲، فناوری نانو- واژه نامه

۳ اصطلاحات و تعاریف

در این استاندارد علاوه بر تعاریف ارائه شده در مجموعه استانداردهای ملی ایران- ایزو شماره ۸۰۰۰۴ و مجموعه استانداردهای ملی ایران شماره ۱۸۳۹۲، تعاریف و اصطلاحات زیر به کار می‌رود^۱.

۱-۳

نانوماده ساخته شده

manufactured nanomaterial

MNM

نانوماده‌ای که برای داشتن خواص و یا ترکیب‌بندی منتخب، به‌طور هدفمند تهیه شده است.

۱ - اصطلاحات و تعاریف به‌کاررفته در این استاندارد در وبگاه‌های www.iso.org/obp و www.electropedia.org قابل دسترسی است.

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

۲-۳

نانوچندسازه

nanocomposite

جامدی متشکل از مخلوط دو یا چند ماده که از نظر فازی جدا و دارای یک یا چند نانوفاز هستند.

یادآوری ۱- نانوفازهای گازی از نانوچندسازه مستثنی می‌شوند (نانوفازهای گازی تحت عنوان ماده نانومتخلخل مطرح می‌شوند).

یادآوری ۲- مواد با فازهای نانومقیاس که فقط با رسوبدهی تشکیل می‌شوند، مواد نانوچندسازه محسوب نمی‌شوند.

[منبع: زیربند ۳-۲ استاندارد ملی ایران شماره ۴-۱۸۳۹۲: سال ۱۳۹۴]

۳-۳

نانولوله کربنی

carbon nanotube

CNT

نانولوله‌ای که از کربن تشکیل شده است.

یادآوری - نانولوله‌های کربنی معمولا از لایه‌های گرافنی خمیده تشکیل می‌شوند که شامل نانولوله‌های کربنی تک‌دیواره و نانولوله‌های کربنی چنددیواره می‌شوند.

[منبع: زیربند ۴-۳، استاندارد ملی ایران- شماره ۳-۱۸۳۹۲: سال ۱۳۹۴]

۴-۳

نانولوله کربنی چنددیواره

multi-wall carbon nanotube

MWCNT

نانولوله کربنی که از ورقه‌های گرافنی تودرتوی هم‌مرکز یا تقریبا هم‌مرکز با فواصل بین‌لایه‌ای مشابه با گرافیت تشکیل شده است.

یادآوری - ساختار نانولوله کربنی چنددیواره معمولا به صورت تعداد زیادی نانولوله‌های کربنی تک‌دیواره که درون هم قرار گرفته‌اند، در نظر گرفته می‌شود. این ساختار برای قطرهای کوچک، استوانه‌ای شکل است اما با افزایش قطر، سطح مقطعی چندگوشه پیدا خواهد کرد.

[منبع: زیربند ۴-۶، استاندارد ملی ایران شماره ۳-۱۸۳۹۲: سال ۱۳۹۴]

۵-۳

چرخه حیات

چرخه عمر

lifecycle

مرحله‌های متوالی و به‌هم‌پیوسته 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 ۱۴۰۴۴: سال ۱۳۸۶، تغییر یافته- عبارت «چرخه حیات» به «چرخه حیات» تغییر یافته است.]

۶-۳

نانوپدید

nano-enabled

ظهور کارایی و یا عملکردی که فقط با استفاده از فناوری نانو امکان پذیر است.

[منبع: زیربند ۲-۱۵، استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۱-۸۰۰۰۴: سال ۱۳۹۵]

۷-۳

نانولوله کربنی تک دیواره

single wall carbon nanotube

SWCNT

نانولوله کربنی که از یک لایه گرافنی استوانه‌ای تشکیل شده است.

یادآوری- این ساختار را می‌توان به شکل یک ورقه گرافنی با ساختار لانه زنبوری که به صورت یک استوانه لوله شده است، مجسم کرد.

[منبع: زیربند ۴-۴، استاندارد ملی ایران شماره ۳-۱۸۳۹۲: سال ۱۳۹۴]

۸-۳

نانوبهبود

nano-enhanced

ظهور کارکرد و یا عملکردی که با استفاده از فناوری نانو شدت یا بهبود یافته است.

[منبع: زیربند ۲-۱۶، استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۱-۸۰۰۰۴: سال ۱۳۹۵]

۹-۳

نانومقیاس

مقیاس نانو

nanoscale

گستره طول بین تقریباً ۱ nm تا ۱۰۰ nm است.

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

۱۰-۳

کلوخه

agglomerate

مجموعه‌ای از ذرات که به شکلی ضعیف یا نسبتاً قوی به یکدیگر متصل شده‌اند، به طوری که مساحت سطح خارجی حاصل آن‌ها مشابه مجموع مساحت سطوح تک تک اجزای تشکیل دهنده باشد.

یادآوری ۱- نیروهایی که کلوخه را نزدیک به یکدیگر نگه می‌دارد نیروهای ضعیفی هستند، مثلاً نیروهای وان دروالس یا درهم‌تافتگی‌های فیزیکی ساده

یادآوری ۲- کلوخه‌ها به‌عنوان ذرات ثانویه نیز در نظر گرفته می‌شوند و ذرات اصلی منشا، ذرات اولیه^۱ نامیده می‌شوند.

[منبع: زیربند 1.2 استاندارد ISO 26824:2013]

۱۱-۳

گرافن اکسید

graphene oxide

GO

گرافن شیمیایی اصلاح شده، تهیه شده به وسیله اکسایش گرافیت که باعث اصلاح گسترده اکسایش سطوح پایه^۲ می‌شود.

[منبع: زیربند ۳-۱-۲-۱۳، استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۱۳-۸۰۰۰۴: سال ۱۳۹۷، تغییر یافته – «و لایه برداری» حذف شده است.]

1- Primary Particles

2- Basal Planes

افزودنی

additive

ماده‌ای که برای بهبود یا تغییر یک یا چند ذره به بسپارها اضافه می‌شود.

یادآوری - در معنای محدود، اصطلاح افزودنی فقط شامل موادی است که در مقادیر کم اضافه می‌شوند. در چنین مواردی، اصطلاح اصلاح‌کننده برای یک ماده اضافه‌شده در مقادیر نسبتاً زیاد استفاده می‌شود.

[منبع: بند 2 استاندارد ISO 472:1999]

۴ کوتاه‌نوشت‌ها

کوتاه‌نوشت	اصطلاح انگلیسی	معادل فارسی
AC	article category	رده کالا
AFM	atomic force microscopy	میکروسکوپی نیروی اتمی
AUC	analytical ultracentrifugation	فرامرکزگریزی تجزیه‌ای
CRM	certified reference material	ماده مرجع گواهی‌شده
ECHA	European Chemicals Agency	آژانس شیمیایی اروپا
EC	elemental carbon	کربن عنصری
EM	electron microscopy	میکروسکوپی الکترونی
ERC	environmental release category	رده رهایش محیط‌زیستی
ES	exposure scenario	سناریوی مواجهه
ESD	emissions scenario document	مستند سناریوی انتشارها
ICP	inductively coupled plasma	پلاسمای جفت‌شده القایی
ICP-MS	inductively coupled plasma mass spectrometry	پلاسمای جفت‌شده القایی - طیف‌سنجی جرمی / طیف‌سنجی جرمی - پلاسمای جفت‌شده القایی
ILS	inter-laboratory studies	مطالعات درون آزمایشگاهی
LCA	Lifecycle analysis	آنالیز چرخه‌حیات
LCS	lifecycle stage	مرحله چرخه‌حیات
MCE	mixed cellulose ester	سلولز استر مخلوط
NEP	nano-enabled or nano-enhanced product	محصول نانوپدید یا نانوبهبودیافته
PC	polycarbonate	پلی‌کربنات
PP	polypropylene	پلی‌پروپیلن
PROC	process category	رده فرایند

معادل فارسی	اصطلاح انگلیسی	کوتاه نوشت
پلی‌وینیل کلرید	polyvinyl chloride	PVC
ماده مرجع	reference material	RM
ماده مورد آزمون نماینده	representative test material	RTM
میکروسکوپی الکترونی روبشی	scanning electron microscopy	SEM
عمر مفید	service life	SL
بخش مورد استفاده	sector of use	SU
میکروسکوپی الکترونی عبوری	transmission electron microscopy	TEM
گرمانوری	thermal optical	TO
سامانه توصیف استفاده	use descriptor system	UDS
فرابنفش	ultraviolet	UV
طیف‌سنجی فرابنفش - مرئی	ultraviolet-visible spectroscopy	UV-VIS
تصفیه‌خانه فاضلاب	waste water treatment plants	WWTP

۵ شناخت محصولات نانوپدید

۵-۱ تحلیل مسیر برای زنجیره تامین

تمرکز این استاندارد بر رهائش MNM در مرحله استفاده از چرخه‌حیات، شامل هم استفاده مصرفی و هم تجاری است. با این حال، طراحی NEPs باید پتانسیل رهائش MNM و در نهایت مواجهه MNM را در طول چرخه‌حیات در نظر بگیرد. بنابراین، این بند به‌طور خلاصه ملاحظات مربوط به چرخه‌حیات گسترده‌تر NEP را مورد بحث قرار می‌دهد. اولین گام در شناسایی رهائش‌های بالقوه در طول چرخه‌حیات NEPs، ارائه یک تحلیل مسیر جامع در امتداد و فراتر از زنجیره ارزش آنها است. اساس این تحلیل مسیر، اطلاعات موجود در مورد محصول و فرایندهایی است که محصول در طول کل چرخه‌حیات خود از آنها عبور می‌کند. این اطلاعات ممکن است شامل ترکیب محصول (نوع و ترکیب‌بندی نانومواد و زمینه)، حجم تولید و استفاده برای هر کاربرد، دانش ساخت و سایر فرایندهای چرخه‌حیات، رخنمون^۱‌های استفاده (جزئیات بازار) و گزینه‌های دفع باشد. علاوه بر این، رهائش MNM در صنایع به شدت به اقدامات کاهش ریسک اعمال شده برای مدیریت پسماند و فرایندهای کنترل‌نشده بستگی دارد.

برآورد غلظت مواد شیمیایی رهائش‌یافته از محصولات و پایان یافتن در بخش‌های مختلف محیط‌زیست می‌تواند براساس اطلاعات ارائه‌شده در انتشارات سازمان همکاری اقتصادی و توسعه (OECD)^۲ مانند مستندات سناریوی انتشار (ESD) باشد. گروه کاری OECD در مورد توسعه‌های ارزیابی مواجهه، ESDs را به‌منظور بازتاب شرایط تولید، استفاده و غیره که بین کشورها متفاوت است، توسعه می‌دهد و بنابراین از

1- Profile

2- Organization For Economic Co-Operation And Development

وقوع تلاش‌های تکراری صنعت و کشورهای عضو جلوگیری می‌کند. ESDs به‌طور گسترده در زمینه‌های ملی و منطقه‌ای مورد استفاده قرار گرفته‌اند. به‌عنوان مثال، استاندارد راهنمای ECHA در مورد برآورد مواجهه محیطی به ESDs موجود که توسط OECD و کمیسیون اروپا توسعه یافته‌اند اشاره دارد. سایر کشورهای عضو OECD، ESDs خود را توسعه داده‌اند و US EPA چندین سناریو عمومی را برای استفاده به‌عنوان سناریوهای رهایش پیش‌فرض در ارزیابی ریسک ایجاد کرده است. یک سناریوی انتشار توسط OECD به‌عنوان مجموعه‌ای از شرایط منابع، مسیرها، فرایندهای تولید توصیف می‌کند و از الگوهایی استفاده می‌کند که میزان انتشار (یا رهایش) یک ماده شیمیایی را از تولید، فرمول‌بندی، فراوری، استفاده و بازیابی و دفع در آب، هوا و پسماندهای جامد کمی‌سنجی می‌کند. سرعت انتشار برای کمی‌سنجی رهایش استفاده می‌شود. مقادیر پیش‌فرض به‌گونه‌ای تعیین می‌شوند که با توجه به ثابت ماندن سرعت انتشار در طول زمان، یک عدد متوسط را برای کل چرخه‌حیات منعکس کند. باین‌حال، این کار در اکثر موارد قابل اجرا نیست زیرا این میزان در طول زمان برای بیشتر افزودنی‌ها کاهش می‌یابد.

علاوه‌براین، برای پشتیبانی از شناسایی کاربردها و تسهیل ارتباطات موثر بالا و پایین زنجیره تامین و همچنین کمی‌سنجی رهایش، ECHA یک توصیف استاندارد شده از کاربردها در زنجیره تامین به نام سامانه توصیفگر استفاده ایجاد کرده است. سامانه توصیف استفاده براساس شش توصیفگر جداگانه است: مرحله چرخه‌حیات، بخش استفاده، رده فرآیند، رده محصول، رده کالا و ERC. چهار مرحله اساسی در چرخه‌حیات یک ماده وجود دارد که می‌توان به آنها یک استفاده اختصاص داد: ساخت، فرمول‌بندی یا بسته‌بندی مجدد، استفاده نهایی (استفاده در محل‌های صنعتی، استفاده حرفه‌ای و مصرف) و عمر مفید (کالا). با استفاده از این توصیفگرها می‌توان شرح مختصری از کاربرد(های) محصول را به‌دست آورد.

- **مرحله چرخه‌حیات:** مرحله شیمیایی / نانومواد را در چرخه‌حیات آن منعکس می‌کند. ساختار آن به‌گونه‌ای است که نشان‌دهنده نوع سازمان‌هایی است که از مواد شیمیایی (یا نانومواد) پس از ساخت آن استفاده می‌کنند (به‌عنوان مثال فرمول‌سازان، کاربران نهایی صنعتی).

- **بخش استفاده:** توضیح می‌دهد که ماده (نانوماده) در کدام بخش یا منطقه بازار استفاده می‌شود.

مثال ۱- SU4: ساخت منسوجات، چرم، خز؛ SU11: ساخت محصولات لاستیکی.

- **رده فرایند:** روش‌های کاربردی یا انواع فرایند تعریف شده از دیدگاه شغلی را توصیف می‌کند، PROC، در تلفیق با شرایط عملیاتی و اقدامات مدیریت ریسک، تعیین‌کننده اصلی سطح مواجهه شغلی است. این توصیفگر برای استفاده کارگر، مورد نیاز است.

مثال ۲ - PROC1: تولید در فرایند بسته بدون احتمال مواجهه یا فرایندهایی با شرایط محدودکننده معادل. PROC5: آمیختن یا مخلوط کردن در فرایندهای دسته‌ای. PROC7: پاشش^۱ صنعتی.

- رده محصول شیمیایی: انواع محصولاتی را که در آنها از ماده/نانوماده استفاده می‌شود، توصیف می‌کند. رده محصول شیمیایی در ترکیب با شرایط عملیاتی و اقدامات مدیریت ریسک در بیشتر مواقع سطح مواجهه مصرف‌کنندگان را تعیین می‌کند. این توصیفگر برای استفاده مصرف‌کننده الزامی است.

مثال ۳ - رده محصول شیمیایی PC9a: پوشش‌ها و رنگ‌ها، تینرها، پاک‌کننده‌های رنگ، رده محصول شیمیایی PC24: روان‌کننده‌ها، گریس‌ها، محصولات رهایش. رده محصول شیمیایی PC31: براق‌کننده‌ها و مخلوط‌های مومی.

- رده کالا (AC): نوع کالایی را که در آن ماده/نانوماده فراوری شده است، توصیف می‌کند. AC فقط به مرحله عمر مفید چرخه‌حیات مربوط است و استفاده می‌شود.

مثال ۴ - رده کالای AC2b: سایر ماشین‌آلات، لوازم مکانیکی، کالاهای الکتریکی / الکترونیکی. رده کالای AC8e: کالاهای کاغذی: مبلمان و اثاثیه. رده کالای AC13a: کالاهای پلاستیکی: کالاهای با مساحت سطح بزرگ.

- رده رهایش محیط‌زیستی (ERC): شرایط گسترده استفاده را از دیدگاه محیط‌زیستی، براساس مشخصه‌هایی که اولین نشانه از رهایش بالقوه ماده در محیط‌زیست را نشان می‌دهد، توصیف می‌کند. پیش‌فرض انتخاب تنها یک ERC در هر استفاده است.

مثال ۵ - رده رهایش محیط‌زیستی ERC2: فرموله کردن مخلوط. رده رهایش محیط‌زیستی ERC6a: استفاده از حواسط. رده رهایش محیط‌زیستی ERC8a: استفاده گسترده از کمک فراوری غیرواکنشی (بدون افزودن^۲ در یا روی کالا، داخل ساختمان).

جدول ۱، مثالی از UDS برای نانوچندسازه‌های بسیاری را ارائه می‌دهد. سناریوها برای هر مرحله چرخه‌حیات همراه با شرح مختصری از فرایندها و فعالیت‌های مربوطه فهرست شده است. سپس جدول فرایند، محصول، کالا و رده‌های رهایش محیط‌زیستی را شناسایی می‌کند تا یک نمای کلی از استفاده در سراسر زنجیره تامین ارائه دهد.

1- Spraying
2- Inclusion

جدول ۱ - مثالی از سامانه توصیفگر استفاده ECHA از CNT در نانوچندسازه‌های بسیاری

ERC	AC	رده محصول	SU	PROC	توصیف کوتاهی از فرایند یا فعالیت	ES	LCS
ERC1 ساخت ماده	-	-	-	PROC1	سنتز	تولید / سنتز با CNT استفاده از «نهشت شیمیایی بخار» ^۱	CNT سنتز LCS1
				PROC2	بازیابی		
				PROC9	بسته‌بندی		
				PROC8b	جابه‌جایی داخلی		
				PROC8b	تمیز کردن و نگهداری		
				PROC8b	انبارش و توزیع		
ERC1 ساخت ماده	-	-	-	PROC1	سنتز	تولید / سنتز با CNT استفاده از جرقه بخار ^۲	CNT سنتز LCS1
				PROC2	بازیابی		
				PROC9	بسته‌بندی		
				PROC8b	انتقال داخلی		
				PROC8b	تمیز کردن و نگهداری		
				PROC8b	انبارش و توزیع		
ERC1 ساخت ماده	-	-	-	PROC1	سنتز	تولید / سنتز با CNT استفاده از برسایش ^۳ لیزر	CNT سنتز LCS1
				PROC2	بازیابی		
				PROC9	بسته‌بندی		
				PROC8b	جابه‌جایی داخلی		
				PROC8b	تمیز کردن و نگهداری		
				PROC8b	انبارش و توزیع		
ERC1 تولید مواد	-	-	SU12 تولید محصولات پلاستیکی، از جمله آمیزه‌سازی ^۶ و تبدیل	PROC5	وزن کردن، مخلوط کردن، بارگذاری	ساخت موادچندسازه میانی حاوی CNTs	کنجاندن CNT در محصولات LCS2
				PROC14	روزن‌رانی ^۴ و گرانول‌سازی ^۵		
				PROC21	بسته‌بندی		
				PROC21	جابه‌جایی داخلی		
				PROC8b	تمیز کردن و نگهداری		
				PROC21	انبارش و توزیع		

جدول ۱- (ادامه)

ERC	AC	رده محصول	SU	PROC	توصیف کوتاهی از فرایند یا فعالیت	ES	LCS
ERC1 تولید مواد	AC13 کالاهای پلاستیکی	PC32 آماده‌سازی بسیار و ترکیبات	SU12 تولید محصولات پلاستیکی، از جمله آمیزه‌سازی و تبدیل	PROC5	وزن کردن، مخلوط کردن، بارگذاری	ساخت محصولات جامد با مواد چندسازه حاوی CNTs	CNT ساخت محصولات حاوی LCS3
				PROC14	روزن رانی، قالب‌گیری ^۶ و فرم‌دهی ^۷		
				PROC24	شکل‌دهی ^۸ و پرداخت کاری ^۹		
				PROC8b	تمیز کردن و نگهداری		
				PROC21	انبارش و توزیع		
ERC11 استفاده a گسترده از کالاهای با رهایش کم (داخلی)	-	PC32 آماده‌سازی بسیار و ترکیبات	-	PROC24	بریدن، شکل‌دهی، سوراخ کاری ^{۱۰} ، سنباده‌زنی ^{۱۱}	استفاده تخصصی (عمر مفید) از مواد چندسازه جامد حاوی CNT	LCS4 استفاده و عمر مفید
ERC12 فرایند a مواد در محل‌های صنعتی با رهایش اندک	-	PC32 آماده‌سازی بسیار و ترکیبات	-	PROC21	مرتب‌سازی (جداسازی مکانیکی، الکترومغناطیسی و دستی)	بازیافت و دفع کالاهای حاوی CNT	LCS5 بازیافت و پایان عمر
				PROC24	فراوری (فرایندهای مکانیکی و گرمایی)		
				PROC21	خاک‌چال ^{۱۲}		
				PROC2	زباله‌سوزی ^{۱۳}		

¹ Chemical Vapour Deposition

² Arc-Vapour

³ Ablation

⁴ Extrusion

⁵ Granulation

⁶ Moulding

⁷ Forming

⁸ Shaping

⁹ Finishing

¹⁰ Drilling

¹¹ Sanding

¹² Landfill

¹³ Incineration

توصیف‌گرها برای همه این رده‌ها براساس مقررات ثبت، ارزشیابی، مجوز و محدودیت مواد شیمیایی (REACH)^۱ در اروپا برای ارزیابی ایمنی مواد شیمیایی (از جمله نانومواد) و استفاده از آنها درخواست می‌شوند. اطلاعات حاصل از این ارزیابی در گزارش ایمنی شیمیایی (CSR)^۲ منتشرشده توسط REACH خلاصه شده است. یکی از اجزای کلیدی این CSR، ES است که در آن تولیدکنندگان یا واردکنندگان شرایط استفاده ایمن از ماده خود را تعیین می‌کنند. این اطلاعات برای بسیاری از فعالان زنجیره تامین مواد شیمیایی در سروکارداشتن روزبه‌روز با مواد (از جمله نانومواد) ضروری است. برای شناسایی ESs مرتبط با یک محصول نانوپدید، تولید نقشه‌های مفهومی چرخه‌حیات محصول پیشنهاد می‌شود (به نمودار کلی در شکل ۱ مراجعه شود). این نمودار مرحله‌های چرخه‌حیات یک محصول را با سناریوهای بالقوه مواجهه/رهایش (به‌عنوان فعالیت‌هایی که رهایش از آنها بسیار محتمل است تعریف می‌شود)، گیرنده‌ها (انسان، آب، خاک، هوا، زیواگان)^۳ (موجودات زنده) و بخش‌های فناورانه (تصفیه‌خانه‌های فاضلاب، زباله‌سوزها، محل‌های خاک‌چال) مرتبط می‌کند. پنج مرحله چرخه‌حیات عبارتند از:

الف - سنتز MNM؛

ب - گنجاندن MNM در محصول (تولید محصول نانوپدید)؛

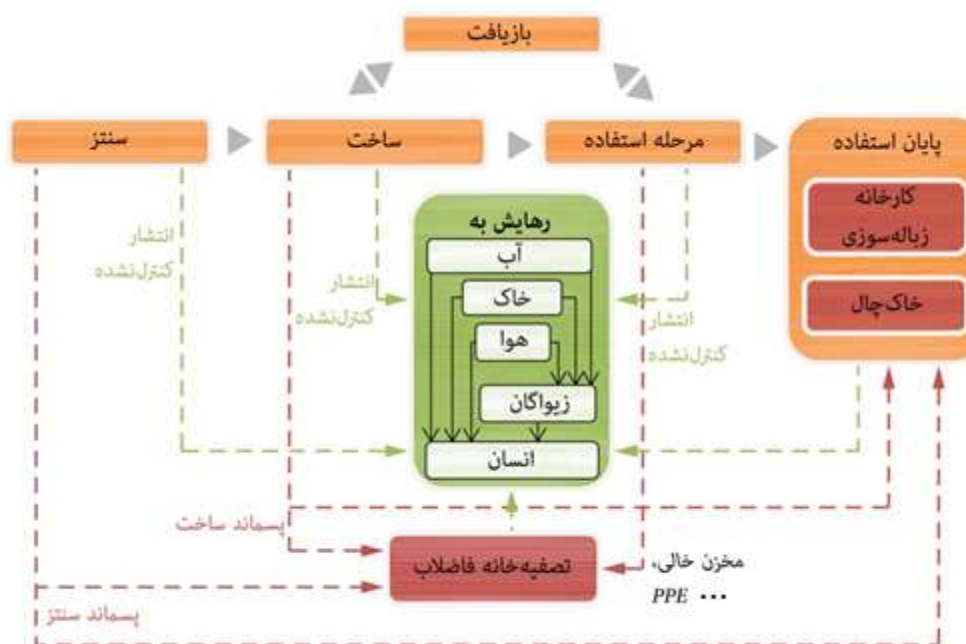
پ - ساخت محصولات حاوی MNM؛

ت - مرحله استفاده و عمر مفید و

ث - بازیافت و پایان عمر.

شرح کامل چرخه‌حیات، به‌ویژه سناریوهای استفاده بالقوه می‌تواند به تمرکز آزمون رهایش روی شرایطی که به‌طور بالقوه مربوط به محصول هستند کمک کند. در طول مرحله استفاده، رهایش عمدی و غیرعمدی MNM ممکن است رخ دهد. رهایش ناخواسته MNM معمولاً از منابع غیرنقطه‌ای مانند ضدآفتاب‌های شسته‌شده در آب اقیانوس یا رهایش از سایر محصولات مصرفی ناشی می‌شود، درحالی‌که رهایش موردنظر از منابع نقطه‌ای مانند WWTP که از MNM برای اصلاح آب‌های زیرزمینی استفاده می‌کند، منتج می‌شود. در شکل ۱، پیکان‌های سبز رهایش به محیط را نشان می‌دهد (به‌طور کلی کنترل‌نشده) و احتمالاً منجر به مواجهه انسان (کارگران و مصرف‌کنندگان) و پیکان‌های قرمز نشان‌دهنده MNM است. مسیرهای رهایش که به مدیریت زباله یا عملیات‌های پایان عمر ختم می‌شود.

1- Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals
2- Chemical Safety Report
3- Biota



شکل ۱- چرخه حیات محصول نانوپدید

۲-۵ تاثیر مشخصه‌های زمینه و MNM بر میزان و شکل رهایش

۱-۲-۵ کلیات

تغییرات در مواد زمینه و انواع MNM و ترکیب‌بندی نانوچندسازه‌ها می‌تواند بر احتمال رهایش نانومواد، شکل رهایش (به‌عنوان مثال ذرات حاوی پرکننده، فاقد پرکننده، پرکننده با غلظت کم) و به‌طور کلی شدت رهایش مواد، به نوبه خود می‌تواند بر انتخاب روش اندازه‌گیری تأثیر بگذارد [2]. درک خواص فیزیکی و شیمیایی مواد زمینه بسیاری خالص^۱، افزودنی MNM و مواد چندسازه در درک رفتار رهایش نانوچندسازه‌ها در موارد استفاده از آنها مهم است. مواجهه بالقوه، اغلب کاربرد-ویژه^۲ است و به‌شدت به خواص فیزیکی و شیمیایی MNM، شیوه گنجاندن MNM در محصول و نحوه استفاده از محصول بستگی دارد. در زیربند ۲-۵ به‌طور خلاصه جنبه‌های کلیدی خواص فیزیکی و شیمیایی و سایر مشخصه‌های کلیدی زمینه‌های اصلی و افزودنی‌های MNM مربوط به نانوچندسازه‌ها برای کمک به ارزشیابی چارچوب اثر تفاوت‌های زمینه MNM- بر مشخصه‌های رهایش MNM در بند ۶ و نیاز به روش‌های نمونه‌برداری و اندازه‌گیری خاص در بند ۷، بررسی می‌شود.

موضوعات کلیدی مورد بحث عبارت‌اند از:

1- Neat
2- Application-Specific

- رهایش MNM در طول چرخه حیات؛
- توصیفگرهای استاندارد شده استفاده از NEP، تعیین کمیت رهایش؛
- عوامل مؤثر بر رهایش MNM:
- نوع MNM؛
- ساختار/ترکیب بندی زمینه؛
- استفاده از محصول.

۵-۲-۲ ملاحظات بسیار مورد استفاده در چندسازه

۵-۲-۲-۱ کلیات

برای ساخت NEPs صنعتی و مصرفی، MNM معمولاً در یک زمینه ادغام می‌شود. این زمینه اغلب یک پلاستیک طراحی شده، یعنی یک ماده سنتزی ساخته شده از طیف وسیعی از بسپارهای آلی است. پلاستیک‌ها به طور گسترده به عنوان بسپارهای گرماسخت^۱ یا گرمانرم^۲ طبقه بندی می‌شوند. این طبقه بندی نشان دهنده چکش پذیری^۳ و انعطاف پذیری پس از تولید است. بسپارهای گرماسخت از طریق پخت به عنوان مثال، حرارت به طور برگشتناپذیری سخت می‌شوند. بسپارهای گرمانرم در دمای بالای خاصی قابل انحنای^۴ یا قالب پذیر^۵ هستند و پس از سرد شدن جامد می‌شوند. خواص گرمایی به ساختار شیمیایی و واحدهای مولکولی که زنجیره های بسپاری و استخوان بندی^۶ را تشکیل می‌دهند بستگی دارد. بسپارهای گرماسخت اغلب رزین‌ها و لاستیک‌های تشکیل دهنده پیوند عرضی^۷ (دورومر^۸) هستند. درک تفاوت‌های عملکردی می‌تواند به تصمیم‌گیری بهتر برای منبع‌یابی و بهبود طراحی محصول کمک کند.

۵-۲-۲-۲ بسپارهای گرماسخت

بسپارهای گرماسخت از زنجیره های بسپاری ساخته می‌شوند که حین فرایند پخت به یکدیگر پیوند عرضی می‌دهند و یک پیوند شیمیایی دائمی تشکیل می‌دهند. پیوند عرضی که حین فرایند پخت ایجاد می‌شود از حرکت زنجیره های بسپاری مجزا پس از پخت جلوگیری می‌کند. به همین دلیل، پس از پخت، ساختار بسپارهای گرماسخت را نمی‌توان تغییر داد. این فرایند از ذوب مجدد محصول در زمان اعمال حرارت جلوگیری کرده و گرماسخت‌ها را برای کاربردهای با حرارت بالا مانند لوازم خانگی و الکترونیک ایده آل

1- Thermoset
2- Thermoplastic
3- Malleability
4- Pliable
5- Moldable
6- Backbone
7- Crosslinked
8- Duromers

می‌کند. بسپارهای گرماسخت می‌توانند خواص مکانیکی مواد را تا حد زیادی بهبود بخشند و مقاومت شیمیایی، مقاومت حرارتی و یکپارچگی ساختاری را افزایش دهند. بسپارهای گرماسخت به دلیل مقاومت در برابر تغییر شکل اغلب برای محصولات درزبندی شده استفاده می‌شوند و از جمله مقاوم‌ترین پلاستیک‌های موجود در برابر ضربه هستند. خواص بسپارهای گرماسخت عبارتند از:

- مقاومت عالی در برابر حلال‌ها و مواد خوردنده؛

- مقاومت در برابر دماهای بالا؛

- استحکام خستگی^۱ بالا؛

- کشسانی درخور^۲؛

- چسبندگی^۳ عالی؛

- پرداخت عالی (به‌عنوان مثال جلا دادن، نقاشی).

بسپارهای گرماسخت متداول (و کاربردها) شامل پلی‌استر^۴ (منسوجات، چاپ سه‌بعدی)، وینیل استر^۵ (کشتی‌ها، هواپیما)، اپوکسی (چسب‌ها)، فنولیک‌ها (قطعات الکتریکی، لمینت‌های خانگی) و اورتان^۶ (فوم‌های عایق، پای‌پوش^۷) هستند. رایج‌ترین بسپارهای گرماسخت که امروزه مورد استفاده قرار می‌گیرد رزین پلی‌استر است و به دنبال آن وینیل استر و اپوکسی قرار دارند.

۵-۲-۳ بسپارهای گرمانرم

گرمانرم یک ماده یا پلاستیک بسپاری است که در صورت حرارت دادن نرم و فرم‌پذیر و در صورت سرد شدن سفت می‌شود. این فرایند را می‌توان چندین بار بدون تغییر شیمیایی مواد تکرار کرد. مواد گرمانرم مزایای عملکردی زیادی مانند استحکام بالا، خم‌پذیری آسان و مقاومت در برابر جمع‌شدگی^۸ دارند. بسپارهای گرمانرم می‌توانند کاربردهای کم‌تنش مانند کیسه‌های پلاستیکی را داشته باشند، اما بسته به نوع ماده گرمانرم، در قطعات مکانیکی با تنش بالا نیز استفاده می‌شوند. مواد گرمانرم بسیار قابل بازیافت هستند و پرداخت‌های با زیباشناسی برتر، مقاومت در برابر ضربه، قابلیت‌های قالب‌گیری/شکل‌گیری مجدد، مقاومت شیمیایی، سطح بلورین سخت یا لاستیکی و ساخت دوستدار محیط زیست را ارائه می‌دهند.

1- Fatigue
2- Tailored Elasticity
3- Adhesion
4- Polyester
5- Vinyl Ester
6- Urethane
7- Footwear
8- Shrink Resistant

مثال‌هایی از بسپارهای گرمانرم رایج که امروزه استفاده می‌شوند و محصولات مصرفی معمولی که از آنها ساخته می‌شوند عبارتند از پلی‌اتیلن ترفتالات (PET)^۱ (بطری‌های آب و نوشابه)، پلی‌پروپیلن (PP) (ظروف بسته‌بندی، قطعات خودرو)، پلی‌کربنات (PC) (شیشه جلو خودرو، لنزهای شیشه‌ای ایمنی)، پلی‌بوتیلن ترفتالات (PBT)^۲ (قطعات پلاستیکی عمومی، از جمله اسباب‌بازی‌های کودکان)، پلی‌اتیلن (PE)^۳ (بسته‌بندی، کیسه‌های مواد غذایی)، پلی‌وینیل کربنات (PVC) (لوله‌کشی، قاب پنجره)، پلی‌اتیلن‌ایمین (PEI)^۴ (دسته‌های هواپیما) و پلی‌آمید (PA) (پای‌پوش، تورهای ماهیگیری، چاپ سه‌بعدی). جدول ۲ ویژگی‌های کلیدی بسپارهای گرمانرم و گرماسخت را خلاصه می‌کند.

جدول ۲ - مقایسه ویژگی‌های مهم بسپارهای گرمانرم و گرماسخت

بسپارهای گرمانرم	بسپارهای گرماسخت
سنتز با بسپار افزایشی	سنتز با بسپار تراکمی
تکپار ^۱ دو عاملی	تکپار سه، چهار یا چند عاملی
بسپار خطی با زنجیره بلند با پیوندهای عرضی ناچیز	ساختار شبکه سه‌بعدی با تعدادی پیوند عرضی
وزن مولکولی پایین	وزن مولکولی بالا
نرم، ضعیف و ترد ^۲	سخت، قوی و بسیار ترد
نقطه ذوب پایین و استحکام کششی کم	نقطه ذوب بالا و استحکام کششی زیاد

¹ Monomer
² Brittle

۵-۲-۳ تخریب بسپار

تمام بسپارها در طول عمر مفید دچار تخریب می‌شوند. نتیجه، کاهش مداوم خواص مکانیکی آنها ناشی از تغییرات در وزن مولکولی، توزیع وزن مولکولی و ترکیب‌بندی بسپار خواهد بود. سایر تغییرات احتمالی عبارتند از: تُرد شدن (سخت شدن زنجیره)، نرمی (بریدگی زنجیره)، تغییر رنگ و ترک‌خوردگی^۵ و سوختن ناقص^۶ (افت جرم). عوامل ایجاد تخریب بسپار شامل حرارت، انرژی مکانیکی، تابش، آزون، حلال‌ها، اسیدها و بازها است.

به‌طور کلی، مقاومت در برابر تخریب به ترکیب‌بندی شیمیایی بسپار بستگی دارد. به‌عنوان مثال، بسپارهایی مانند PP، PVC و پلی‌بوتادیان (PBD)^۷ در برابر تخریب گرمایی، حتی در دمای معمولی، بسیار آسیب‌پذیر^۸

- 1- Polyethylene Terephthalate
- 2- Polybutylene terephthalate
- 3- Polyethylene
- 4- Polyethylenimine
- 5- Cracking
- 6- Charring
- 7- Polybutadiene
- 8- Susceptible

هستند و تنها زمانی می‌توان از تخریب آنها جلوگیری کرد که با پایدارسازهای UV و پاداکسنده‌ها (آنتی اکسیدان‌ها) فرمول‌سازی شوند؛ درحالی‌که بسپارهایی مانند پلی‌سولفون (PSU)^۱، پلی‌اتر سولفون (PES)^۲، پلی‌اتر اترکتون (PEEK)^۳ و پلی‌سیلوکسان‌ها^۴ (سیلیکون‌ها) به دلیل پیوندهای قوی در استخوان‌بندی زنجیره بلند و در گروه‌های جانبی، مقاومت بسیار خوبی در برابر تخریب گرمایی و اکسایشی دارند. انرژی اعمال شده حین فراوری [تنش‌های مکانیکی، خردایش^۵، پرتو فرابنفش (UV)] می‌تواند باعث شکستگی پیوندها شود. انرژی تفکیک برای پیوندهای شیمیایی مختلف در یک ساختار بسپاری از ۶۵ kCal/mol تا ۱۱۰ kCal/mol متغیر است. این عوامل می‌توانند به دلیل بریدگی زنجیر (در اثر آب‌کافت)، پیوند عرضی، اکسایش یا سایر واکنش‌های شیمیایی باعث تخریب بسپار شوند. اکسایش می‌تواند منجر به تخریب نظم بلوری شود. مواد تشکیل‌دهنده، افزودنی‌ها یا آلاینده‌ها می‌توانند تحت تشکیل رادیکال قرار گیرند که سپس به بسپار حمله می‌کند. با این حال، پایدارسازها برای مقابله با انواع مختلف فرایندهای تخریب (مانند پاداکسنده‌ها، پایدارسازهای نور، پایدارسازهای حرارت، پادآزون‌ها^۶) استفاده می‌شوند.

علاوه‌براین، برخی از خواص بسپار می‌تواند فرایندهای اکسایش را تسهیل کند: به‌عنوان مثال، درجه بلورینگی کم، بسپارهای با وزن مولکولی کم، شاخه‌ای شدن بیشتر، وجود پیوندهای دوگانه در ساختار شیمیایی و وجود مواد افزودنی منجر به رادیکال‌های آزاد.

۵-۲-۴ ملاحظات MNM مورد استفاده در چندسازه

افزودنی‌های MNM مورد استفاده در چندسازه‌ها را می‌توان براساس ترکیب‌بندی و هندسه آنها طبقه‌بندی کرد. ترکیب‌بندی اصلی می‌تواند آلی (مانند درخت‌سان‌ها^۷، بسپارها)، معدنی (مانند فلزات، اکسیدهای فلزی، هیدروکسیدهای فلزی)، کربن (مانند نانولوله‌های کربنی، توپ‌های باکی^۸) یا تلفیقی از این مواد باشد. حتی می‌توان سامانه‌های پیچیده‌تری را با عامل‌دار کردن سطح تولید کرد.

انتخاب MNM در تولید نانوچندسازه‌ها به خواص مورد نظر برای کاربرد خاص بستگی دارد. خواص گرمایی، مکانیکی، الکتریکی، مغناطیسی و نوری خاص را می‌توان با افزودن MNMs مختلف در یک زمینه بسپاری به‌دست آورد یا افزایش داد. آماده‌سازی نانوچندسازه‌های بسپاری MNM ممکن است شامل اصلاح سطح MNM باشد، زیرا ایجاد برهم‌کنش‌های قوی بین MNM و بسپار برای افزایش ویژگی‌های ساختاری و بهینه‌سازی پراکندگی پایدار MNM در نانوچندسازه مهم است. مطالعات زیادی در مورد بهینه‌سازی پراکنه^۹

-
- 1- Polysulfone
 - 2- Polyethersulfone
 - 3- Polyether Ether Ketone
 - 4- Polysiloxanes
 - 5- Grinding
 - 6- Antiozonants
 - 7- Dendrimers
 - 8- Buckyball
 - 9- Dispersion

مواد افزودنی MNM در زمینه بسیاری انجام شده است. افزایش آب‌گریزی افزودنی‌های MNM از طریق اصلاح سطح، افزایش چسبندگی سطحی با درهم‌تنیدگی زنجیره‌ای یا پیوند شیمیایی امکان‌پذیر است.

افزودنی بالقوه MNMs شامل مواد بر پایه کربن، اکسیدهای فلزی و فلزات است. خواص چندسازه‌ها با گنجاندن این افزودنی‌های مختلف نانویی به‌طور خلاصه شرح داده شده است.

یکی از متداول‌ترین افزودنی MNM مبتنی بر کربن، CNTs هستند. ماهیت چینش اتمی و پیوند در CNTs این مواد را با خواص مکانیکی استثنایی (استحکام کششی، مدول کشسانی^۱ و سختی)، هدایت گرمایی بسیار خوب و خواص الکتریکی وابسته به ساختار (فلزی تا نیم‌رسانا) ارائه می‌دهد. این خواص همراه با چگالی کم و نسبت منظرهای^۲ بزرگ، CNTs را برای بسیاری از کاربردها جذاب می‌کند [3]. علاوه‌براین، گنجاندن گرافن یا گرافن اکسید در نانوحندسازه‌های بسیاری منجر به بهبود قابل‌توجهی نه تنها در فعالیت‌های مکانیکی، حرارتی و الکتریکی [4]، بلکه در رسانندگی‌ها و خواص سدکنندگی گاز^۳ در مقایسه با بسپار خالص [5] نیز می‌شود.

گستره وسیعی از MNM مبتنی بر اکسید فلزی خواص جالبی را ارائه می‌دهند: نانوس‌ها مزایای متعددی دارند، آنها را می‌توان از مواد نسبتاً ارزان (رس) به‌دست آورد. علاوه‌براین، ریخت‌شناسی مسطح آن‌ها دستیابی به پراکنه خوب در زمینه‌های بسیاری را بسیار آسان‌تر می‌کند [6] و بنابراین، خواص متعددی (بازدارندگی شعله، پاد خوردگی، سدکنندگی گاز، افزایش سفتی^۴ و دمای واپیچی حرارتی^۵) را فراهم می‌کند [7]، [8]. افزودن SiO₂ بی‌شکل به زمینه‌های بسیاری خاص منجر به بهبود خواص مکانیکی (افزایش کشش، ضربه و استحکام) و همچنین شواهدی از خواص بازدارنده شعله شده است [9] و [10]. روی اکسید (ZnO) ماده مورد توجهی است که به دلیل خواص ضدباکتریایی خود به زمینه‌های بسیاری وارد می‌شود [11] و [12] و همچنین در کاربردهایی مانند بسته‌بندی مواد غذایی [13] برای بهبود نگهداری مواد غذایی در انبار و در برخی شرایط (به‌طور فعال تشکیل پیوندهای هیدروژنی می‌دهد) استفاده می‌شود، می‌تواند خواص مکانیکی چندسازه را بهبود بخشد [12]. نانوذرات TiO₂ (هردوی آناتاز^۶ و چندریختی‌های روتیل^۷) که به‌خوبی برای فعالیت کاتالیزگری (کنش‌یاری) نوری آنها شناخته‌شده‌اند، [14]، [15] نیز معمولاً در زمینه‌های بسیاری گنجانده می‌شوند و باعث افزایش جذب UV به نانوحندسازه می‌شوند که برای کاربردهای متعدد مفید است. گنجاندن نانوذرات TiO₂ در برخی از بسپارها منجر به افزایش مدول کشسانی، دمای تجزیه، پایداری ابعاد، تنش خمشی، تنش ضربه و ازدیاد طول تا پارگی^۸ می‌شود [16]، [17].

-
- 1- Elastic modulus
 - 2- Aspect Ratio
 - 3- Gas Barrier
 - 4- Stiffness
 - 5- Heat distortion temperature
 - 6- Anatase
 - 7- Rutile polymorphs
 - 8- Elongation Break

در نهایت، با توجه به گنجاندن MNM مبتنی بر فلز، نقره (Ag) به دلیل خواص منحصر به فرد الکتریکی، نوری، کاتالیزگری و به ویژه ضد میکروبی آن یکی از جالبترین افزودنی‌های MNM است [18]. به همین دلیل، گنجاندن آن در بسپارها به طور گسترده مورد مطالعه و آزمون قرار گرفته است [19]. زمانی که با بسپارها تلفیق شود، اگر به درستی پراکنده و طراحی شود، نانوچندسازه حاصل با خواص ضدباکتریایی که برای بسیاری از کاربردها (مثلاً در حوزه افزاره‌های پزشکی) مفید هستند، به دست می‌آید [18].

انتخاب MNM برای استفاده در نانوچندسازه و آماده‌سازی MNM نانوچندسازه ممکن است بر نمونه‌برداری رهایش، آماده‌سازی نمونه و نیازهای آنالیزی که در بندهای ۶ و ۷ بحث شده است، تأثیر بگذارد.

۵-۲-۵ نانوچندسازه‌های بسپاری

توسعه علمی و فناوری در سال‌های اخیر امکان گنجاندن ترکیبات نانومقیاس مختلف (مانند نانولوله‌های کربنی، نانوذرات اکسید فلزی، نانورس‌ها) در زمینه‌های بسپاری را فراهم کرده است. گنجاندن این مواد افزودنی می‌تواند برخی از خواص زمینه را تغییر دهد، زیرا نسبت سطح به حجم نانومواد در مقایسه با افزودنی‌های ریزمقیاس یا درشت‌مقیاس بزرگ است. پراکنه یک MNM در زمینه بسپاری می‌تواند خواص فیزیکی جدید و رفتارهای نوینی را در مقایسه با زمینه‌های اصلی معرفی کند و به طور موثر ماهیت زمینه اصلی را تغییر دهد. این مورد می‌تواند برای تولید مواد پیشرفته با خواص بهبودیافته یا کاربردهای جدید یا هر دو، مورد استفاده قرار گیرد [20]. این خواص و کاربردها از نظر چگونگی تأثیر بر نیازهای اندازه‌گیری رهایش مهم هستند. به عنوان مثال، تایرهای لاستیکی نانوچندسازه با استفاده روزمره، بیش از یک مگا تن در سال کربن سیاه و سیلیس در گستره نانومقیاس تولید می‌کنند. با این حال، تخریب آج تایر نانوچندسازه لاستیکی حین استفاده، نمونه بارز چالش اندازه‌گیری رهایش MNM در مرحله استفاده چرخه‌حیات است [21]. علاوه بر این، نوآوری‌های عمده ممکن است به زودی باعث رشد سریع افزودنی‌های سیلیکا «بسیار پراکنه‌پذیر» (HD)^۲ شوند که جایگزین کربن سیاه شوند و بنابراین روش‌های استاندارد برای اندازه‌گیری رهایش MNM باید با تغییر خواص تایرها مطابق با پیشرفت نوآوری‌ها سازگار شوند. استفاده از MNM در تایرها نیز غیرمعمول است زیرا نشان‌دهنده یک نانوچندسازه با محتوای پرکننده بسیار بالا (بالای ۴۰٪ وزنی) است، در حالی که محتوای افزودنی بیشتر نانوچندسازه‌های دیگر در گستره ۱٪ تا ۵٪ است.

محصولاتی که حاوی MWCNTs هستند از چندسازه ساخته شده از MWCNTs گنجانده شده در یک زمینه بسپاری تولید می‌شوند. پنج بسپار که از نظر تجاری مرتبط هستند و گستره‌ای از مشخصه‌های بسپاری را نشان می‌دهند عبارتند از: اپوکسی (EP)^۳، PA، پلی‌اورتان^۴ (PU)، PE و PC (همچنین به جدول ۲ مراجعه شود). چندسازه‌های مورد استفاده برای محصولات نهایی معمولاً فرمول‌بندی بسپار و افزودنی‌هایی هستند که

1- Device
2- Highly Dispersible
3- Epoxy
4- Polyurethane

برای اصلاح مشخصه‌های فیزیکی و شیمیایی بسیار به ویژه خواص مکانیکی آن (استحکام، چقرمگی^۱ و مقاومت فرسایشی^۲) و مقاومت شیمیایی و گرمایی در برابر تخریب طراحی شده‌اند.

توسعه سایر نانوجندسازهای بسیاری، یک ناحیه رو به رشد در تمام بخش‌های صنعتی است. در طول دهه گذشته، این ترکیبات پرشده از MNM به دلیل تنوع برجسته خواص خود که تنها با مقدار کمی از افزودنی‌های MNM ایجاد می‌شوند، توجه بسیاری را هم در دانشگاه و هم در صنعت به خود جلب کرده‌اند. مثال‌ها عبارتند از خواص مکانیکی (به‌عنوان مثال سفتی کشسانی^۳ و استحکام) [22]، [23]، فیزیکی (به‌عنوان مثال مقاومت در برابر مانع، بازدارندگی شعله یا مقاومت در برابر خراش) [7]، الکتریکی، [24] مغناطیسی، [25] گرمایی و نوری. این نانوجندسازهای جدید کاربری‌های جالبی را در بیشتر بخش‌های صنعتی با رواج کاربرد بالا به‌ویژه در بخش‌های الکترونیک، خودرو، نساجی و معدن ممکن می‌سازند.

نانوجندسازهای بسیاری نه تنها فضای عملکرد بسپارهای پرشده مرسوم را گسترش می‌دهند، بلکه تلفیق‌های کاملاً جدیدی از خواص را معرفی می‌کنند و بنابراین کاربردهای جدیدی برای پلاستیک‌ها امکان‌پذیر می‌سازند [26] و [27]. افزودن حجم کم نانوذرات (% ۱ تا % ۵) مانند سیلیکات‌های لایه‌ای یا نانولوله‌های کربنی، خواص را بهبود می‌بخشند (با توجه به رزین خالص) که با بارگذاری‌های معمولی (% ۱۵ تا % ۴۰) پرکننده‌های مرسوم قابل مقایسه است. بارگذاری کمتر فراوری را تسهیل می‌کند و وزن جزء مورد نظر را کاهش می‌دهد. مهم‌تر از همه، خواص منحصربه‌فرد اضافه‌شده مانند کاهش نفوذپذیری، شفافیت نوری، خودروبینگی^۴ و افزایش مقاومت در برابر اکسایش و برسایش، به‌طور معمول با افزودنی‌های مرسوم امکان‌پذیر نیست. این مشخصه‌ها به موفقیت‌های تجاری متعددی از جمله قطعات خودرو، پوشش‌ها و بازدارنده‌های شعله تبدیل شده‌اند.

۵-۲-۶ حوزه‌های کاربردی و استفاده از فرایندهای فاز (یا چرخه‌حیات)

کاربر نهایی ممکن است به‌طور خواسته یا ناخواسته در مواجهه MNMs در نتیجه استفاده از NEP قرار گیرد. حین استفاده متداول از محصولات، کاربر نهایی می‌تواند در مواجهه شرایط مختلف قابل کنترل و غیرقابل کنترلی قرار گیرد که ممکن است پتانسیل رهایش و استحاله MNMs را افزایش دهد. MNMs رهایش‌یافته اغلب از نظر اندازه و حالت کلوخگی و انبوهگی با مواد اصلی اولیه متفاوت هستند و می‌توانند به‌عنوان MNM آزاد یا همراه با تکه‌هایی^۵ از زمینه محصول آزاد شوند. مرحله استفاده، در بیشتر موارد، مهمترین بخش چرخه‌حیات برای مواجهه مصرف‌کننده با MNMs خواهد بود. آنالیز نیازها برای روش‌های اندازه‌گیری رهایش برای هر محصول و رده محصول، به ارزشیابی جداگانه‌ای از سناریوی استفاده نیاز دارد که طراحی محصول، نحوه استفاده از آن و شرایط بالقوه رهایش MNM را در بر می‌گیرد. مسیری که یک MNM در

1- Toughness
2- Wear resistance
3- Elastic stiffness
4- Self-passivation
5- Fragment

محصول گنجانده می‌شود یا به کار می‌رود، تأثیر زیادی بر خواص MNM و پتانسیل رهایش دارد و متعاقباً منجر به قرار گرفتن در مواجهه مصرف‌کننده یا محیط می‌شود.

نانوچندسازه‌ها از طریق استفاده از محصول مصرفی، دفع یا بازیافت، با دروندادهای^۱ انرژی مکانیکی، گرمایی و/یا شیمیایی مواجه می‌شوند که می‌تواند نانوچندسازه را تخریب کرده و منجر به رهایش نانومواد جاسازی شده شود. چندین مطالعه ذکر شده در این بخش، رهایش MNM از نانوچندسازه‌های بسپاری را در سناریوهای مختلف (هوازدگی، ساییدگی، سنباده‌زنی، زباله‌سوزی) بررسی کردند. مشاهده می‌شود که از این مطالعات به‌طور کلی داده‌های کافی برای حمایت از تصمیم‌گیری در مورد نرخ رهایش MNM با استفاده از یک روش شناسی رایج و هماهنگ تولید نشده است. با این حال، پس از آنالیز روش‌های مورد استفاده در هر مورد، می‌توان گستره‌های برخی عوامل را برای هر فرایند با شبیه‌سازی تجربی شرایط واقعی با استفاده از شبیه‌سازی‌های آزمایشگاهی مختلف ایجاد کرد. شبیه‌سازی آزمایشگاهی می‌تواند منجر به نتایج نادرست احتمالی زیر شود:

- تنش‌های آزمون‌های شبیه‌سازی آزمایشگاهی ممکن است نشان‌دهنده تنش‌های مورد نظر یا شرایط عملیاتی یا کارورزی نباشد؛ به‌عنوان مثال، ابزار ماشین‌کاری مورد استفاده در آزمایش‌های آزمایشگاهی ممکن است مشخصه‌های متفاوتی نسبت به ابزار مورد استفاده توسط کارور^۲ یا مصرف‌کننده داشته باشد یا تجزیه گرمایی خود مشتعل شده ممکن است شرایط زباله‌سوز را منعکس نکند:

- ریسک: شکل و نرخ رهایش به‌طور صحیحی تعیین نمی‌شود؛

- کاهش پیامدها: توصیه می‌شود که بر نانوچندسازه با پروتکل‌های ایجاد شده توسط ISO که سناریوهای دنیای واقعی را نشان می‌دهند، تأکید شود. برای مثال، پروتکل هوازدگی نانورهایش از استاندارد ISO 4892-3 برای پیرسازی^۳ نانوچندسازه‌های بسپاری، پیش از نمونه‌برداری و آنالیز استفاده می‌کند. علاوه بر این، زیربند ۵-۲-۶ مشخصه‌های ابزار را فهرست می‌کند.

- اندازه‌گیری‌های ایستای انتشار انجام می‌شود، برای مثال، هواسل‌های حاصل از سنباده‌زنی ممکن است انبوهه و کلوخه شوند یا شیرابه‌ها ممکن است به اشباع برسند:

- ریسک: همبستگی ضعیف از انتشار سنباده تا مواجهه انسان در ناحیه تنفس. فروشویی^۴

شبیه‌سازی شده ممکن است فروشویی محیطی را دست کم بگیرد.

- کاهش پیامدها: بیش از یک غلظت نانوچندسازه باید آزمون شود.

همچنین باید موقعیت‌های مختلفی را در نظر گرفت مانند:

- نانوچندسازه ممکن است حاوی MNM که به‌عنوان عامل مخاطره‌آمیز شناخته شده است، باشد:

- ریسک: آزمون میدانی، کارورها یا محیط‌زیست یا هر دو را در مواجهه ریسک قرار می‌دهد.

1- Inputs
2- Operator
3- Aging
4- Leaching

- کاهش پیامدها: از گزینه‌های محدودکننده در شبیه‌سازی آزمایشگاهی استفاده کنید.
- نرخ رهایش اغلب پایین است:
- ریسک: پس‌زمینه صنعتی یا محیطی ممکن است تکه‌های رهایش یافته نانوچندسازه را پنهان کند؛
- کاهش پیامدها: از گزینه‌های کاهش پس‌زمینه در شبیه‌سازی‌های آزمایشگاهی استفاده کنید، به‌عنوان مثال، با آزمون در آب فوق خالص یا در جعبه‌های سنباده‌زنی مجهز به صافی HEPA.
- در مرحله‌های اولیه تحقیق، تنها مقادیر کمی از نانوچندسازه ممکن است در دسترس باشد:
- ریسک: در دسترس نبودن مقدار کافی نانوچندسازه؛
- کاهش پیامدها: از آزمون شبیه‌سازی آزمایشگاهی برای نیاز به مواد نمونه کمتر استفاده کنید.
- بسته به محصول خاص و سناریوهای استفاده بالقوه، محدودیت‌های بیشتر در شرایط آزمایشی ممکن است. به‌طور مثال، جدول ۳ روش‌ها یا فرایندهای مختلف مورد استفاده برای القای رهایش نانوچندسازه‌های بسپاری PA حاوی MWCNT، از جمله شرایط اعمال شده در هر سناریوی مورد مطالعه را فهرست می‌کند.
- یادآوری - همه این مطالعات شامل شبیه‌سازی‌های آزمایشگاهی است.

جدول ۳ - شرایط آزمایشی برای رهایش از فرایندهای مختلف

مراجع	شرح	فرایند یا دلیل رهایش
[28], [29] [30], [31] [32], [33] [34], [35] [36], [37]	UV = ۶۰ W تا ۴۸۰ W (در بازه‌های ۳۰۰ nm تا ۴۰۰ nm) برای ۱۰۰۰ h در یک محفظه شتاب، معادل تقریباً ۱ سال تا ۳ سال در شرایط واقعی براساس ISO 4892-3 [231]	هوازدگی
[38], [39]	میله‌های آزمون اپوکسی سنباده دستی با کاغذ سنباده (زبره ۲۲۰ ^۱)	سنباده‌زنی دستی
[40], [41]	از سه سطح زبری کاغذ سنباده (ADSLOX A290 P80، P150 و P320) استفاده شد که به سطح صفحه دیسکی که روی یک ماشین تراش ثابت شده بود، چسبانده شد	کاغذ سنباده چسبانده شده به صفحه دیسک چرخشی
[42], [43]	سنباده کوچک (مدل Dremel سری‌های ۴۰۰) با نیروی تماس 10^{-1} N تا 210×10^{-4} N، فشار تماس 170×10^{-4} تا 570×10^{-4} و سرعت محیطی ۱٫۸ m/s تا ۲۴ m/s یا دستگاه سنباده دستی (Metabo FSR200) با ۲۲۰۰۰ نوسان در دقیقه) استفاده شد	تجهیزات سنباده دستی
[39], [44]	سنباده تسمه‌ای (مدل ۹۷۱۸۱) با تسمه سنباده (۹۱٫۴ cm × ۱۰٫۲ cm) که با سرعت ثابت ۵٫۶ m/s با کاغذ سنباده آلومینیوم سیلیکونی با اندازه‌های زبره P150 و P320 کار می‌کند	تسمه سنباده

جدول ۳- (ادامه)

مراجع	شرح	فرایند یا دلیل رهایش
[45]	تجهیزات تابر با چرخ ساینده H-18، وزن اعمالی ۰٫۷۵ Kg و بسامد ۶۰ c/min	سایش
[46], [43] [39]	زبره تیغه ۲۲۰، عرض تیغه ۱٫۶۵ mm، سرعت تیغه ۲۰ m/s و سرعت پیشروی چندسازه‌ها در محیط خشک و مرطوب ۰٫۲ cm/s تا ۰٫۴ cm/s	اره موئی
[46]	زبره تیغه ۲۲۰، عرض تیغه ۱٫۶۵ mm، سرعت تیغه ۱۵ m/s و سرعت پیشروی ۰٫۴ cm/s چندسازه‌ها در شرایط مرطوب (رسوب‌شویی/پاکسازی ^۲ با آب)	چرخ برش چرخشی
[48], [47]	سرعت سوراخ‌کاری ۷۲۵ rpm تا ۱۳۵۵ rpm، بار معمولی ۱۷ N و ضخامت آزمون ^۳ ۱٫۳ mm تا ۳٫۹ mm، در شرایط محیطی خشک و مرطوب انجام می‌شود	سوراخ‌کاری
[49]	بار معمولی ۵ N تا ۲۵ N، طول خراش ۵ mm با سرعت ۵ mm/min برای مجموع ۱ خراش تا ۱۵ خراش	خراش
[50]	سرعت چرخش ۷۹۰۰ rpm تا ۱۸۷۵۰ rpm در قطر محفظه سنگ‌شکن ۱۴۰۸؛ ۱۴ هزار چرخش کل	سنگ‌شکنی ^۴
[53], [52] [51], [54]	شبیه‌سازی‌های آزمایشگاهی زباله‌سوزی پسماند در استاندارد ISO 15270 بازتولید شده‌است که به دمای کوره کمینه ۸۵۰ °C (۱۵۶۲ °F)، پس از حریق بیش از حد ^۵ ، به تزریق هوا به مدت حداقل ۲ s و غلظت اکسیژن ۲۰٫۹٪ حجمی نیاز دارد. فقط برای زباله‌سوزی پسماندهای خطرناک، براساس الزامات ISO به دمای ۱۲۰۰ °C (۲۱۹۲ °F) نیاز دارد، اما هنوز مورد آزمون قرار نگرفته است	زباله‌سوزی
[57], [56] [55]	رهایش برای NEPs که برای تماس با سرکه، نوشیدنی‌های الکلی، عصاره‌های طعم‌دهنده و موارد مشابه، استانداردهای شبیه‌سازی‌شده در تماس با غذا با ۳٪ استیک اسید و ۵۰٪ تا ۹۵٪ اتانول آزمون‌شده بودند، مشاهده شده است. رهایش با انحلال MNM داخل زمینه NEP در این موارد تحت کنترل بود	تماس با غذا

¹ Grit

² Flushing

³ Specimen

⁴ Crushing

⁵ Overfire

فرایندها یا علل ذکرشده در جدول ۳ برای رهایش MWCNT از چندسازه‌های PA شرایط سخت‌گیرانه‌ای را توصیف می‌کنند که می‌تواند برای سایر چندسازه‌ها و تلفیق‌های افزودنی MNM نیز اعمال شود. با این حال، همانطور که اشاره شد، اگرچه افراط در برخی از شرایط آزمون منعکس‌کننده دوره‌های نسبتاً کوتاه آزمون است، ملاحظات بیشتر سناریوی استفاده ممکن است به توسعه‌دهندگان یک برنامه آزمایشی اجازه دهد تا بر زیرمجموعه‌ای از سازوکارهای رهایش بالقوه خاص تحت شرایطی که بیشتر شرایط بالقوه استفاده نهایی را تقلید می‌کند، تمرکز کنند.

۶ عوامل موثر بر انتخاب روش اندازه‌گیری رهایش

۱-۶ کلیات

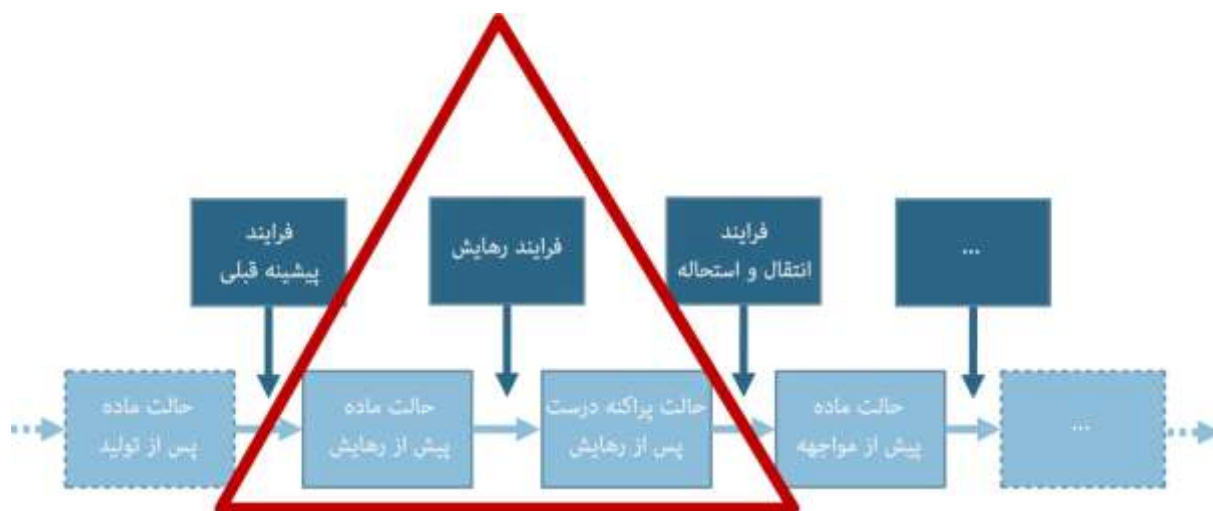
منابع علمی^۱ موجود به‌طور گسترده اثر سازوکارهای رهایش و شرایط (مانند دما، pH، محیط رهایش) را همانطور که در زیربند ۵-۲-۶ توصیف شده است (مانند سایش، شیمیایی، گرمایی) بر شکل‌های موادی که رهایش می‌یابند و مقدار رهایش موادی که ممکن است رخ دهند (مثلاً قرمز در شکل ۲)، ارزشیابی کرده است.

در این استاندارد، رهایش به‌عنوان اولین رهایش ماده از یک چندسازه حاوی MNM در مسیرهای مواجهه یا تخلیه حین استفاده مصرف‌کننده یا تجاری از محصول تعریف می‌شود (به شکل ۲ مراجعه شود). سرنوشت و حمل‌ونقل بعدی و تعیین مواجهه‌های ناشی از آن خارج از دامنه کاربرد این استاندارد است. رهایش می‌تواند از طریق فرایندهایی مانند تخریب فیزیکی، شیمیایی یا گرمایی زمینه‌سپاری منجر به ذراتی شود که می‌تواند شامل مخلوطی از افزودنی MNM آزاد، افزودنی MNM متصل به زمینه و زمینه بدون افزودنی MNM باشد. رهایش افزودنی MNM بعدی می‌تواند از اولین رهایش دنبال شود. به‌عنوان مثال، افزودنی MNM می‌تواند در نهایت از ذرات رهایش‌یافته اولیه آزاد شود، زیرا آن ذرات در محیط تجزیه می‌شوند؛ با این حال، این رویدادهای رهایش بعدی به‌طور مفصل در این استاندارد مورد بررسی قرار نخواهند گرفت.

روش‌های نمونه‌برداری و اندازه‌گیری مورد بحث در این استاندارد برای گستره اندازه از چند نانومتر تا چندین میکرومتر هدف‌گذاری شده‌اند، زیرا این محدوده‌های اندازه مربوط به رویدادهای مواجهه استنشاقی، پوستی یا قورت دادن تصادفی است.

موضوعات کلیدی پوشش داده‌شده عبارتند از:

- گستره اندازه، سمیت، شکل رهایش، واجهنگی MNM / زمینه؛
- شناسایی / ارزشیابی نگرانی‌های رهایش؛
- سناریوهای مرتبط.



یادآوری - رویدادهای رهائش تحت پوشش این استاندارد با مثلث قرمز مشخص شده است و شامل سرنوشت، استحاله، مواجهه یا تبدیل ثانویه تکه‌های رهائش یافته یا MNM نمی‌شود.

شکل ۲ - رویدادهای رهائش

۲-۶ حالت‌های رهائش

هدف ملاحظات نظام‌مند حالتی که در آن MNM آزاد می‌شود، با پیوند بین خواص حالت‌های حاوی MNM (همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است) و سمیت آنها تقویت می‌شود. این خواص می‌توانند حین فرایند رهائش تغییر کنند و سمیت بالقوه و اثرات سلامتی مواد رهائش یافته می‌تواند تحت تأثیر چنین استحاله‌هایی قرار گیرد (در مورد TiO_2 ، Fe_2O_3 ، رنگدانه‌های آلی فلزی و CNT) که منجر به کاهش سمیت القاشده در مقایسه با MNM آزاد [43] و [58] یا سمیت محیط‌زیستی [63] شود. به‌عنوان مثال، MNM می‌تواند به‌عنوان ذرات جاسازی‌شده در زمینه رهائش شده و با آن رهائش بعدی MNM آزاد (یا رهائش نیافته) دنبال شود. باین‌حال، تحت شرایط خاص، وجود MNM فعال کاتالیزگری (به‌عنوان مثال کاتالیزگر CNT حین تجزیه گرمایی در غیاب شرایط زباله‌سوز) همچنین می‌تواند محصولات رهائش را پرمخاطره کند [52] و [64]. فرآیندهای مشابهی می‌تواند با تبدیل ذاتی مواد حین ساخت افزودنی، رخ دهد. شکل و مقیاس زمانی رهائش برای ارزشیابی سمیت حیاتی است و از این رو استحاله‌ها در نقطه رهائش (به شکل ۲، مثلث قرمز مراجعه شود) شایسته توجه در ارزیابی رهائش هستند. زیربند ۳-۶ یک چارچوب تصمیم‌گیری لایه‌ای (مرحله‌ای) پیشنهادی را برای کمک به تصمیم‌گیرندگان در تعیین اینکه آیا و کدام استحاله‌ها در نقطه رهائش باید در نظر گرفته شوند، توضیح می‌دهد.

حین بررسی منابع علمی، مشاهده شد که منابع علمی تمایل به خوشه‌بندی در دو مورد مختلف دارند.

- سناریوهای رهایش که MNM نسبت به زمینه واجهندگی کمتری دارد: مثال‌ها شامل شستشو و فروشویی فیلم‌های منسوجات- نقره، چوب- مس و نقطه کوانتومی (QD) است، زیرا تحت تنش‌های سناریوهای خاص، تخریب MNM از تخریب زمینه سریع‌تر است.

- سناریوهای رهایش که در آن زمینه نسبت به MNM واجهندگی کمتری دارد: مثال‌ها شامل هوازدگی اپوکسی- نانولوله کربنی چنددیواره، از PA-MWCNT، از PP-MWCNT، از PP-Fe₂O₃ اما همچنین تجزیه گرمایی چندسازه‌ها است، زیرا تحت تنش‌های سناریوهای خاص، زمینه سریع‌تر از MNM تخریب می‌شود.

مطالعه‌های قدیمی‌تر در مورد رهایش از NEPs، به‌ویژه در چندسازه‌های MWCNT، بر استحاله ساختارهای فیزیکی متمرکز بود، درحالی‌که مطالعه اخیر روی فلز حاوی MNM اغلب بر انحلال و استحاله ماهیت شیمیایی (یعنی گونه‌زایی، ترکیب‌بندی) متمرکز شده است. هر دو ممکن است پیش یا حین رهایش (در محدوده استاندارد حاضر) یا پس از رهایش (فراتر از دامنه کاربرد) رخ دهند. شکل ۳ استحاله‌های فرضی را با رنگ‌هایی که نماد ماهیت شیمیایی هستند، پیش یا حین رهایش نشان می‌دهد که منجر به رهایش ذرات می‌شود.

- شکل‌های فیزیکی رهایش را می‌توان به پنج شکل عمومی، ساده کرد که می‌توان آنها را به‌طور تجربی متمایز کرد [65] و [36]:

- F: تکه زمینه (به‌طور بالقوه با MNM جاسازی‌شده).

- G: تکه زمینه با MNM یا انبوهه MNM بیرون‌زده (با اجزای جزئی زمینه)؛

- J: کلوخه‌های MNM.

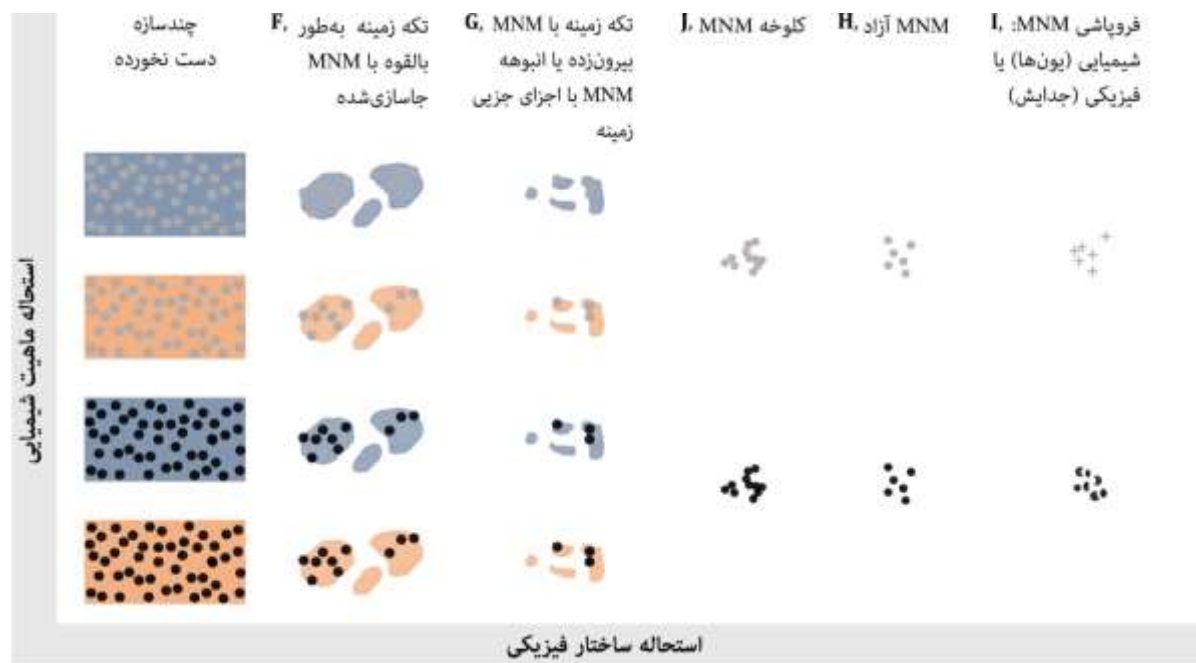
- H: MNM آزاد؛

- I: فروپاشی^۱ MNM: از نظر شیمیایی (یون) یا فیزیکی (جدایش^۲).

برخی از شکل‌ها فرضی هستند، در حالی که برخی دیگر در منابع علمی مشاهده شده‌اند و در شکل‌های ۴ و ۵ و در مطالعات موردی در پیوست الف بازتولید شده‌اند. دو محور در شکل ۳ استحاله ساختار فیزیکی را نشان می‌دهد (سمت چپ NEP چندسازه دست‌نخورده^۳ است، سمت راست شکست^۴ ساختار NEP است) و با استحاله ماهیت شیمیایی (آبی، نماد یک زمینه شیمیایی تبدیل استحاله‌شده است، به‌عنوان مثال، بسپار تبدیل به زغال چوب، خاکستری نماد یک MNM تغییر یافته شیمیایی است، برای مثال، فلز تبدیل به اکسید

1- Disintegration
2- Break-up
3- Intact
4- Breakdown

فلز یا یون می‌شود). تکه‌تکه شدن^۱ MNM بدون استحاله شیمیایی در گوشه پایین سمت راست نشان داده شده است، اما فقط برای الیافی که می‌شکند مشاهده شده است.



راهنما

- زمینه اصلی
- زمینه استحاله‌شده
- MNM اصلی
- MNM تغییر یافته

یادآوری - برگرفته از حالت «نانورهایش» گزارش علمی [65].

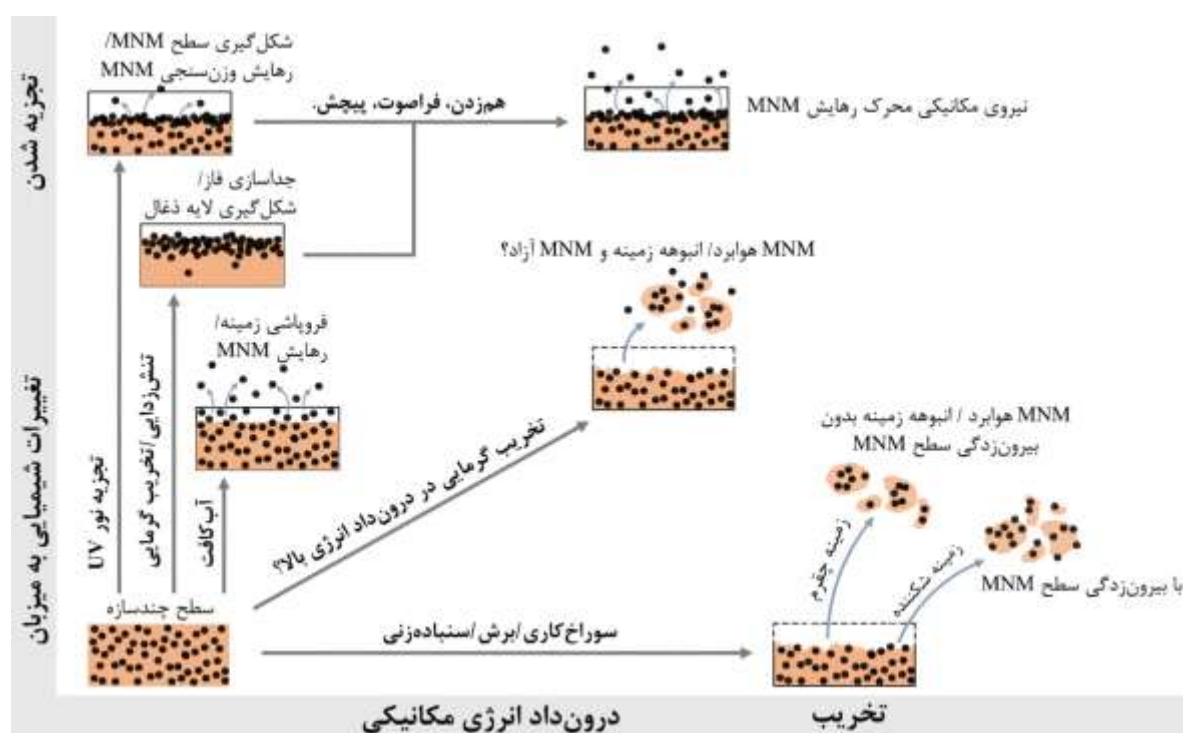
شکل ۳ - طرحواره گرافیکی شکل‌های رهائش

مقایسه بین آزمایشگاهی نانورهایش، آزمون رهائش را حین هوازگی کنترل‌شده با تحلیل شکل رهائش از طریق TEM انجام داد [36]. نتایج، برخی ابهامات باقی‌مانده را بین «MNM آزاد» و «کلوخه MNM» یافت، زیرا کارورزان ارزشیابی تجربی تصاویر TEM، معیارهای واضح را برای تمایز بین دو شکل H و J نیافتند، بنابراین یک ارزیابی تجربی ممکن است با مجموع آنها H+J رده‌بندی شود. با این حال، مقایسه بین آزمایشگاهی به نتایج تجدیدپذیر برای شناسایی سایر شکل‌های رهائش (F, G, H+J, I) با روش‌های فهرست‌شده در مطالعات موردی (به پیوست الف مراجعه شود) دست یافت [36].

1- Fragmentation

در نظر گرفتن فرایندهای رهایش، ماهیت زمینه و شکل‌های بالقوه رهایش حاصل، جنبه‌های کلیدی فرایند تصمیم‌گیری هستند (که بعداً در این بند توضیح داده می‌شود). با پیوند دادن فرایندهای رهایش (مرحله ۱ از فرایند تصمیم‌گیری گام به گام) با ماهیت زمینه (مرحله ۲)، طرح‌های نظام‌مند از منابع علمی، استحاله فیزیکی حاصل را پیش یا حین رهایش به تصویر می‌کشند. شکل ۴ (برگرفته از مرجع [66] کتاب‌نامه) استحاله‌های ساختاری چندسازه‌های بسپاری عمومی MNM را با تمرکز بر حالت MNM که انعطاف‌پذیرتر از زمینه است توصیف می‌کند. برای سادگی، استحاله‌های شیمیایی را نشان نمی‌دهد (مانند تجزیه گرمایی یک زمینه بسپاری، که نماد آن «زمینه آبی» در شکل ۳ است).

استحاله‌های نشان داده‌شده در این شکل به‌طور تجربی در گزارش‌های متعدد تأیید شده‌اند و با مطالعه موردی Fe₂O₃-PP نشان داده شده‌اند (به جدول الف-۵ مراجعه شود).



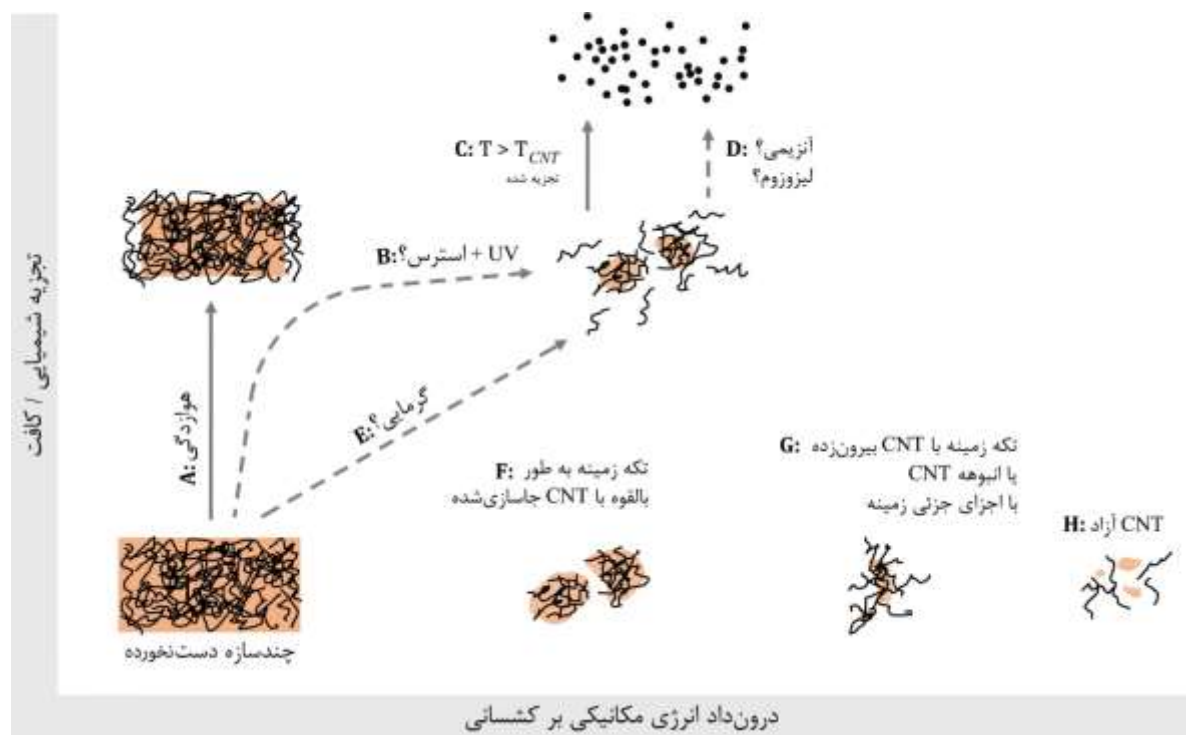
یادآوری - برگرفته از مرجع [66] کتاب‌نامه

شکل ۴ - پیوند شکل‌های رهایش (شکل ۳) به فرایندهای رهایش. تبدیل چندسازه‌های بسپاری عمومی MNM، با تمرکز بر مورد MNM که واجهنده‌تر از زمینه است

یک طرح استحاله از مرجع [65] کتاب‌نامه (که براساس مرجع [41] کتاب‌نامه است) به‌طور خاص برای چندسازه‌های بسپاری MWCNT در شکل ۵ پیشنهاد شده است. در اینجا، کشسانی زمینه بسپاری در نظر گرفته شده است. تکه‌های با MWCNT بیرون‌زده با بسپارهای نرم‌تر کمتر و بیشتر با بسپارهای شکننده تشکیل می‌شوند [41] زیرا بسپار نرم‌تر حین شکست مکانیکی در اطراف MWCNT نسبتاً سفت‌تر جریان می‌یابد. استحاله‌های F، G و H به‌طور تجربی در مقایسه بین آزمایشگاهی هوازدگی بسپار MWCNT [36]

(به شکل ۶ مراجعه شود) و با آزمون‌های مختلف سنباده‌زنی [67] و [68] تأیید شدند. نتایج تلفیقی همه مطالعات مرتبط با مطالعات موردی اپوکسی-نانولوله کربنی چنددیواره و MWCNT-PP نشان داده شده است (به پیوست الف مراجعه شود).

اگرچه شکل ۵ استحاله را برای بسیاری از موقعیت‌ها نشان می‌دهد، تفاوت مهمی در مسیر تبدیل زباله‌سوزی و تجزیه گرمایی وجود دارد. پس از سوختن ناقص (۲۰٪ اکسیژن، ۵۰۰ °C) اگر نه همه که بیشتر CNT در NEP، در خاکستر به‌جامانده، باقی می‌ماند. در دماهای بالا (۲۰٪ اکسیژن، ۸۰۰ °C)، همانطور که مربوط به سوختن پسماند است، خاکستر باقی‌مانده از NEPs مبتنی بر CNT صفر بود، اما MNM معدنی در خاکستر استحاله‌شده شیمیایی متمرکز باقی ماند [53]. نانومواد ساخته‌شده به‌ندرت رهايش می‌یابند [53]، [54]، [69]. پرکننده‌های لیفی مانند CNTs و الیاف کربن می‌توانند استحاله‌های بیشتری را حین فرایند رهايش تجربه کنند، به‌عنوان مثال، CNTs را می‌توان به نمونه‌های کوتاه‌تر خرد کرد (به شکل ۳، حالت I مراجعه شود).



یادآوری - شکل‌های رهايش F، G، H مطابق با شکل ۳ نشان داده شده است. برگرفته از وضعیت نانورهايش در گزارش علمی [65].

شکل ۵ - پیوند شکل‌های رهايش (شکل ۳) به فرایندهای رهايش: استحاله چندسازه‌های بسیاری MWCNT

شکل ۶، تأیید تجربی را نشان می‌دهد که شکل رهايش را می‌توان به‌طور تکرارپذیر با آنالیز TEM مطابق با طرح‌های شکل ۵ تعیین کرد. این شکل از مقایسه بین آزمایشگاهی نانورهايش اقتباس شده است، [36] همانطور که در بالا توضیح داده شد، با کدگذاری رنگ [به شکل ۶-الف مراجعه شود] شکل‌های رهايش F،

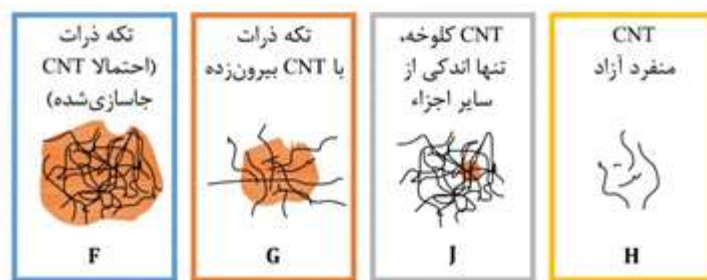
G، H، J. نتایج نشان‌دهنده بیش از ۴۰۰ ارزشیابی TEM توسط دو آزمایشگاه آنالیز (به ترتیب به شکل ۶-ب و ۶-پ مراجعه شود) روی پلاستیک‌های پیرشده مطابق با [231] ISO 4892-3، در چهار آزمایشگاه انجام‌دهنده آزمون پیرسازی که هر کدام دو نانوجندسازه MWCNT (P4 و E4) و دو کنترل (P0) برای پلی‌آمید خالص و E0 برای اپوکسی خالص) را فراوری می‌کنند. مقایسه شامل نمونه‌برداری با شدت مختلف، با تکان دادن و به روش فراصوت بود. آنالیز دستی TEM از این قانون پیروی می‌کند که ساختارهای کشیده به‌عنوان MWCNT شناسایی می‌شوند، فقط در صورتی که هر سه پارامتر با کنترل مثبت MWCNT مطابقت داشته باشند:

- هسته توخالی مشاهده شده؛

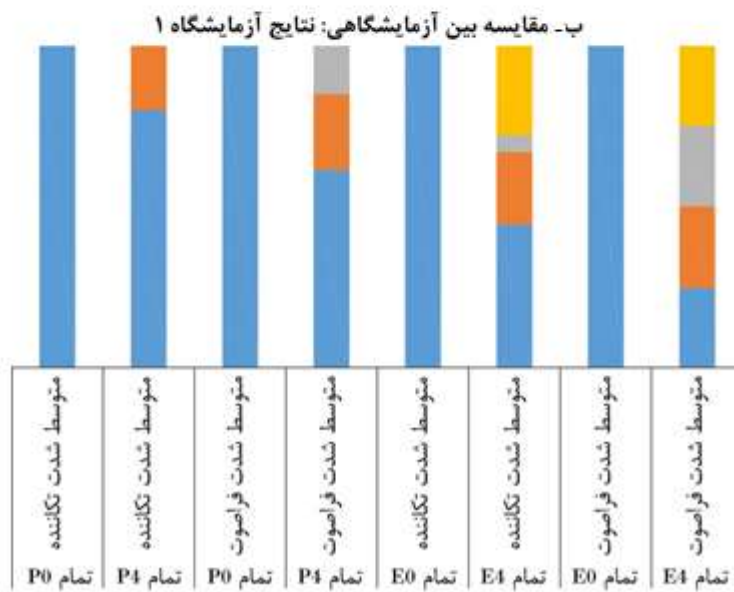
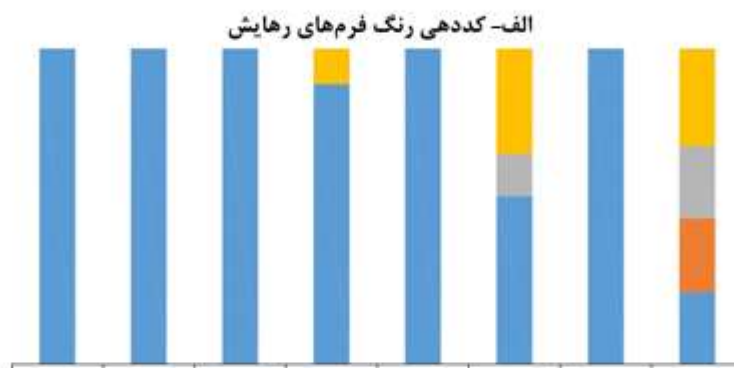
- قطر مطابق (برای نوع خاص MWCNT: بین ۵ nm تا ۲۰ nm)؛

- طول مطابق (برای نوع خاص MWCNT: بیش از ۲ μm نباشد).

مقایسه بین آزمایشگاهی، تجدیدپذیری را تایید کرد [36]. تفاوت جزئی بین دسته‌های F در مقابل G باقی‌ماند (شکل‌های ۶-ب، را در مقابل ۶-پ، مقایسه کنید).



F - H در رهایش نظام مند گزارش شده توسط هارپر و همکاران. ۲۰۱۵



ب- مقایسه بین آزمایشگاهی: نتایج آزمایشگاه ۲

یادآوری ۱- شکل ۶-الف- کدگذاری رنگی شکل های رهایش را توضیح می دهد. شکل ۶-ب- نتایج آنالیز مقایسه بین آزمایشگاهی را برای آزمایشگاه ۱ نشان می دهد. شکل ۶-پ- نتایج آنالیز مقایسه بین آزمایشگاهی را برای آزمایشگاه ۲ نشان می دهد.

یادآوری ۲- برگرفته از مرجع [36] کتاب نامه.

شکل ۶- تایید تجربی مبنی بر امکان کمی سنجی شکل رهایش به صورت تجدیدپذیر با آنالیز TEM مطابق با طرح های شکل ۵

در مورد MNM با واجه‌نگی کمتر از زمینه (در شکل ۳ با «نقاط خاکستری در زمینه نارنجی» ترسیم شده است)، هیچ طرح جهانی قابل اجرایی شناخته نشده است، زیرا تبدیل در ره‌ایش اغلب شامل دنباله‌های پیچیده اکسایش / انحلال / استحاله / رسوب مجدد MNM است. این موضوع برای فروشویی QDs از بسیار [70] و [55]، فروشویی مس از چوب [71] و [73] و فروشویی Ag از منسوجات [74] در مقابل مهاجرت بالقوه تیتانیوم نیتريد (TiN) دست‌نخورده از بسیار که در واقع مشاهده نشد، مورد بحث قرار گرفته است [75]. یک نمونه مطالعه موردی روی چوب عمل‌آوری‌شده با مس درج شده است تا نشان دهد که فرایند تصمیم‌گیری در مورد MNM که واجه‌نگی کمتری نسبت به زمینه دارد نیز مفید است (به پیوست الف مراجعه شود). بنابراین، رویداد ره‌ایش اولیه می‌تواند منجر به تمایز (افزایش تنوع) یا همانندسازی^۱ (افزایش شباهت) شکل‌های ره‌ایش بسته به فرمول‌بندی‌های بسیاری MNM شود [76].

۳-۶ چارچوب پشتیبان تصمیم‌گیری برای تعیین استحاله‌های نیازمند بررسی با مثال

بر اساس یافته‌های منابع علمی، یک چارچوب ارزشیابی لایه‌ای (مرحله‌ای) برای توسعه تصمیم‌گیری در مورد اینکه آیا/کدام استحاله‌ها در نقطه ره‌ایش باید در نظر گرفته شوند، ایجاد شد. همراه با در نظر گرفتن سناریوی استفاده از محصول خاص، این چارچوب می‌تواند در تعیین روش‌های نمونه‌برداری و آنالیزی لازم کمک کند. یعنی تعیین پتانسیل مواجهه در صورت ره‌ایش، جنبه مهمی از درک روش‌های اندازه‌گیری مورد نیاز برای استفاده خاص و سناریوی ره‌ایش است. به‌عنوان مثال، پتانسیل چنین مواجهه‌ای ممکن است برای یک MNM جاسازی‌شده در یک منسوج زیاد باشد، اما پتانسیل مواجهه مستقیم احتمالاً حین استفاده تجاری و مصرف‌کننده برای یک NEP که در یک محصول مصرفی محصور شده است، کم خواهد بود (اگرچه مواجهه در مورد دوم ممکن است حین ساخت، خدمت‌رسانی، دفع و بازیافت رخ دهد).

جدول ۴ در زیر، فهرستی از عوامل درون‌داد مورد استفاده برای استخراج عوامل پشتیبان تصمیم مرتبط و برون‌داد چارچوب پشتیبانی تصمیم‌گیری حاصل ارائه می‌دهد.

جدول ۴ - عوامل چارچوب لایه‌ای برای پشتیبانی از تصمیم‌گیری در تعیین استحاله‌ها در نقطه ره‌ایش

مرحله	عوامل درون‌داد	عوامل پشتیبانی از تصمیم‌گیری	برون‌داد
۱	سناریوی ره‌ایش	فرایند ره‌ایش (تنش‌های مرتبط یا تلفیقی از آنها، شدت و مدت آنها)	شکل‌های ره‌ایش در درجه اول
۲	شناسایی مواد زمینه	واجه‌نگی زمینه در مقابل تنش‌های مرتبط	نمونه‌برداری و آنالیز شوند
۳	شناسایی MNM	واجه‌نگی MNM در مقابل تنش‌های مرتبط	
۴	محتوا و سازگاری MNM در زمینه، وضعیت پراکنه MNM در زمینه	همگنی، پایداری و غلظت پراکنه MNM در اجزای ماده‌ای که با محیط ره‌ایش در تماس است	مدوله کردن نرخ و شکل ره‌ایش (به‌عنوان مثال درجه پیوند MNM به زمینه در ذرات ره‌ایش یافته)

1- Assimilation

پیوست الف چندین مثال کاربردی خاص را شرح می‌دهد که نشان می‌دهد چگونه فرایند چارچوب پشتیبانی تصمیم در جدول ۴ می‌تواند برای انتخاب روش‌های نمونه‌برداری و آنالیز برای شناسایی و کمی‌سنجی رهایش MNM از نانوچندسازه‌ها استفاده شود. این مثال‌ها رهایش انواع MNM را نشان می‌دهند که منابع علمی کافی برای آن‌ها وجود داشت.

الف - قسمت‌های سبک ساخته‌شده از اپوکسی - نانولوله کربنی چنددیواره (به‌عنوان مثال در کاربردهای هواپیمایی). این مثال، موردی را نشان می‌دهد که MNM نسبت به زمینه واجهنده‌تر است.

ب - منسوجات آغشته‌شده به نانوذرات نقره برای محافظت ضد میکروبی. این مثال، موردی را نشان می‌دهد که MNM نسبت به زمینه واجهنگی کمتری دارد.

پ - چوب‌های آغشته‌سازی‌شده به MNM بر پایه مس که در فضای باز در خاک قرار می‌گیرند (مثلاً تیرهای چوبی ایوان). این مثال، موردی را نشان می‌دهد که MNM نسبت به زمینه واجهنگی کمتری دارد. برخی از چالش‌های اندازه‌شناسی در سناریوهای منسوج - نقره یا نقاط کوانتومی در بسپار، مشابه هستند.

ت - قطعات خودرو ساخته‌شده از MWCNT یا Fe_2O_3 در گرمانرم (PA و PP). این مثال موردی را نشان می‌دهد که در آن MNM و زمینه هر دو در برابر بیشتر تنش‌ها واجهنده هستند، اما نه همیشه به یک اندازه. فرایندهای پایان عمر می‌توانند هم برای MNM و هم برای زمینه مخرب باشند. چالش‌های اندازه‌شناختی در این مورد شبیه به آن چیزی است که با اکسید فلز در رنگ‌ها یا پوشش‌ها مشاهده می‌شود (سازوکارهای تخریب زمینه مشابه، اما چالش‌های اندازه‌شناختی کمتر).

ث - چاپ سه‌بعدی MNM حاوی گرمانرم نشان می‌دهد که MNM نسبت به زمینه واجهنده‌تر است. انتظار می‌رود فرایندهای پایان عمر هم برای MNM و هم برای زمینه مخرب باشند.

همه مثال‌ها از فرایند ساختاری یکسانی برای هر نگرانی رهایش، پیروی می‌کنند. به جدول‌های ۴ و ۵ مراجعه شود. سناریوهای رهایش به همراه ماهیت زمینه و MNM شناسایی می‌شوند. سپس پیامدهای هر یک از این عوامل، شناسایی و شرح داده می‌شود. شکل‌های رهایش و روش‌های مورد استفاده در منابع علمی ذکر شده، شناسایی شده است. در این راستا، مرحله‌های ۱ تا ۳ برای انتخاب حیاتی‌ترین پروتکل‌ها برای پیرسازی، نمونه‌برداری و آنالیز ضروری است. البته مرحله ۴، برای درک خواص نانوچندسازه و نرخ رهایش کاملاً مرتبط است که ممکن است بر انتخاب پروتکل نیز تأثیر بگذارد و با توسعه کامل‌تر مدل‌هایی که از داده‌های رهایش استفاده می‌کنند، مهم خواهد بود. برای هر یک از این مرحله‌ها، مفاهیمی را برای مرحله چرخه‌حیات در نظر می‌گیریم.

جدول ۵ - یک فرایند ساختاریافته برای ارزشیابی هر یک از نگرانی‌های رهائش

پیامدها (هر تعداد مثال مرتبط)				پاسخ	پرسش‌ها (عامل درونداد)	مرحله‌ها
نگرانی رهائش n	...	نگرانی رهائش ۲	نگرانی رهائش ۱			
					سناریو(های) رهائش مرتبط چیست؟	۱
					ماهیت زمینه چیست؟	۲
					ماهیت MNM چیست؟	۳
					محتوا و سازگاری چیست؟	۴
					حالت پراکنه MNM در زمینه چیست؟	
				= شکل‌های رهائش که در منابع علمی روی مورد خاص مشاهده شده است (تا چه درجه پیوندی از NM به زمینه حین رهائش به‌طور کامل و یا تا حدی محدود می‌شود؟ یا دست‌نخورده می‌ماند؟)		
				روش‌های مورد استفاده در منابع علمی ذکر شده است		

پذیرفته شده است که استفاده از چارچوب پشتیبانی تصمیم، نیاز به دانش اولیه در مورد ترکیب‌بندی MNM و زمینه دارد. اگر واجه‌نگاری زمینه خالص یا MNM خالص ناشناخته باشد، این می‌تواند به‌عنوان مرحله اولیه آزمون شود یا کاربر می‌تواند مستقیماً به آزمودن رهائش با نمونه‌برداری و آنالیز بسیار جامع بپردازد. در برخی موارد، حتی ممکن است مشخص نباشد که کدام MNM (یا مواد زمینه) استفاده می‌شود. در این مورد، چارچوب پشتیبانی تصمیم پس از مرحله ۱، متوقف می‌شود و توصیه می‌کند یک شبیه‌سازی مناسب از تنش‌های مرتبط با نمونه‌برداری و آنالیز جامع برای همه شکل‌های رهائش بالقوه انجام شود.

به‌عنوان معیاری برای کفایت، همبستگی خوب شبیه‌سازی با تخریب واقعی خواص ماکروسکوپی (مانند رنگ، براقیت، مکانیک) توصیه می‌شود و یک پروتکل ISO صحت‌گذاری شده شبیه‌سازی تنش‌های مرتبط در حالت ایده‌آل، برای مشخص کردن عملکرد محصول در کاربرد مورد نظر، استفاده می‌شود. بنابراین، رویکرد تصمیم‌گیری با هدف قرار دادن پروتکل آزمون به سناریوهای مرتبط، مطابق با فرمول‌بندی مشکل، به بهترین وجه پشتیبانی می‌شود.

اطلاعات حاصل از شکل‌های رهائش در پشتیبانی از تصمیم‌گیری‌ها در مورد تأثیر نسبی MNM افزوده شده بر تصمیم‌گیری‌های مدیریت ریسک مفید است: مرحله ۴ (که با تمام مرحله‌های پیشین پشتیبانی می‌شود) منحصرأ به رویکردهای پیش‌بینی یا گروه‌بندی مرتبط است. برای تهیه اهداف بلندمدت ارزیابی رهائش غیرآزمایشی، مرحله ۴ گنجانده شده است زیرا پیش‌بینی می‌شود که مرحله‌های ۱ تا ۴ اطلاعات مورد نیاز برای رویکردهای مدل‌سازی را جمع‌آوری می‌کنند، اما واضح است که چنین مدل‌هایی هنوز وجود ندارند. آزمون رهائش آزمایشی، در حال حاضر هنوز مورد نیاز است. در این راستا، مرحله‌های ۱ تا ۳ برای انتخاب مهم‌ترین پروتکل‌ها برای پیرسازی، نمونه‌برداری و آنالیز ضروری است.

۷ رویکردهایی برای آشکارسازی و کمی‌سنجی مواد رهائش‌یافته مرتبط با نانومواد ساخته شده افزوده شده

۱-۷ کلیات

مواد نانوچندسازه می‌توانند تنوع گسترده‌ای از MNMs را در خود جای دهند که می‌توانند به‌طور قابل توجهی در خواص و کاربردهای مورد نظر متفاوت باشند. اگرچه رویکردهای راهبردی کلی برای نمونه‌برداری و اندازه‌گیری رهائش از چندسازه‌های حاوی MNMs مختلف به‌طور گسترده مشابه هستند، روش‌های خاص آنالیزی و/یا آماده‌سازی نمونه بسته به MNM و زمینه بسیاری مورد بررسی، متفاوت است.

همانطور که قبلاً ذکر شد، فرمول‌بندی مسئله و ES بالقوه، نقش کلیدی در طراحی یک راهبرد نمونه‌برداری دارند. راهبرد آزمون و نمونه‌برداری رهائش باید با ESs بالقوه مرتبط، امکان‌پذیر و از نظر آماری معتبر باشد. این بدان معناست که انواع مختلف نمونه‌برداری می‌تواند برای سناریوهای مختلف مناسب باشد. برای مثال، در برخی موارد می‌توان با یک پرسش کیفی در مورد اینکه آیا رهائش وجود دارد یا خیر، شروع کرد، به‌جای آنکه فوراً به یک رویکرد زمان‌بر برای تعیین ماهیت و تعداد ذرات رهائش‌یافته ادامه داد.

این بحث در مورد روش‌های کمی‌سنجی و نمونه‌برداری آنالیزی متمرکز است که به‌طور خاص مربوط به رهائش ذرات MWCNT و MWCNT/بسیار است، مگر اینکه به‌طور دیگری مورد توجه قرار گیرد. MWCNT به‌عنوان یک سامانه مدل برای نشان دادن فرایند پشتیبانی تصمیم ارائه شده در این استاندارد انتخاب شد، اما مفاهیم و رویکرد را می‌توان برای سایر MNMs و زمینه‌ها اعمال کرد. پیوست الف چندین مثال از چارچوب پشتیبانی تصمیم‌گیری را برای مواد

دیگر ارائه می‌دهد. اندازه‌گیری مواد رهایش‌یافته از چندسازه‌های بسپاری MWCNT به دلایل متعدد بسیار چالش‌برانگیز است. مهمترین دلیل، پیچیدگی شیمیایی و فیزیکی مواد رهایش‌یافته است که می‌تواند همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است، شکل‌های مختلفی داشته باشد. بند ۷، شامل بررسی روش‌های موجود برای آشکارسازی، اندازه‌گیری و توصیف MWCNT رهایش‌یافته از چندسازه‌ها در محیط‌های مختلف (مانند هوا، آب، زمینه‌های جامد و زیستی) با سازوکارهای مختلف وابسته به اثرات به‌عنوان نتیجه استفاده، است.

یادآوری- روش‌های غیرمستقیم که آزمون یا محصول مصرفی را پیش و پس از رویداد رهایش مشخصه‌یابی می‌کنند نیز می‌توانند از ارزشیابی رهایش پشتیبانی کنند. به‌عنوان مثال، در صورتی که MNM از زمینه واجهنگی کمتری داشته باشد، به‌ویژه برای منسوجات تقویت‌شده ضد میکروبی، محتوای کل MNM از EP پیش و پس از شستشو می‌تواند حاوی اطلاعات مهمی باشد (استانداردی در مورد این موضوع در دست تدوین است).

موضوعات کلیدی عبارتند از:

- رویکردهای مناسب برای MNMs؛

- عوامل مؤثر بر روش نمونه‌برداری، آماده‌سازی و آنالیز؛

- روش‌ها / چالش‌های اندازه‌گیری؛

- آشکارسازی، کمی‌سنجی، مشخصه‌یابی رهایش‌ها.

۷-۲ روش‌های نمونه‌برداری از مواد رهایش‌یافته

۷-۲-۱ کلیات

هر تلفیق و توزیع تکه‌های بسپار آزاد، MNM آزاد و تکه‌های بسپاری با MNM (به شکل ۳ مراجعه شود) می‌تواند در طول چرخه‌حیات یک کالا در هوا، آب، جامدات (به‌عنوان مثال، خاک) و سیال‌های زیستی رهایش شود. از این‌رو، انتخاب روشی (هایی) برای نمونه‌برداری از مواد رهایش‌یافته ممکن است بسته به محیط مورد نظر (به‌عنوان مثال، هوا در مقابل آب) متفاوت باشد. توجه داشته باشید که انتخاب روش نمونه‌برداری، مستقل از راهبرد اندازه‌گیری کلی نیست. در مقابل، انتخاب روش نمونه‌برداری، آماده‌سازی بعدی (در صورت وجود) و آنالیز به یکدیگر وابسته هستند و همه این مرحله‌های اندازه‌گیری برای به‌دست آوردن داده‌های معنادار در مورد رهایش مواد، مهم هستند. تا به امروز، بیشتر تلاش‌ها برای ارزشیابی رهایش MNM از چندسازه‌ها در درجه اول بر رهایش در هوا متمرکز شده‌اند. این تاکید بر رهایش هوا برده^۱ تا حدی به دلیل علاقه به محافظت از کارگرانی است که اغلب در اوایل چرخه‌حیات MNM [به‌عنوان مثال حین تولید

1- Airborne

دسته اصلی (مستریج)^۱ یا فراوری مواد] در معرض ریسک مواجهه هستند. همچنین به پیامدهای بوم‌شناختی^۲ بالقوه (رهایش در آب، خاک و بافت‌های زیستی) در پایان چرخه‌حیات کالا توجه می‌شود.

۷-۲-۲ نمونه‌برداری مواد رهایش‌یافته در هوا

به‌طور کلی، روش‌های نمونه‌برداری از هواسل‌ها را می‌توان به دو رده تقسیم کرد: دستگاه‌های زمان تثبیت‌شده^۳/آنی^۴ و نمونه‌بردارهای یکپارچه زمانی^۵. هر دو نوع نمونه‌برداری برای ارزشیابی مواجهه بالقوه با نانومواد استفاده می‌شود.

دستگاه‌های نمونه‌برداری آنی این مزیت را دارند که اندازه‌گیری‌های مشخصه‌های ذرات مانند تعداد، جرم، اندازه یا غلظت مساحت سطح در هوا را در لحظه ارائه دهند. با این حال، تمام دستگاه‌های نمونه‌برداری آنی موجود غیراختصاصی هستند و نمی‌توانند MNM مورد نظر را از ذرات هواسل تصادفی (مانند دوده دیزل) با اندازه نانو، متمایز کنند. این امر کاربرد آنها را در شناسایی MNM رهایش‌یافته از چندسازه‌ها را محدود می‌کند، بنابراین آنها در این استاندارد به‌طور مفصل توضیح داده نشده‌اند.

نمونه‌بردارهای یکپارچه زمانی شامل جمع‌آوری ذرات هواسل بر یک بستره برای آنالیز برون‌خط^۶ بعدی است. این روش‌های نمونه‌برداری مزیت اجازه شناسایی MNMs برداشت‌شده با آنالیز برون‌خط را ارائه می‌دهند، اما اغلب نیاز به مرحله‌های آماده‌سازی اضافی پیش از آنالیز دارند.

نمونه‌بردارهای یکپارچه زمانی متعددی برای جمع‌آوری هواسل در دسترس هستند و برخی قادر به جداسازی ذرات براساس اندازه (مانند آئرودینامیک^۷، ترمودینامیک) هستند. در حالی که برخی دیگر از نمونه‌بردارهای یکپارچه زمانی اینطور نیستند. به‌طور کلی، نمونه‌بردارهای یکپارچه زمانی، ذرات با اندازه‌های بسیار بالاتر از مقیاس نانو را جمع‌آوری می‌کنند. با این حال، به‌طور گسترده‌ای تشخیص داده شده است که بسیاری از MNMs کلوخه‌های در مقیاس میکرومتری را در هوا تشکیل می‌دهند یا ممکن است به ذرات بزرگتر که تشکیل هوابرد می‌دهند (به‌عنوان مثال تکه‌های بسیاری) بچسبند یا در آن قرارگیرند که روش‌های یکپارچه زمانی را برای ارزیابی مواجهه مناسب می‌سازد. نمونه‌بردارهای هواسل انتخابی اندازه شامل نمونه‌بردارهای دوبخشی و چندبخشی هستند. نمونه‌بردارهای دوبخشی مانند سیکلون تنفسی آئرودینامیک به‌طور سنتی برای ارزیابی مواجهه شغلی استفاده می‌شود زیرا آنها ذرات را به دو بخش قابل تنفس و غیرقابل تنفس جدا می‌کنند. در این نمونه‌بردارها، کسر قابل تنفس برای آنالیز برون‌خط بعدی روی یک صافی نهشت می‌شود. کسر هواسل قابل تنفس شامل ذراتی با اندازه کوچک است که اجازه نفوذ و نهشت

-
- 1- Masterbatch
 - 2- Ecological
 - 3- Time resolved
 - 4- Real time
 - 5- Time-integrated
 - 6- Off-line
 - 7- Aerodynamic

در ناحیه حباب‌دار^۱ (تبادل گاز) ریه را می‌دهد. بنابراین، این کسر برای بیماری مزمن ریوی مورد توجه است و اغلب برای نمونه‌برداری از MNMs هوابرد استفاده می‌شود [46]، [77] و [83]. نمونه‌بردارهای هم‌ترازی که برای پایش محیطی ذرات معلق محیطی^۲ (PM) ساخته شده‌اند شامل نمونه‌بردارهای PM₁₀، PM_{2.5} و PM₁ هستند که به ترتیب ذرات را با قطر آئرودینامیکی کمتر از ۱۰ μm، ۲٫۵ μm و ۱ μm جمع‌آوری می‌کنند [54]، [78]، [84] و [86]. نمونه‌بردارهای هواسل چندبخشی می‌توانند ذرات را به بخش‌های چند اندازه‌ای جدا کنند و شامل برخوردگرهای^۳ فشار پایین مانند نمونه برنر^۴ (هشت کسر اندازه از ۱۶۰۰۰ nm تا ۶۰ nm) و برخوردگر الکتریکی فشار پایین (۱۲ کسر اندازه از ۶۸۰۰ nm تا ۳۰ nm) [43]، [45]، [87] و [88]؛ سامانه نمونه‌برداری هواسل با گستره وسیع (۱۲ کسر اندازه از ۲۰۰۰۰ nm تا ۲ nm) [47] و [78]؛ برخوردگر نهشتی یکنواخت ریزحفره^۵ (۱۰ کسر اندازه از < ۱۸۰۰۰ nm تا ۵۶ nm) [79]، [80]، [82] و [89] و برخوردگر آبخاری سیوتاس^۶ (پنج کسر اندازه از ۱۰۰۰۰ nm تا ۲۵۰ nm) [80] و [90] می‌شوند. برای ارزشیابی مواجهه مصرف‌کننده، هم توزیع اندازه ذرات و هم ریخت‌شناسی، مشخصه‌یابی می‌شود.

نمونه‌بردارهای یکپارچه زمانی که برای ذرات، اندازه-ویژه نیستند اما همچنان اغلب برای جمع‌آوری MNMs هوابرد استفاده می‌شوند، شامل نمونه‌بردارهای کاست^۷ پلاستیکی و نمونه‌بردارهای پوششی رسانا هستند [38]–[41]، [46]، [47]، [77]، [80]، [81]، [91]–[99]. نمونه‌بردارهای کاست پلاستیکی را می‌توان با استفاده از پیکربندی «روبسته» که در آن هوا از طریق ورودی ۴ mm به داخل نمونه‌بردار کشیده می‌شود یا در پیکربندی «روباز» که بخش بالایی کاست به همراه ورودی حذف شده است، به کار گرفت. نمونه‌بردارهای پوششی رسانا از پیکربندی روباز استفاده می‌کنند و در ابتدا برای نمونه‌برداری از الیاف آزبست توسعه داده شدند. با این حال، اکنون از آنها برای جمع‌آوری MNMs با نسبت منظر بالا مانند MWCNT و الیاف کربن استفاده می‌شود.

صرف‌نظر از نوع نمونه‌بردار یکپارچه زمانی مبتنی بر صافی، انتخاب صافی مورد استفاده به‌عنوان بستر جمع‌آوری، ملاحظه مهمی است زیرا باید تابع روش آنالیزی مورد نظر باشد (در زیر بحث می‌شود). به‌عنوان مثال: صافی‌های PC «شیار حک‌شده»^۸ دارای ظاهری صاف هستند و برای جمع‌آوری ذرات برای آنالیز EM بعدی استفاده می‌شوند. صافی‌های پلی (تترافلوئورواتیلن)^۹ دارای پایداری وزنی خوبی هستند و برای جمع‌آوری ذرات برای تعیین جرم گرانشی استفاده می‌شوند.

-
- 1- Alveolar
 - 2- Particulate Matter
 - 3- Impactor
 - 4- Berner
 - 5- Micro-Orifice Uniform Deposit
 - 6- Sioutas
 - 7- Cassette
 - 8- Track-etched
 - 9- Poly (Tetrafluoroethylene)

صافی‌های مخلوط استر سلولز و پلی وینیل کلرید به راحتی در اسیدها هضم می‌شوند و برای جمع‌آوری ذرات برای تعیین جرم عنصری با طیف‌سنجی اتمی و آنالیز وزنی و تعداد ذرات، ریخت‌شناسی و ترکیب‌بندی شیمیایی با آنالیز TEM استفاده می‌شوند و صافی‌های الیاف کوارتز پایداری خوبی در دماهای بالا دارند و برای جمع‌آوری نانومواد کربنی مانند MWCNT برای آنالیز عبور نوری گرمایی (TO) (کربن آلی/عنصری) استفاده می‌شوند.

علاوه‌براین، نمونه کافی باید روی صافی یا بستره جمع‌آوری شود تا محدودیت‌های آشکارسازی آنالیزی برطرف شود. چندین گزینه برای افزایش جمع‌آوری مواد وجود دارد. به‌عنوان مثال، در مطالعات آزمایشگاهی رهایش MWCNT از چندسازه‌ها، محققین می‌توانند یک محفظه یا بدنه در اطراف سامانه آزمایشی بسازند تا هواسل منتشرشده را برای نمونه‌برداری متمرکز کنند [40]–[42]، [44]، [45]، [61]، [86]، [89]، [100]–[107]. روش دیگر برای افزایش جمع‌آوری، افزایش زمان نمونه‌برداری است. برای مثال، حین جمع‌آوری مواجهه کارگران با هواسل، اندازه‌گیری‌های معمولی براساس مدت زمان ساعت کاری است و می‌تواند تا ۸ ساعت طول بکشد [108]. درصورت ارزیابی مواجهه مصرف‌کننده با هواسل [109]، زمان نمونه‌برداری کوتاه‌تر از مدت زمان نمونه‌برداری در محل کار معمولی است زیرا مواجهه مصرف‌کننده براساس برنامه ساعت کاری نیست. بااین‌حال، درصورت لزوم، نمونه کافی را می‌توان با تلفیق نمونه‌برداری‌های متعدد جمع‌آوری کرد. برای نمونه‌برداری مانند کاست‌ها و پوشش‌های آزیست، نرخ‌های معمول جمع‌آوری نمونه یک تا دو لیتر هوا در دقیقه حین انجام نمونه‌برداری در ساعت کاری کامل است، اما این نرخ‌های جریان را می‌توان به ده‌ها لیتر در دقیقه افزایش داد تا جمع‌آوری افزایش یابد. بااین‌حال، باید توجه داشت که افزایش نرخ جریان جمع‌آوری هوا برای نمونه‌بردارهایی که ذرات را براساس اندازه جدا می‌کنند، عملکرد نمونه‌بردار را تغییر می‌دهد. به‌عنوان مثال، افزایش نرخ جریان، نقطه برش‌های^۱ اندازه آئرو‌دینامیکی مرحله‌های برخوردگر را کاهش می‌دهد یا ممکن است به انواع مختلفی از محیط‌های صافی یا اندازه منافذ صافی‌ها برای تطبیق با افزایش نرخ جریان نیاز داشته باشد [110].

نوع دیگر نمونه‌بردار یکپارچه زمانی، رسوب‌دهنده است. دو نوع اصلی رسوب‌دهنده وجود دارد: رسوب‌دهنده الکتروایستا (ESP)^۲ و رسوب‌دهنده گرماکوجی (TP)^۳. هر دو نوع اغلب برای نمونه‌برداری برای MNMs هوابرد استفاده می‌شوند [42]، [44]–[47]، [61]، [77]، [78]، [101]–[106]، [111]–[115]. رسوب‌دهنده‌ها مزیت مهمی نسبت به نمونه‌برداری دارند که از صافی‌ها استفاده می‌کنند، زیرا ذرات را مستقیماً روی توری‌ها^۴ (برای آنالیز TEM) یا بستره‌های مسطح (برای آنالیز SEM یا AFM) جمع‌آوری می‌کنند، در نتیجه نیاز به آماده‌سازی بعدی نمونه را از بین می‌برند. با یک ESP، هواسل از طریق نمونه‌بردار کشیده می‌شود و ذرات به‌طور هم‌زمان در یک میدان الکتریکی با ولتاژ بالا شارژ و با استفاده از یک سطح صاف که نمونه‌برداری بستره (توری) به‌عنوان کاتد نصب شده است، جمع‌آوری می‌شود. برای یک TP، هوا بین دو

1- Cut-Off
2- Electrostatic
3- Thermophoretic
4- Grids

صفحه موازی که دارای اختلاف دما هستند کشیده می‌شود. ذرات با رهایش از صفحه داغ دور می‌شوند و روی توری که روی صفحه سرد قرار دارد جمع می‌شوند [116]. یک تغییر در رویکرد نمونه‌برداری مستقیم ذره به توری از رسوب‌دهنده‌ها، چسباندن یک توری EM به صافی است که در یک نمونه‌بردار کاست نگهداری می‌شود [38]، [80]، [119]–[117]، باین‌حال، مشخصه‌های عملکردی این رویکرد نمونه‌برداری ناشناخته است.

۷-۲-۳ نمونه‌برداری از مواد رهایش‌یافته در آب، جامدها و سیال‌های زیستی

مطالعات رهایش MWCNT از چندسازه‌ها در آب محدود است و هیچ اطلاعاتی برای رهایش در جامدها یا سیال‌های زیستی در دسترس نیست. بوسکتس فیته^۱ و همکاران [29] چندسازه‌های اتیل وینیل استات^۲، پلی‌پروپیلن و PA-MWCNT را در یک محفظه با استفاده از [231] ISO 4892-3 در مواجهه پیرسازی سریع (نور UV) و هوازگی (قسمت‌های باران شبیه‌سازی‌شده) قرار دادند. پس از مواجهه‌ها، آنالیز آب باران با استفاده از TEM تکه‌های چندسازه‌ای را شناسایی کرد، اما MWCNTs را شناسایی نکرد. فرناندز روزاس^۳ [30] رهایش MWCNTs از چندسازه‌های PA6 را پس از پیرسازی مرطوب با استفاده از ترکیبی از آنالیز وزن‌سنجی و گرماوزن‌سنجی اندازه‌گیری کرد. اگرچه این روش سریع و نسبتاً ساده بود، نویسندگان اشاره کردند که برای ارزیابی تأثیر کامل، مواد رهایش‌یافته باید جمع‌آوری و آنالیز شوند تا شکل و سایر مشخصه‌های فیزیکی و شیمیایی آن‌ها مشخصه‌یابی شود.

اگرچه تنها چند مطالعه، MWCNTs رهایش‌یافته در مایع‌ها را بررسی کرده‌اند، روش‌های نمونه‌برداری و آنالیز مرتبط را می‌توان از مطالعات رهایش مربوط به انواع دیگر ذرات جاسازی‌شده استنباط کرد. به‌عنوان مثال، بوت^۴ و همکاران [120] رهایش کربن سیاه از چندسازه‌های پلی‌اتیلن کم‌چگالی بسته‌بندی مواد غذایی را با استفاده از «جزء‌جزء کردن جریان با میدان نامتقارن» (AF4)^۵ (برای آماده‌سازی نمونه و جداسازی ذرات) جفت‌شده با پراکندگی نور چند زاویه‌ای (برای آشکارسازی) بررسی کردند. آنها هیچ‌گونه رهایش نانوذرات کربنی را تحت شرایط آزمون شده با محدودیت آشکارسازی ۱۲ µg/Kg مشاهده نکردند. با توجه به اینکه MWCNTs و کربن سیاه ترکیب عنصری مشابهی دارند، این روش باید با آنالیز رهایش MWCNT سازگار باشد. علاوه‌براین، بسیاری از مطالعات، رهایش ذرات فلزی نیم‌رسانا یا اکسید فلزی را به مایع‌های محیطی یا شبیه‌سازهای غذایی بررسی کرده‌اند (برای مروری بر این منابع علمی به منبع [55] مراجعه کنید). بیشتر این مطالعات مستقیماً از محیط مایع با استفاده از ICP-MS یا معادل آن برای کمی‌سنجی جرم نانوذرات، گاهی اوقات با استفاده از روش‌های جداسازی انتهایی یا حالت‌های تفکیک زمانی برای جداسازی ذرات از بخش‌های محلول نمونه‌برداری کرده‌اند. در برخی از این

1- Busquets-Fité

2- Ethyl Vinyl Acetate

3- Fernandez-Rosas

4- Bott

5- Asymmetric FLOW Field FLOW Fractionation

مطالعات سناریوهای رهایش کاملاً غیرفعال بودند [36]، [121] درحالی که برخی دیگر (به‌عنوان مثال مرجع [45] کتاب‌نامه) هوازگی ته‌اجمی تری را با اعمال شرایط سایش به‌عنوان مثال، مواردی که در استاندارد ISO 11998 [232] مشخص شده است، شبیه‌سازی کردند. این افزاره یک محلول سایشی آبی را روی یک سطح پوشش داده شده پمپ می‌کند و بافر سایشی به‌صورت خطی روی نمونه مالیده می‌شود تا اصطکاک پویا ایجاد کند و ذرات رهایش‌یافته در مایع جمع‌آوری شوند که می‌توان آنها را با روش‌های آنالیزی مرسوم آنالیز کرد. اگرچه لازم به ذکر است که روش‌های نمونه‌برداری مبتنی بر ICP-MS مستقیماً برای آشکارسازی MWCNTs رهایش‌یافته قابل استفاده نیستند، زیرا آنها به‌طور اسمی برپایه کربن هستند، کمی‌سنجی MWCNTs در محیط مایع با استفاده از ICP-MS از طریق آشکارسازی مقدار اندک فلزات باقی‌مانده از فرایند تولید MWCNT امکان‌پذیر است [122].

مطالعات در مورد سرنوشت MWCNTs در آب [123]، [125]، جامدات [126,127] و بافت‌ها و سیال‌های زیستی [126]-[128] منتشر شده‌اند و بینش‌های مفید دیگری برای جمع‌آوری نمونه در سناریوهای رهایش چندسازه ارائه می‌دهند. این مطالعات نشان داده‌اند که MWCNTs پراکنده در آب‌های حاوی مواد آلی طبیعی^۱ (NOM) به خوبی پراکنده می‌مانند [125]-[123]. در مقابل، هالبروک^۲ و همکاران [124]، نشان دادند که وجود کائولن و آلژینات‌ها در آب‌ها باعث افزایش لخته‌شدن MWCNT می‌شود و ژانگ^۳ و همکاران [125] گزارش کردند که رسوب‌های موجود در آب سخت یا آب دریا به راحتی MWCNTs را جذب می‌کنند. از این رو، وجود برخی ترکیبات آب در سناریوهای رهایش، پیامدهای مهمی برای جمع‌آوری نمونه دارد. به‌طور خاص، اگر فقط NOM وجود داشته باشد، MWCNTs احتمالاً به خوبی در تعلیق پراکنده می‌شوند و نمونه نماینده را می‌توان از هر نقطه‌ای از آب برداشت. در مقابل، اگر کائولن یا آلژینات‌ها (آب شیرین) یا رسوب‌ها (آب دریا) وجود داشته باشند، MWCNTs لخته شده یا جذب ذرات رسوب می‌شوند که ممکن است به جمع‌آوری نمونه از کف آب و/یا مرحله‌های آماده‌سازی نمونه (به‌عنوان مثال گریزانه^۴ برای جداسازی جامدات از مایعات) اضافی نیاز داشته باشند. با توجه به مواد جامد، پترسن^۵ و همکاران [126]، رسوب رودخانه حاوی کود گیاهی را با MWCNTs تقویت کردند و با غلتاندن توانستند لوله‌ها را به‌طور همگن در سراسر زمینه پراکنده کنند. پروتکل مشابهی در مطالعه بعدی توسط پترسون و همکاران [127] برای پخش همگن MWCNTs در خاک استفاده شد. مطالعات جذب MWCNT به بافت‌ها، به‌عنوان مثال، توسط ماهی [128]، کرم‌های آبی [126] و کرم‌های خاکی [127] به سادگی شامل برداشت اندامگان‌ها از محیط با استفاده از یک تور یا الک است.

1- Natural Organic Matter
 2- Holbrook
 3- Zhang
 4- Centrifuge
 5- Petersen

۷-۳ روش‌های آماده‌سازی نمونه‌هایی از مواد رهایش‌یافته برای آنالیز بعدی

۷-۳-۱ کلیات

آماده‌سازی نمونه مرحله دوم یک راهبرد اندازه‌گیری کلی است. روش آماده‌سازی به روش آنالیزی مورد استفاده بستگی دارد. همانند جمع‌آوری، بسیار مهم است که مرحله آماده‌سازی نمونه، خواص MWCNTs را در همان حالتی که در زمینه‌ای که در آن رهایش‌یافته‌اند، حفظ کند.

۷-۳-۲ آماده‌سازی و آنالیز نمونه‌های هوا

جمع‌آوری ذرات هواسل به‌طور مستقیم روی توری‌های میکروسکوپی یا بستره‌های مسطح (مانند میکا، ویفرهای سیلیکونی) با استفاده از رسوب‌دهنده‌ها نیازی به آماده‌سازی نمونه ندارد. بستره به سادگی از افزاره نمونه‌برداری جدا می‌شود و در نگهدارنده نمونه دستگاه TEM، SEM یا AFM قرار می‌گیرد. از این‌رو، این بند فقط به دستکاری نمونه‌های صافی برای آنالیزهای برون‌خط می‌پردازد.

متداول‌ترین مرحله‌های آماده‌سازی نمونه توصیف‌شده برای صافی‌ها، برای آنالیز بعدی با استفاده از TEM یا SEM است. برای EM، تا زمانی که نمونه با خلاء سازگار باشد و سطح نمونه رسانای الکتریکی باشد آماده‌سازی نمونه نسبتاً ساده است [67]، [114]، [129]. برای بستره‌های SEM با سطح صاف (مثلاً صافی‌های رایانه شخصی یا ورقه‌های آلومینیومی)، یک قطعه با استفاده از چاقوی جراحی برش داده می‌شود، با استفاده از کاست کربنی دو طرفه یا سایر چسب‌های رسانا روی یک قطعه خرد می‌شود و با مواد رسانا مانند کربن، پلاتین، طلا و/یا پالادیوم پوشانده می‌شود [33]، [40]، [41]، [43]، [47]، [60]، [61]، [87]، [92]، [96]، [98]، [105]، [130]، [131]. در TEM، الکترون‌ها از میان آزمون برای تولید تصاویر با وضوح بالا عبور می‌کنند. بنابراین، نمونه‌های TEM باید به اندازه کافی نازک (۱۰۰ nm یا کمتر) باشند تا شفافیت الکترونی داشته باشند. اگر بستره دارای سطح ناهموار ضخیم مانند صافی‌های MCE باشد، مرحله‌های آماده‌سازی اضافی (رمبش^۱ و پاکسازی) ضروری است زیرا ذرات می‌توانند در شیارها و منافذ نهشت‌شده و از دید پنهان شوند. بیشتر روش‌های اجرای رمبرش و تمیز کردن صافی‌های MCE، گونه‌ای از روش NIOSH 7402، آزیست با TEM هستند و برای آماده‌سازی نمونه‌ها برای آنالیز TEM استفاده می‌شوند (اگرچه اگر نمونه با ماده رسانا پوشده شده باشد، می‌توان از SEM نیز استفاده کرد) [99]. در این روش اجرائی، بخشی از صافی MCE روی یک توری استاندارد ۳ میلی‌متری TEM قرار می‌گیرد و با استفاده از استون [39]، [81]، [95]، [97]، کلروفرم [92] یا ۵۰٪ آب / ۳۵٪ دی‌متیل‌فرم‌آمید / ۱۵٪ بخار استیک اسید گلاسیال رمبریده و شفاف می‌شود [132]. روش اجرائی دیگری که برای آماده‌سازی نمونه‌ها برای آنالیز TEM گزارش شده، غوطه‌ور کردن صافی‌های PC در استون، پراکنده کردن ذرات با هم زدن مافوق‌صوت و فرو بردن یک توری میکروسکوپی در تعلیق [40] یا ریختن قطره‌ای از تعلیق روی توری [41] است.

1- Collapsing

آنالیز کربن عنصری/کربن آلی^۱ (EC/OC) یکی دیگر از روش‌های رایج آنالیز صافی برای اندازه‌گیری کربن آلی و کربن عنصری است. در آنالیز EC/OC، ذراتی که روی صافی‌های الیاف کوارتز^۲ (QFF) جمع‌آوری شده‌اند، به‌صورت تدریجی گرم می‌شوند تا اجزای کربن را اکسید کنند. در این روش، کسر EC به‌عنوان نشانگر برای MWCNTs براساس این فرض که CNTs دارای محتوای OC ناچیز [39]، [80]، [81]، [90]، [95]، [133]، [137] هستند، استفاده می‌شود. بیشتر آنالیزهای EC/OC انواعی از روش، مواد ذرات دیزل (به‌عنوان کربن عنصری) [139] هستند که از روش آنالیز نوری گرمایی (TO) استفاده می‌کند. در این روش‌ها، معمولاً یک بخش 1.5 cm^2 از یک صافی برای آنالیز برداشته می‌شود، با این حال، اگر ذرات به‌طور یکنواخت در سطح صافی حین جمع‌آوری توزیع نشده باشند، بخش‌های متعدد صافی یا کل صافی باید برای تعیین دقیق محتوای EC آنالیز شوند [80].

اگر از یک صافی با وزن ثابت برای جمع‌آوری نمونه استفاده شده باشد، می‌توان آن را پیش و پس از قرارگیری در شرایط کنترل‌شده دما و رطوبت یکسان وزن کرد تا جرم کل ذرات گرفته‌شده در طول آزمون رهایش تعیین شود. خود نمونه چندسازه همچنین می‌تواند به همین روش، پیش و پس از قرارگیری در شرایط کنترل‌شده وزن شود تا جرم ماده‌ای که در طول آزمایش رهایش یافته است، تعیین شود [31]، [60]، [61]. آنالیز بعدی نمونه‌های صافی با طیف‌سنجی اتمی، روشی حساس برای تعیین سطوح پایین فلزات در هوا سل‌ها است [47]، [78]–[80]، [82]، [95]. طیف‌سنجی اتمی برای کمی‌سنجی توده‌های نانوذرات هوا برد (مثلاً مس، به منبع [83] کتاب‌نامه مراجعه شود) یا توده‌های آلودگی کاتالیزگر باقی‌مانده (مانند نیکل یا کبالت) به‌عنوان نشانگر MWCNTs استفاده شده است. پیش از کمی‌سنجی فلزات، کل نمونه صافی مخلوط سلولز استر یا پلی‌وینیل‌کلرید با استفاده از اسیدها و/یا عملیات حرارتی مانند بلوک داغ^۳ یا ریزموج در معرض انحلال قرار می‌گیرد. انتخاب دقیق اسیدها و یا عمل‌آوری گرمایی مختص فلز مورد نظر است، اگرچه روش‌های استاندارد رایج شامل روش US EPA 3051 - هضم/اسیدی رسوب‌ها، لجن‌ها، خاک‌ها و روغن‌ها به کمک ریزموج [140]، روش NIOSH 7300، عناصر با ICP (خاکسترسازی نیتریک / پرکلریک اسید) [138] و روش NIOSH 7303، عناصر با ICP (هضم با بلوک داغ / HNO_3/HCl) است [141]. برای سناریوهای رهایش چندسازه، اگر MWCNTs را بتوان با یک فلز منحصر به فرد برچسب‌گذاری کرد، آنالیز صافی‌های هوا می‌تواند به‌عنوان یک شاخص کیفی رهایش استفاده شود.

روش‌های آماده‌سازی صافی که در بالا ذکر شد برای آنالیز مستقیم مواد جمع‌آوری‌شده روی بستره استفاده می‌شود. با این حال، با فراوری تکمیلی، مواد را می‌توان با روش‌های آنالیزی از جمله شمارش کلوئید و AUC آنالیز کرد. به‌عنوان مثال، یک صافی را می‌توان در یک مایع مناسب و در معرض هم‌زدن مافوق صوت قرار داد تا ذرات (تکه‌ها و MWCNTs آزاد) از بستره حذف شده و آنها را در مایع برای اندازه‌گیری بعدی با پراش لیزری یا AUC [60,61] یا طیف‌سنجی فرابنفش-مرئی (UV-Vis) [142] پراکنده کرد.

1- Organic Carbon
2- Quartz Fibre Filters
3- Hotblock

در برخی موارد، جرم تکه‌های رهایش‌یافته در هوا می‌تواند نسبتاً زیاد باشد (مانند سنباده‌زدن) یا در مدت زمان طولانی (مانند هوازدگی UV)، به‌طوری‌که جمع‌آوری ذرات بدون انتخاب اندازه (برای کسر قابل تنفس^۱ یا قابل استنشاق) روی بستره امکان‌پذیر نیست. در این موارد، محققین مواد را از سطوح محفظه اطراف نمونه بازیابی کرده [61]، [60] یا از صفحات ته‌نشینی [31] استفاده می‌کنند. هنگامی که مقادیر کافی از مواد رهایش‌یافته در دسترس باشد، پودر سست را می‌توان برای آنالیز با استفاده از طیف‌سنجی فوتوالکترون پرتو ایکس^۲ (XPS) برای تمایز برآمدگی‌های MWCNT از پس‌زمینه بسیاری با استفاده از تغییر در طیف‌های C(1s) لوله‌ها، در یک نگهدارنده نمونه فشرده کرد [41]، [143]، [48].

۷-۳-۳ آماده‌سازی و آنالیز نمونه‌های آب، جامدات و سیال‌های زیستی

با آماده‌سازی مناسب نمونه، بسیاری از روش‌های آنالیز مشابه که برای آنالیز نمونه‌های هوا استفاده می‌شوند، برای آب‌ها، جامدات و سیال‌های زیستی نیز قابل استفاده هستند. برای آنالیز EM مواد رهایش‌یافته در آب، مقدار کمی از تعلیق مستقیماً روی بستره‌ای مانند پایه نمونه^۳ SEM [142]، [124]، [88]، [29] یا یک توری TEM [29]، [123]، [144]، [145] پیپت‌شده و اجازه داده می‌شود در هوا یا در کوره خشک شود. اگر یک نمونه آبی دارای گستره وسیعی از اندازه ذرات باشد، ممکن است پیش از قرار دادن تعلیق روی بستره، آماده‌سازی تکمیلی نمونه لازم باشد. به‌عنوان مثال، کایگی^۴ و همکاران [145]، از فرایند گریزانه دو مرحله‌ای برای جداسازی نانوذرات نقره از آب باران استفاده کردند. ابتدا مقدار کافی از آب در نیروی g پایین برای حذف ذرات بزرگ گریزانه شد و سپس با گریزانه دوم با نیروی g بالاتر برای جمع‌آوری نانوذرات روی توری‌های TEM که در پایین لوله گریزانه قرار گرفته‌اند، دنبال شد. روش دیگر، تاگماترچیس^۵ و همکاران [144]، MWCNTs را از مواد بی‌شکل در یک تعلیق بافری با جزء جزء کردن جریان با میدان جداسازی کردند و از تعلیق MWCNT شویش‌شده برای جمع‌آوری روی نمونه‌های توری آنالیز TEM استفاده کردند. روش‌های متعدد دیگری برای پیش‌شکستگی نانوذرات از ذرات بزرگ در تعلیق‌های آبی، خاک‌ها و سیال‌های زیستی (مانند شیر) با استفاده از الکتروکوپچی موینه^۶ و انواع کروماتوگرافی (مانند هیدرودینامیک، تبادل یونی^۷، اندازه‌گزین^۸) وجود دارد. این روش‌های پیش‌شکستگی را می‌توان همراه با روش‌های آنالیزی مانند طیف‌سنجی فرابنفش-مرئی و طیف‌سنجی اتمی استفاده کرد و خواننده برای اطلاعات بیشتر در مورد این روش‌های اجرایی به مقالات مروری بندیوپادی^۹ و همکاران [146]، تیده^{۱۰} و همکاران [147] و دانکن^{۱۱} و

-
- 1- Respirable
 - 2-X Ray Photoelectron Spectroscopy
 - 3- Stub
 - 4- Kaegi
 - 5-Tagmatarchis
 - 6- Capillary Electrophoresis
 - 7- Ion Exchange
 - 8- Size Exclusion
 - 9- Bandyopadhyay
 - 10- Tiede
 - 11- Duncan

سینگ^۱ [148] ارجاع داده می‌شود. در نهایت، در صورت تمایل به آنالیز نمونه‌های مرطوب، نگهدارنده‌های نمونه تخصصی [147] و SEMs فشار متغیر [149] می‌تواند برای اندازه‌گیری MWCNTs در آب و سیال‌ها و بافت‌های زیستی استفاده شود.

عبور TO یک روش استوار^۲ است که می‌تواند برای آشکارسازی EC نه تنها در هوا، بلکه در آب، خاک و سیال‌های زیستی استفاده شود [60]، [123]، [135]. در یک مطالعه توسعه روش‌ها، دودریک^۳ و همکاران [135]، تعلیقه‌های MWCNT را در آب‌ها (سطحی، شیرهای شهری، پساب)، جامدات (رسوب رودخانه‌ای) و سیال‌ها و بافت‌های زیستی (باکتری‌های خشک شده به وسیله انجماد سخت^۴، ادرار مصنوعی، سرم انسانی، بافت ریه و شیر گاو تجاری در دسترس)، مواد را روی صافی‌های الیاف کوارتز نهشت داده، خشک کرده و با موفقیت از آنالیز عبوری TO (همراه با طیف‌سنجی رامان) برای کمی‌سنجی توده‌های EC در نمونه‌ها استفاده کرد.

طیف‌سنجی اتمی همچنین برای آنالیز آب‌ها، خاک‌ها و سیال‌های زیستی کاربردی است [145]. همانند صافی‌های هوا، نمونه‌ها ابتدا باید با استفاده از آماده‌سازی‌های شیمیایی و گرمایی مختلف هضم شوند، اگرچه روش‌های استاندارد زیادی برای این منظور وجود دارد (مانند EPA 3051 [140]). همانند نمونه‌های هوا، کاربرد طیف‌سنجی اتمی در آب‌ها، خاک‌ها و سیال‌های زیستی برای آشکارسازی MWCNTs، چه با یک فلز نشانه‌گذاری شده یا حاوی کاتالیزگرهای باقی‌مانده باشند، به اطلاعات کیفی محدود می‌شود. یک جایگزین برای آنالیز فلزات با طیف‌سنجی اتمی، شمارش سوسوزن^۵ MWCNTs نشاندار شده پرتویی است. چندین مقاله منتشر شده [128]-[125] حساسیت و کاربرد شمارش سوسوزن برای آشکارسازی و کمی‌سنجی MWCNTs نشاندار شده در آب، خاک‌ها (رسوب، کود کشاورزی) و سیال‌های زیستی (محتوای روده کرم خاکی) و بافت‌ها (ماهی، کرم‌های خاکی، کرم‌های آبزی) را نشان داده‌اند. برای آب، آماده‌سازی نمونه شامل رقیق کردن نمونه‌ها با کوکتیل^۶ سوسوزن پیش از شمارش است. برای آماده‌سازی جامدات و سیال‌های زیستی، نمونه‌ها با انجماد خشک شده، در یک اکسیدکننده زیستی سوزانده شده و با کوکتیل سوسوزن پیش از شمارش مخلوط شدند. در حالی که شمارش سوسوزن یک روش استوار است که برای گستره وسیعی از زمینه‌ها قابل استفاده است، یک نقطه ضعف بالقوه این رویکرد استفاده از مواد پرتوزا و تولید پسماندهای پرتوزا از آزمون است.

1- Singh
 2- Robust
 3- Doudrick
 4- Lyophilized
 5- Scintillation
 6- Cocktail

۷-۴ چالش‌های اندازه‌گیری

۷-۴-۱ کلیات

براساس داده‌های موجود، منطقی است که فرض کنیم نمونه مورد نظر از یک سناریوی رهایش معین، مجموعه‌ای از بسیاری از هستارها^۱ (تکه‌ها، MNMs غیرپیوندی، یا هر دو) در مقابل یک تکه یا MNM است. تعداد زیادی از مشخصه‌های احتمالی یک نمونه وجود دارد که می‌توان آنها را اندازه‌گیری کرد (به‌عنوان مثال توزیع اندازه). در نظر گرفتن فرمول‌بندی مشکل و عوامل کلیدی تعیین‌کننده سمیت می‌تواند به تمرکز راهبرد آنالیزی روی عناصر مهم کمک کند. علاوه بر پیچیدگی نمونه رهایش یافته، چالش‌های متعددی به‌طور خاص با اندازه‌گیری MNMs در زمینه‌های پیچیده مرتبط است که در زیر مورد بحث قرار می‌گیرد. در نهایت، معمولاً آنالیز نانومواد با موانع آنالیزی مرسوم‌تری مانند تکرارپذیری و صحت‌گذاری روش، در دسترس بودن RMS مناسب، دشواری شناسایی مواد یا فرایندهای کنترلی و مسائل مدیریت منابع (هزینه و تخصص) نیز مواجه می‌شود. اگرچه این مسائل در این استاندارد بیشتر توضیح داده نخواهد شد، اما در نظر گرفتن آنها در زمینه فرمول‌بندی مسئله در تعیین راهبرد آنالیزی مناسب حیاتی است.

۷-۴-۲ عامل‌دار کردن و استحاله‌های سطح

مساحت سطح بزرگ و واکنش‌پذیری انواع MWCNT دستوار می‌تواند جذب آلاینده‌ها از محیط اطراف را پس از رهایش افزایش دهد. این عامل‌دار کردن سطح می‌تواند منجر به استحاله‌های فیزیکی و شیمیایی شود که بر اندازه‌گیری‌ها تأثیر می‌گذارد. نوع عامل‌دار کردن و استحاله‌های حاصل بسته به حالت چرخه‌حیات محصول متفاوت خواهد بود. به‌عنوان مثال، به‌طور گسترده‌ای شناخته شده است که سطوح MWCNTs آب‌گریز هستند، بنابراین اغلب آنها را برای بهبود پراکنه در دسته‌های اصلی بسیار در طول تولید، عامل‌دار می‌کنند (مثلاً با گروه‌های عاملی کربوکسیلیک اسید). نانولوله‌های کربنی چنددیواره اگر در حین استفاده در هوا رهایش یابند (به‌صورت جداگانه یا بیرون‌زده از تکه‌های بسیاری) می‌توانند اکسید شوند و در نتیجه واکنش‌پذیری سطح را تغییر دهند. اگر در طول مرحله پایان عمر چرخه‌حیات به بسترهای آبی رهایش یابند، وجود ماده آلی یا سایر ترکیبات آب، شیمی سطح و رفتار MWCNTs را در تعلیق تغییر می‌دهد [125]-[123]، [150].

۷-۴-۳ آلاینده‌های^۲ جمع‌آوری نمونه

انتخاب مناسب یک افزاره نمونه‌برداری و شرایط جمع‌آوری، اولین فرصت در یک راهبرد اندازه‌گیری برای حصول اطمینان از این است که نمونه‌ای نماینده برای آنالیز به‌دست آمده، است. به‌عنوان مثال، اگر هدف اندازه‌گیری به‌دست آوردن اطلاعاتی در مورد ابعاد فیزیکی ذرات با استفاده از EM باشد، ناحیه صافی

1- Entities
2- Artefacts

برش داده شده و نصب شده برای آنالیز باید نماینده کل صافی باشد. در صورتی که ذرات به طور یکنواخت در سراسر صافی قرار نگرفته باشند، امکان ارزیابی نمونه برداری هنگام برش وجود دارد. یک رویکرد برای به دست آوردن یک بخش صافی نماینده، استفاده از نمونه بردار مجهز به کلاهک^۱ رسانا است که برای ایجاد نهشت یکنواخت در سراسر سطح صافی طراحی شده است.

۷-۴-۴ کاربرد یک روش اندازه گیری برای یک محیط رهائش معین

چندسازه های بسپاری MNM و مواد رهائش یافته از چندسازه ها در طول چرخه حیات خود با محیط های مختلف تماس خواهند داشت. چنین محیطی می تواند: محیط زیست (به عنوان مثال هوا، آب و مواد جامد مخلوط مانند خاک)، زیستی (مانند بزاق، خون و بافت) یا ساخت انسان (به عنوان مثال مواد شیمیایی و سایر محصولات در خاک چال ها) باشد. سناریوی رهائش، محیط ها را تعیین خواهد کرد. به عنوان مثال، در مورد خردایش یا سنباده زنی چندسازه های بسپاری MNM برای تولید یک محصول، مواد به احتمال زیاد در هوا آزاد می شوند. در مورد «هوازگی» یک محصول، نیروهای محرک نوری (تابش UV) همچنین شیمیایی (آب) می توانند منجر به تخریب بسپار و به احتمال زیاد رهائش متعاقب آن MNMs در آب یا خاک اطراف شود. ضروری است که روش آنالیزی انتخاب شده خواص MNM یا زمینه را از حالت آنها در زمان جمع آوری نمونه تغییر ندهد. برای مثال، TEM از یک باریکه الکترونی با انرژی بالا برای کندوکاو آزمون استفاده می کند و خود باریکه می تواند باعث تغییراتی در خواص نانوذرات مانند اندازه شود، برای مثال با تورم القاشده از باریکه [151]. به همین ترتیب، آماده سازی نمونه های خاک برای آنالیز ICP-MS مستلزم سازگاری هضم زمینه با سخت افزار دستگاه است که مطمئناً اطلاعات مربوط به ذرات را همان طور که به طور طبیعی در خاک وجود دارند، از بین می برد.

۷-۴-۵ آلاینده های آماده سازی نمونه

آماده سازی مناسب نمونه برای حصول اطمینان از نتایج اندازه گیری معنادار، حیاتی است. متأسفانه، آماده سازی نمونه اغلب با جزئیات کافی در گزارش های موجود توضیح داده نمی شود. هنگام آماده سازی نمونه ها برای EM از تعلیقه های آبی، اگر کشش سطحی قطره آب، ذرات را در تماس با تبخیر مایع بکشد، می تواند باعث آلاینده خشک^۲ شود. برای جلوگیری از این مشکل، بسترهای TEM و SEM را می توان با یک پوشش باردار (مثبت یا منفی) در مقابل بار سطح ذرات مورد نظر، عامل دار کرد. پوشش باردار روی بستر، ذرات باردار مخالف را در جای خود نگه می دارد که به کاهش آثار آلاینده خشک کننده کمک می کند و نمونه هایی که به خوبی پراکنده می شوند را برای آنالیز بهبود می دهد. مثال دیگر آماده سازی ذراتی است که روی یک صافی برای شمارش کلونیدی جمع آوری شده اند. اغلب، یک صافی در یک مایع غوطه ور می شود و در معرض هم زدن مافوق صوت قرار می گیرد تا ذرات از جای خود خارج شوند، باین حال، اگر بازده حذف

1- Cowl Sampler
2- Drying Artefact

ذرات از صافی برای همه اندازه‌های ذرات یکسان نباشد، با این روش پراکنه، احتمال آریبی وجود دارد. یک رویکرد جایگزین می‌تواند جمع‌آوری ذرات به‌طور مستقیم در محیط آنالیزی با استفاده از یک جداساز برخوردی^۱ یا افزاره مشابه باشد.

۶-۴-۷ قابلیت یک روش اندازه‌گیری

برای هر ویژگی مورد نظر، روش‌های اندازه‌گیری متعددی وجود دارد که برای MNMs قابل اجرا هستند و هر روش دارای مزایا و معایب منحصربه‌فردی است. استفاده از چندین روش اندازه‌گیری تکمیلی و تاییدی برای اطمینان از مجموعه داده‌های استوار توصیه می‌شود. به‌عنوان مثال، اندازه تکه‌های رهایش‌یافته از چندسازه‌های بسپاری MNM می‌تواند از صدها نانومتر تا صدها میکرومتر متفاوت باشد که در مقایسه با قطر تک تک MNMs (مثلاً در حد چند نانومتر) بسیار بزرگ است. تعداد کمی از روش‌ها می‌توانند به‌طور دقیق در چنین گستره وسیعی از مقیاس‌های اندازه، اندازه‌گیری کنند. در یک مطالعه، وولبن^۲ و همکاران [61] استفاده از پراش لیزر را برای اندازه‌گیری توزیع اندازه مواد ساییده‌شده رهایش‌یافته از یک چندسازه گزارش کردند. این روش زیر ۲۰۰ nm حساس نیست، بنابراین یک روش مکمل دوم، AUC (محدوده ۰/۵ nm تا ۱۰۰۰۰ nm [152] ISO 13318)، برای اندازه‌گیری توزیع ذرات زیر ۲۰۰ nm استفاده شد. آشکارسازی MWCNT آزاد (شکل H در شکل ۵) در حضور چند برابر غلظت بیشتر پس‌زمینه تکه‌ها بسپاری (شکل F در شکل ۵) بعداً به‌صورت تجربی تأیید شد [41].

یادآوری- اگر ذرات MNM در یک تکه بسپاری محصور شده باشند یا از سطح تکه بیرون زده باشند، اندازه‌گیری با روش‌های مبتنی بر سطح مانند میکروسکوپی، تمام MNM را در تکه آشکارسازی نمی‌کند. اگر MNM غیرمحدود رهایش شود، این احتمال وجود دارد که MNM مشخصه‌های ریخت‌شناسی متفاوتی از جمله نسبت منظر داشته باشد که توصیف جامعه در یک نمونه با استفاده از یک روش واحد را دشوار می‌کند. در این مورد، ممکن است پیش از جزء جزء کردن نمونه‌ها با استفاده از کروماتوگرافی اندازه‌گزين یا «جزء جزء کردن جریان میدان» در کنار آنالیز EM مورد نیاز باشد، اگرچه چنین رویکردهایی زمان‌بر هستند. روش‌های اندازه‌گیری خاص انتخاب‌شده باید براساس نیازهای اطلاعاتی برای حمایت از تصمیم باشد و به دانش نانومواد خاص بستگی دارد.

۷-۴-۷ اندازه‌گیری‌های نماینده

روش اندازه‌گیری انتخاب‌شده باید اطلاعات نماینده را در مورد نمونه‌ای که در حال کندوکاو است فراهم کند. اهمیت این مفهوم را می‌توان در استفاده از SEM برای آنالیز ذرات رهایش‌یافته بیشتر نشان داد. اگرچه SEM به‌طور گسترده برای آنالیز ذرات مورد استفاده قرار می‌گیرد، SEM تنها می‌تواند لایه نازکی از مواد را در نزدیکی سطح ذره مورد بررسی قرار دهد و نمی‌تواند ذرات MNM را که در زیر سطح تکه بسپاری مدفون شده‌اند، شناسایی کند. این بدان معنی است که تمایز تکه‌های حاوی MNM از تکه‌هایی که فقط از بسپار

1- Impinger
2- Wohlleben

تشکیل شده‌اند، اغلب چالش برانگیز است. اخیراً، محققان در استفاده از میکروسکوپی نیروی الکتریکی برای آشکارسازی و تصویرسازی^۱ MWCNTs زیر سطح چندسازه‌ها پیشرفت کرده‌اند [153]، [154]. یکی دیگر از محدودیت‌های روش‌های EM به دست آوردن اندازه‌گیری‌های کافی برای اطمینان از آمار شمارش استوار است. عوامل جمع‌آوری ذرات متعددی مانند اندازه منافذ صافی، جریان هوا و طول نمونه‌برداری وجود دارد که بر نمونه تأثیر می‌گذارد [155]. به عنوان مثال، یک صافی استاندارد ۳۷ mm حدود 960 mm^2 سطح جمع‌آوری در دسترس دارد. به طور معمول، یک قطعه صافی 3 mm^2 تا 5 mm^2 برای آنالیز برش داده می‌شود که تنها ۰٫۳٪ تا ۰٫۵٪ از سطح جمع‌آوری موجود را نشان می‌دهد. به این ترتیب، معمولاً چند میدان دید، هر کدام در مرتبه $10 \mu\text{m}^2$ ، در میکروسکوپ الکترونی تصویر می‌شوند که مربوط به مساحتی در حدود 10^{-6} ٪ از نمونه اصلی است. هیچ یک از مقالات تعداد گزارش شده میدان‌های مشاهده شده را بررسی نکرده یا به اندازه کافی آمار شمارش را از آنالیز EM توصیف نکرده است. این مسائل چالش‌هایی را برای استفاده از چنین داده‌هایی در تصمیم‌گیری ایجاد می‌کند، همانطور که در بند ۸ مورد بحث قرار خواهد گرفت.

۷-۴-۸ اندازه‌گیری ترکیب‌بندی

ترکیب‌بندی MNM و بسیار ممکن است بر کاربرد روش‌های موجود تأثیر بگذارد. به عنوان مثال، هر دو MWCNT و بسیارها بر پایه کربن هستند. علاوه بر این، MWCNTs اضافه‌شده به بسیارها نیز احتمالاً شامل بخش غیرقابل اغمازی از شکل‌های دیگر نانومواد کربنی، از جمله فنجان‌ها، شیپوری‌ها و غیره می‌شود. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، عبور TO معمولاً برای آنالیز ذرات رهایش‌یافته و کسر EC به عنوان نشانگر برای MWCNTs استفاده می‌شوند. تا به امروز، مطالعات به اندازه کافی توانایی این روش را برای تمایز بین MWCNTs، فنجان‌ها، شیپورها و زمینه‌های بسیاری ارزشیابی نکرده‌اند. اندازه‌گیری‌های پیچیده‌تر بعدی مویید این واقعیت است که بسیارها حاوی مواد افزودنی و تثبیت‌کننده‌هایی هستند که می‌توانند در آنالیز تداخل داشته باشند.

۷-۴-۹ پایداری بسیار

هر نوع بسیاری دارای خواص منحصر به فردی است که آن را برای یک کاربرد مورد توجه می‌کند، اگرچه همین خواص می‌تواند منجر به ناپایداری (به عنوان مثال انحلال یا تخریب) یک زمینه بسیاری شود که با مرحله چرخه‌حیات محصول تغییر می‌کند، بنابراین اندازه‌گیری MNM رهایش‌یافته را پیچیده می‌کند. این تغییر در پایداری بسیار به ویژه در مواردی مهم است که مواد رهایش‌یافته یا با پتانسیل رهایش احتمالاً به شکل ذرات MNM غیرپیوندی باشند. اکثر چندسازه‌ها حین استفاده در مواجهه اسیدها، بازها یا حلال‌های قوی قرار نخواهند داشت. با این حال، در پایان عمر مفید خود، یک محصول می‌تواند با مایعاتی که زمینه

1- Visualize

بسپاری را در خاک چال تجزیه می‌کنند در تماس باشد یا در مواجهه سایر شرایط (مانند پرتوهای UV) قرار گیرد که بسپارها را در برابر تخریب ناشی از عوامل خفیف‌تر مستعدتر می‌کند.

۷-۴-۱۰ شیوه‌های تجاری

مانند هر فناوری نانوی در حال ظهور، مزایای رقابتی باید توسط کسانی به دست آید که می‌توانند نحوه پراکندگی موثر MNM در زمینه بسپاری و کنترل تجدیدپذیری روش‌های اجرائی ساخت را درک کنند. از این رو، مسائل مربوط به مالکیت معنوی، چالش‌هایی را برای به اشتراک‌گذاری داده‌های اندازه‌گیری ایجاد می‌کند. علاوه بر این، ماهیت پویای حوزه فناوری نانو به گونه‌ای است که محصولات به‌طور مداوم در حال بهبود هستند. یک زمینه بسپاری که امروزه استفاده می‌شود ممکن است در عرض شش ماه یا یک سال منسوخ شود زیرا در فرمول‌بندی‌های بسپاری، روش‌های فراوری و غیره تغییر می‌کند. این امر شناسایی یک چندسازه «نماینده» برای آزمودن رهایش و ارزیابی ریسک را دشوار می‌کند.

۷-۵ ملاحظات برای آشکارسازی، کمی‌سنجی و تعیین خواص مواد رهایش‌یافته

فرمول‌بندی مشکل و نیازهای تصمیم‌گیری مرتبط، ماهیت ضروری آنالیز را تعیین می‌کند که آیا آشکارسازی، کمی‌سنجی، تعیین مشخصه‌های MNM یا تلفیقی از سه نوع روش مورد نیاز است. آشکارسازی یک روش کیفی است که به سادگی به صورت، بله یا خیر، در مورد MNM رهایش‌یافته از چندسازه‌های بسپاری MNM به‌عنوان MNMs آزاد یا در تکه‌های بسپاری تعریف می‌شود. حد آشکارپذیری از نظر تعداد یا غلظت جرمی MNMs از روشی به روش دیگر متفاوت خواهد بود و باید برای هر روش با استفاده از نمونه‌های کنترلی [156] با غلظت MNM مناسب تعیین شود. یک داده حیاتی مورد نیاز برای ارزشیابی رهایش در بسیاری از سناریوهای استفاده از محصول، اطلاعات حدهای آشکارسازی است. به‌عنوان مثال، هنگام انجام اندازه‌گیری‌های وزن‌سنجی هوا، به‌طور معمول، حساسیت ترازوهای آنالیزی، حد آشکارسازی را تعیین می‌کند. حد آشکارسازی (LOD) از صافی‌های شاهد مورد استفاده در شرایط مشابه صافی‌های نمونه محاسبه می‌شود و وزن آن چندین برابر نمونه صافی برای تعیین LOD خواهد بود. حد آشکارسازی و کمی‌سنجی شمارش الیاف برای اندازه‌گیری مواجهه هوا بستگی به حساسیت آنالیزی (به‌عنوان مثال وابسته به میکروسکوپ، تنظیم و بزرگنمایی)، تعداد الیاف شمارش‌شده، سطح صافی بررسی‌شده و حجم نمونه هوای گرفته شده، دارد. سپس باید سطوح شمارش پس‌زمینه در صافی‌های نمونه و شاهد‌ها در نظر گرفته شود.

کمیسیون ایمنی محصولات مصرفی آمریکا (US. CPSC) [157] اطلاعاتی را در مورد گستره وسیعی از روش‌های آنالیزی برای مشخصه‌های مختلف MNM، از جمله داده‌های مربوط به حساسیت روش (حد آشکارسازی) و اینکه آیا روش تأیید شده است، براساس اطلاعات موجود در گستره وسیعی از گزارش‌های فنی و راهنماها گردآوری کرده است. باین‌حال، این مجموعه در منابع علمی بررسی شده منتشر نشده است.

1- United States Consumer Product Safety Commission

علاوه بر این، بسیاری از روش‌های منتشر شده شامل اطلاعاتی در مورد حدهای آشکار سازی نبودند، مجموعه روش‌های مناسب یک محیط تحقیقاتی را از روش‌های مناسب برای حمایت از تصمیم‌گیری متمایز نکرد و هیچ یک از روش‌های بررسی شده نرخ‌ها را گزارش نکردند. یعنی یک روش ممکن است جرم یا سطح را اندازه‌گیری کند، اما مقدار رهایش یافته در واحد زمان را اندازه‌گیری نکند.

کمی‌سنجی تعداد یا غلظت جرمی MNMs رهایش یافته یا در چندسازه‌های بسیاری MNM از آنها در واحد حجم، جرم یا مساحت سطح زمینه بسیاری متمرکز است. کمی‌سنجی MNMs رهایش یافته، به ویژه آنهایی که در تکه‌های بسیاری هستند، به دلایلی که در بندهای پیشین توضیح داده شد، چالش برانگیز است. از این رو، بسیاری از روش‌ها مانند EM تنها می‌توانند برآوردی از غلظت ارائه دهند.

اگر رهایش آشکار سازی شود، ممکن است تعیین ماهیت ماده رهایش یافته بسته به فرمول‌بندی مشکل مهم باشد. درک ماهیت ماده رهایش یافته همچنین برای اطمینان از اینکه اندازه‌گیری‌های سمیت با مواد اندازه‌گیری شده مرتبط هستند، اگرچه ممکن است در همه موارد نیاز به مشخصه‌یابی ذرات در عمق نباشد. به خوبی مستند شده است که خواص و مشخصه‌های فیزیکی و شیمیایی MNMs سمیت و سرنوشت MNMs را در انسان و محیط تعیین می‌کند. به‌عنوان مثال مراجع [158] تا [162] را ملاحظه کنید. با این حال، توصیف مواد رهایش یافته همچنین می‌تواند پیچیده‌ترین مرحله در سلسله مراتب اندازه‌گیری باشد. این بند به چهار مشخصه یا خاصیت مهم MNMs در مواد رهایش یافته، یعنی اندازه، به‌عنوان مثال طول MNM، قطر، توزیع اندازه، هردوی تکه‌های درگیر و متصل به بسیار، شیمی سطح MNM و توزیع فضایی MNM در تکه‌های بسیار می‌پردازد.

توجه به این نکته مهم است که روش‌های اندازه‌گیری می‌توانند کیفی باشند، یعنی اندازه‌گیری‌هایی که نتایجی از «نمونه MNM دارد یا ندارد» تا «نمونه حاوی حدود ۵۰٪ از MNM است» در واحد سطح یا حجم آزمون شده، ارائه می‌دهد. برای روش‌های کیفی، عدم قطعیت نسبی در نتیجه زیاد است یا نمی‌توان آن را به اندازه کافی تعریف کرد، زیرا همه منابع خطا شناخته شده یا قابل اندازه‌گیری نیستند. در مقابل، یک اندازه‌گیری کمی یک نتیجه عددی مانند «قطر MWCNTs مجزا از ۱۰۰ nm تا ۲۰۰ nm گسترده است» با آگاهی از منابع خطا که به عدم قطعیت نسبی برای جمعیت MWCNT کمک می‌کند، تولید می‌کند. عدم قطعیت نسبی در یک نتیجه عددی به دست آمده از یک اندازه‌گیری کمی بسیار کوچکتر از آن است که از یک اندازه‌گیری کیفی به دست می‌آید.

۶-۷ روش‌های اندازه‌گیری کاربردی

مقالات مروری جامع [163]-[165]، به‌طور مفصل، روش‌های اندازه‌گیری را برای تعیین مشخصه‌های فیزیکی و شیمیایی MNMs شرح می‌دهند. اطلاعات موجود در این مقاله‌ها شامل وضوح فضایی، حد آشکار سازی، مزایا، معایب و مشخصه‌ها و خواص قابل اندازه‌گیری برای بیش از ۴۰ روش است. بسیاری از روش‌های اندازه‌گیری در مطالعات رهایش منتشر شده در مورد چندسازه‌های بسیاری MWCNT در این مقالات مروری

گنجانده شده‌اند. علاوه‌براین، مقالات شامل روش‌های کاربردی بالقوه برای مطالعات رهایش هستند. در مورد اندازه‌گیری و شمارش ذرات هوابرد در هوا، مقالات و مستندات کمی در مورد اندازه‌گیری و شمارش CNTs از نمونه‌های محل کار (به‌عنوان مثال مراجع [166] تا [169]) منتشر شده است. علاوه‌براین، یک مقاله مروری توسط پترسن و همکاران [159]، تنها بر روش‌های آشکارسازی، کمی‌سنجی و تعیین مشخصه‌های MWCNT در محیط‌های زیستی تمرکز دارد. چندین مقاله مروری اضافی روش‌های اندازه‌گیری و آزمون MNM مربوط به حوزه‌های کاربردی مختلف مانند ارزیابی سمیت زیست‌محیطی، غذاها و مواد در تماس با غذا را ارائه می‌کنند [170]–[174].

۸ شناسایی نیازها برای استانداردها، روش‌ها، دستگاه‌ها، چارچوب‌های تصمیم‌گیری و تحقیق

۸-۱ کلیات

در بندهای پیشین خواص چندسازه‌های بسپاری MNM بررسی شد، سناریوها و نیروهای پیش‌برنده را که بر رهایش تأثیر می‌گذارند و روش‌های موجود برای جمع‌آوری، آماده‌سازی و آنالیز نمونه‌هایی از مواد رهایش‌یافته در محیط‌ها و محیط زیست در طول چرخه‌حیات یک NEP بررسی شده است. در دهه گذشته پیشرفت‌هایی در درک ماهیت ذرات حاوی MNM که از چندسازه‌ها آزاد می‌شوند و پتانسیل مخاطره در صورت مواجهه افراد با ذرات MNM رهایش‌یافته صورت گرفته است. باین‌حال، پرداختن به چندین شکاف اطلاعاتی ضروری برای درک بهتر اینکه آیا و در کجا ریسک سلامت انسان ممکن است از سطوح ایمن فراتر رود، بسیار مهم است. پرداختن به این موارد ممکن است نوآوری با استفاده از نانومواد به روش‌هایی که ریسک کمی دارند یا بدون ریسک هستند را نیز ممکن کند. روش‌های اندازه‌گیری بهبودیافته (یا جدید)، ILS رهایش در سناریوهای مربوطه، توسعه پروتکل‌های آزمون و استانداردسازی روش‌ها مورد نیاز است. همانطور که در موارد زیر خلاصه شده است، این بند به این موارد می‌پردازد و به‌طور خلاصه چارچوب‌های تصمیم‌گیری موجود را برای کمک به مدیران ریسک در تعیین اطلاعات و روش‌های نمونه‌برداری مورد نیاز برای حمایت از تصمیمات طراحی و توسعه محصول مرور می‌کند.

موضوعات کلیدی عبارتند از:

- پرداختن به کمبودهای دانش:
- میکروسکوپی الکترونی؛
- مواد مرجع در مطالعات بین‌آزمایشگاهی؛
- پروتکل‌ها؛
- رویکردها/چالش‌های استانداردسازی؛
- چارچوب‌های تصمیم‌گیری انتخاب‌شده: تمرکز، هدف، کاربرد.

۸-۲ روش‌های بالقوه بهبودیافته/جدید

با توسعه روش‌های آنالیزی جدید و اصلاح چارچوب‌های تصمیم‌گیری، مهم است که اندازه‌گیری‌های مواجهه با نیازها و رویکرد سم‌شناسان هماهنگ شوند، به‌طوری که داده‌ها را بتوان در زمینه پیامدهای سلامت انسان تفسیر کرد. برای مثال، توسعه «قوانین شمارش» و راهنمایی در مورد گستره اندازه مرتبط برای نمونه‌برداران اندازه انتخابی ممکن است مفید باشد.

روش‌های EM اغلب برای کندوکاو از نمونه‌های مواد رهایش‌یافته استفاده می‌شوند، زیرا این دستگاه‌ها می‌توانند اطلاعاتی در مورد حضور MNMs و/یا اطلاعاتی در مورد مشخصه‌های آنها در این لوله‌ها ارائه دهند. با این حال، به‌دست آوردن اطلاعات کمی در مورد خواص ویژه (به‌عنوان مثال توزیع اندازه) با این روش‌ها زمان‌بر و پرهزینه است. حتی زمانی که منابع EM در دسترس هستند، آنالیزهای کمی MNM رهایش‌یافته با استفاده از روش‌های فعلی EM به‌شدت به ساعت‌ها تلاش وابسته است. نیاز اساسی به روش‌های مبتنی بر میکروسکوپی خودکار (SEM، TEM و AFM) برای آشکارسازی، کمی‌سنجی و تعیین مشخصه‌های MNM در تکه‌های بسیاری وجود دارد تا اندازه‌گیری‌ها را تا حد زیادی تسریع کند. روش‌های خودکار به‌ویژه برای اندازه‌گیری‌های توزیع کمی اندازه MWCNT و غلظت تعداد مهم هستند. چنین نوآوری‌هایی به دستیابی به یک هدف کلی از روش‌های کم هزینه برای کمی‌سنجی و مشخص کردن MNM رهایش‌یافته کمک می‌کند.

شکل ۲، تمرکز این استاندارد را بر رهایش اولیه تکه‌های بسیاری در مقایسه با رهایش ثانویه تکه‌های بسیاری توصیف می‌کند. این تکه‌های رهایش اولیه می‌توانند شامل هر تلفیقی از MNMs باشند که کاملاً محصور شده یا از سطح بسیار بیرون زده‌اند و همچنین تکه‌هایی که فقط از بسیار تشکیل شده‌اند (به شکل ۳ مراجعه شود). تمایز تکه‌های بسیاری که حاوی MNMs کاملاً محصور شده از تکه‌های که فقط بسیار هستند به چند دلیل مورد توجه است. اول، اندازه اثرودینامیکی یک ذره به شدت بر نهشت منطقه‌ای آن در ریه تأثیر می‌گذارد. به‌عنوان مثال گنجاندن MWCNTs می‌تواند منحنی‌های رهایش قطعه/توزیع اندازه ذره را تغییر دهد و به‌طور بالقوه بر الگوهای نهشت ثانویه تأثیر بگذارد [107, 44, 40]. علاوه‌براین، اگر اندازه تکه‌های با MNM محصور شده تنها بخشی از تمام تکه‌های رهایش‌یافته را نشان دهد، الگوی نهشت ریه آنها با آنچه از توزیع اندازه کلی پیش‌بینی شده بود، متفاوت خواهد بود. دوم اینکه وجود تکه‌های فقط بسیاری که در میکروسکوپ الکترونی ظاهری مشابه تکه‌های با MNM محصور دارند، نوفه پس‌زمینه را افزایش می‌دهند و از ارزیابی درست پتانسیل مواجهه جلوگیری می‌کنند. از این رو، یک روش اجرایی آماده‌سازی نمونه یا روش پیش‌جدا سازی که نمونه با خلوص بالاتر را به همراه دارد (تکه‌های فقط بسیاری کمتر) زمان آنالیز را کاهش می‌دهد و درستی اندازه‌گیری را بهبود می‌بخشد.

۸-۳ مطالعات بین‌آزمایشگاهی

یک ILS، طرح آزمونی شامل چندین آزمایشگاه است که در آن نمونه‌هایی از یک دسته توسط شرکت‌کنندگان اندازه‌گیری می‌شوند و نتایج با هدف ارائه یک بیانیه دقیق (عدم قطعیت) آنالیز می‌شوند. هدف‌های متعددی برای انجام یک ILS وجود دارد، از جمله آنها ایجاد اثربخشی روش‌های آزمون جدید است

[175]، [176]. در زمینه چندسازه‌های بسپاری MNM، روش‌های آزمون جدید می‌توانند روش‌های اجرایی برای تولید مجدد مواد برای یک سناریوی رهایش، پروتکل‌های آماده‌سازی نمونه و روش‌های اجرایی اندازه‌گیری آنالیزی باشند. نتایج یک ILS اغلب برای پشتیبانی از توسعه یک روش استاندارد استفاده می‌شود.

مواد مرجع، راهکاری برای اطمینان یا بهبود کیفیت اندازه‌گیری و ابزاری حیاتی در هر طرح ILS هستند. به‌طور کلی، RMs به‌عنوان CRMs یا به‌عنوان RMs گواهی‌نشده تولید می‌شوند. یک RM ماده‌ای است که به اندازه کافی همگن و با توجه به یک (یا چند) خاصیت پایدار است که برای استفاده اندازه‌گیری مورد نظر آن قابل قبول است [177]. مواد مرجع را می‌توان به‌عنوان مواد محک‌زنی برای مطالعات ILS در مورد روش‌ها یا پروتکل‌های آزمون جدید استفاده کرد. زیرمجموعه‌ای از مواد مرجع، CRMs هستند که خواص آن‌ها گواهی‌شده و از نظر اندازه‌شناسی قابل ردیابی هستند، یعنی به یک سامانه مرجع مشخص و مقدار عدم قطعیت ناشی از بودجه عدم قطعیت که همه مشارکت‌های عدم قطعیت قابل توجه را پوشش می‌دهد، همراه هستند [177]. مواد مرجع گواهی‌شده برای اهداف کالیبراسیون یا برای آزمون روش، استفاده می‌شوند. طبقه سوم موادی که برای توسعه روش‌های آزمایش مرتبط هستند، «مواد مرجع نماینده» (RTMs) است که به‌عنوان ماده‌ای از یک دسته تعریف می‌شود که با توجه به یک (یا چند) خاصیت مشخص‌شده به اندازه کافی همگن و پایدار است و برای استفاده مورد نظر مناسب فرض می‌شود [178]. توجه به تفاوت‌های این نوع مواد و کاربردهای مناسب آنها در توسعه روش‌های آزمون حائز اهمیت است. به‌عنوان مثال، یک RTM دارای بودجه عدم قطعیت نیست، بنابراین استفاده از آن به‌عنوان یک استاندارد کالیبراسیون نامناسب است، اما می‌تواند برای آزمون یک پروتکل برای تولید مواد در طول یک سناریوی رهایش کافی باشد. در نقطه مقابل، یک CRM دارای بودجه عدم قطعیت کامل است که برای کالیبراسیون دستگاه برای اطمینان از صحت و دقت داده‌های اندازه‌گیری ضروری است، اما برای آزمون یک پروتکل برای تولید مواد در طول یک سناریوی رهایش غیر ضروری است.

در طرح نیمه‌صنعتی «مقایسه بین‌آزمایشگاهی نانورهایش»^۱، اپوکسی-نانولوله کربنی چنددیواره به‌عنوان RTM با نرخ رهایش بالا هم توسط تنش‌های مکانیکی و هم توسط تنش‌های هوازدگی و با سهم معینی از شکل‌های رهایش (به شکل ۶ مراجعه شود) که شامل MWCNT آزاد (شکل H در شکل ۵) است، پیشنهاد شد. ماده MWCNT-PA به‌عنوان RTM با نرخ رهایش کم با تنش‌های هوازدگی پیشنهاد شد. مقایسه بین‌آزمایشگاهی نیمه‌صنعتی nanoGRAVUR^۲ فرایندهای سنباده‌زنی با موفقیت از اپوکسی به‌عنوان RTM برای کالیبره کردن میزان رهایش هواسل سنباده‌زنی در سه آزمایشگاه با تنظیمات مختلف سنباده استفاده کرد و به رتبه‌بندی پیش‌بینی‌کننده برای طیف گسترده‌ای از مواد (گرماسخت، گرمانرم، پوشش‌های اکریلیک، سیمان‌ها) دست یافت.

1- Nanorelease Pilot Inter-Laboratory Comparison

2- NanoGRAVUR Pilot Inter-Laboratory Comparison

یکی دیگر از مفاهیم مرتبط با کیفیت اندازه‌گیری که برای ILS مهم است صحنه‌گذاری اندازه‌گیری است. صحنه‌گذاری یک اندازه‌گیری در واژگان اندازه‌شناسی [179] به‌عنوان تصدیقی که در آن الزامات مشخص شده برای استفاده مورد نظر کافی است، تعریف شده است. صحنه‌گذاری، ارائه شواهد عینی است مبنی بر اینکه یک مورد معین الزامات مشخص را برآورده می‌کند. چندین نمونه از نتایج اندازه‌گیری‌های صحنه‌گذاری شده وجود دارد. یک مثال، موردی است که در آن نتایج در یک نمونه معین که با بیش از یک روش اندازه‌گیری شده است، سازگار هستند. مثال دیگر صحنه‌گذاری اندازه‌گیری از طریق استفاده از مدلی است که داده‌های واقعی را در بر می‌گیرد.

پیش از انجام یک ILS، باید پروتکلی توسعه داده شود که هدف و دامنه روش‌اجرایی و نتیجه مورد نظر (به‌عنوان مثال یک نتیجه اندازه‌گیری) را مشخص کند. تجربه RMs با نانوذرات طلا با پروتکل‌های اندازه‌گیری پراکندگی پویای نور، TEM، SEM و AFM [180] و آزمون خون کافت^۱ [181] و سمیت سلولی [182] نشان می‌دهد که انجام یک مطالعه آزمایشی با تعداد سازمان‌های کم برای نمونه مورد نظر عمل خوبی برای اصلاح یک پروتکل پیش از انجام یک ILS کامل است [183]. ارزشیابی آزمایشی یک پروتکل اجازه شناسایی مرحله‌هایی که ممکن است برای شرکت‌کنندگان گیج‌کننده باشد و فرصت‌هایی برای بهبود را می‌دهد و به شرکت‌کنندگان اجازه می‌دهد تا این روش را تمرین کنند.

یادآوری - نمایش ویدئویی پروتکل نیز ممکن است برای شرکت‌کنندگان مفید باشد. هنگامی که یک پروتکل به توافق رسید، یک ILS در مقیاس کامل را می‌توان مطابق با استانداردهای شناخته شده انجام داد [119]، [117].

۸-۴ پروتکل‌ها و سنجش‌ها

فقدان روش‌های آزمون استاندارد شده برای تولید، جمع‌آوری و آنالیز تکه‌های ره‌ایش‌یافته از چندسازه‌های بسپاری MNM، مانع اصلی برای آزمایش ره‌ایش است (به زیربند ۸-۵ مراجعه شود). همانطور که در بند ۶ توصیه می‌شود، روش اعمال تنش باید همبستگی خوبی بین شبیه‌سازی با تخریب واقعی خواص ماکروسکوپی (مانند رنگ، براقیت، مکانیک) داشته باشد. این امر به‌طور کلی با پروتکل‌های ISO صحنه‌گذاری شده است که برای مشخص کردن عملکرد محصول در کاربرد موردنظر استفاده می‌شوند، به بهترین وجه انجام می‌شود.

محققان روش‌هایی را انتخاب کرده‌اند که در ابتدا برای اهداف دیگری توسعه یافته بودند و آنها را برای ارزشیابی ره‌ایش MNM از چندسازه‌ها برگرفتند. یکی از نمونه‌های رایج استفاده از ساینده تابر است که روشی کاملاً شناخته‌شده برای کمی‌سنجی مقاومت به سایش پوشش‌ها و رنگ‌های بسپاری است و در ISO 5470-1 [184] و ASTM D4060-95 [185] برای ارزشیابی ره‌ایش MNM از چندسازه‌ها مشخص شده است. انطباق سایر استانداردها اساساً منجر به ایجاد یک پروتکل آزمایشی می‌شود (که در اینجا به‌عنوان

1- Hemolysis

فهرستی از مرحله‌هایی که باید در آزمون دنبال شوند تعریف شده است). توجه به این نکته مهم است که یک پروتکل آزمون یک روش را تجویز می‌کند، اما سطح اطمینان یک روش استاندارد را ندارد. در مرحله‌های اولیه تحقیق، مانند مطالعات رهایش MNM، پروتکل‌های آزمون وسیله‌ای ارزشمند برای شروع پرداختن به رویکردهای اندازه‌گیری حیاتی هستند و به‌عنوان نقطه شروع برای ارزشیابی این رویکردها عمل می‌کنند.

۸-۵ فرصت‌های استانداردسازی روش‌ها

توسعه روش‌های آزمون استاندارد مبتنی بر اجماع نظر (یعنی پروتکل‌هایی که نتیجه اندازه‌گیری را تولید می‌کنند) برای کمی‌سنجی یا مشخصه‌یابی MNM توسط یک سازمان استاندارد مانند سازمان بین‌المللی ISO یا ASTM براساس در دسترس بودن یک پروتکل صحت‌گذاری شده و تعریف شده است. برای روش مورد نظر همانطور که در بالا اشاره شد، هدف یک ILS ارائه شده، محاسبه عبارت دقت (عدم قطعیت) است. استاندارد ASTM ایجاب می‌کند که تمام روش‌های آزمون با یک بیانیه دقیق و اریبی همراه باشد، اما استاندارد ISO اینطور نیست. با توجه به وضعیت فعلی علم، ممکن است توسعه روش‌های آزمون استاندارد برای کمی‌سنجی یا تعیین مشخصه‌های بیشتر مواد بسپاری MNM که از چندسازه‌ها آزاد می‌شوند و نه همه آنها، در حال حاضر ممکن نباشد. به‌عنوان مثال، مرور منابع علمی در مورد MWCNTs نشان می‌دهد که چنین روش‌هایی برای برخی از جنبه‌های کمی‌سنجی ویژگی‌های مورد نیاز برای کمک به درک میزان دُز در واحد زمان رهایش ممکن نیست. با این حال، ممکن است بتوان استانداردهایی را در قالب راهنماها، گزارش‌های فنی و ویژگی‌ها (یعنی پروتکل‌هایی که به یک نتیجه اندازه‌گیری منتج نمی‌شوند) برای رویکردهای آماده‌سازی نمونه برای روش‌های آنالیزی مانند SEM، TEM یا AFM ایجاد کرد. چنین روش‌های اجرایی پیش‌روی اساسی برای توسعه نهایی روش‌های آزمون استاندارد خواهند بود. به‌عنوان مثال، چندین استاندارد ISO در مورد فناوری نانو در روش‌های خاص برای اندازه‌گیری و توصیف مشخصه‌های SWCNTs آزاد وجود دارد. تنها یک استاندارد مربوط به MWCNTs آزاد وجود دارد: ISO/TR 10929 [186]. با این حال، باید توجه داشت که ISO/TR 10929 [186] در درجه اول مربوط به مشخصه‌یابی نمونه‌های MWCNT آماده‌سازی شده برای استفاده در شرایط آزمایشگاهی است و بنابراین ممکن است برای شرایط رهایش که در این استاندارد به آن اشاره شده است، اعمال نشود. کارگروه ISO/TC 229 یک گروه مطالعاتی را برای بررسی امکان‌سنجی توسعه استاندارد برای تعیین اندازه MWCNT با TEM ایجاد کرده است.

گزارش‌ها و ویژگی‌های موجود رهنمودهایی در مورد چگونگی اندازه‌گیری مشخصه‌ها و خواص MWCNT آزاد ارائه می‌دهد. با این حال، هیچ روش آزمون استاندارد وجود ندارد که یک نتیجه عددی با تعیین عدم قطعیت ارائه دهد. کار بیشتر شامل مطالعات آزمایشی در آزمایشگاه‌ها برای شناسایی منابع تنوع در نمونه‌برداری، آماده‌سازی نمونه و روش‌های آنالیزی که سپس منجر به ILS گسترده‌تر برای اطلاع از توسعه یک استاندارد شود، مورد نیاز است.

۸-۶ چارچوب‌های تصمیم‌گیری

هنگام ارزشیابی روش‌های اندازه‌گیری برای حمایت از تصمیم‌گیری درباره رهایش MNM و پتانسیل مواجهه رهایش آن، عوامل زیادی باید در مورد MNM در نظر گرفته شود. عوامل شامل خواص فیزیکی و شیمیایی MNM، کاربردهای بالقوه، ملاحظات رهایش محیط‌زیستی، پتانسیل سمیت و امکان‌سنجی روش‌های اندازه‌گیری برای کاربرد در ESs حاصله است. چارچوب‌های تصمیم‌گیری ابزارهایی هستند که برای هدایت کاربر در فرایند انتخاب روش‌های اندازه‌گیری و توصیف صحیح MNM، براساس تعدادی از عوامل که اغلب توسط کاربر تعیین می‌شوند، طراحی شده‌اند. در برخی موارد، روش‌ها ممکن است آزمایشی باشند و در توسعه محصول مورد استفاده قرار گیرند و در موارد دیگر ممکن است روش‌ها نیاز به استانداردسازی داشته باشند، به‌منظور پشتیبانی از مقررات ایمنی مورد استفاده قرار گیرند. چارچوب‌های تصمیم‌گیری می‌توانند به ارزشیابی عناصر سودمند روش‌ها (مشخصه‌های مواد، روش‌های نمونه‌برداری، انتخاب روش‌های آنالیزی، مشخصه‌های MNM مؤثر بر برهم‌کنش‌های زیستی) کمک کنند بنابراین ارزشیابی به نیازهای تصمیم‌گیری واقع‌بینانه اشاره دارد و محدود به آن است. چارچوب‌های تصمیم‌گیری همچنین می‌تواند برای شناسایی کمبودهای مهم در توانایی فعلی برای اندازه‌گیری نرخ رهایش MNM به شکلی مفید برای ارزشیابی وجود یا عدم وجود سمیت و مخاطره بالقوه استفاده شود. این کمبودها ممکن است نشان‌دهنده موانع حیاتی برای توسعه محصول باشد، جایی که ممکن است ارزشیابی ایمنی ممکن نباشد یا ممکن است مسائل ایمنی ایجاد شود.

چارچوب‌های تصمیم‌گیری زیادی وجود دارد و هر کدام ملاحظات مختلفی برای انتخاب آزمون‌های اندازه‌گیری و توصیف MNM دارند [187]. چندین چارچوب تصمیم‌گیری موجود در جدول ۶ ارائه شده است. هر یک از این چارچوب‌ها تمرکز منحصر به فردی دارند و تا حدودی در هدف و کاربرد متفاوت هستند.

جدول ۶ - چارچوب‌های تصمیم‌گیری با ملاحظات مربوط به انتخاب آزمون‌های تجربی اندازه‌گیری و توصیف

MNM

توصیف کوتاه	چارچوب تصمیم‌گیری ^۱
چارچوب آزمون چند لایه‌ای که کاربر را از طریق فرایند تعیین خواص فیزیکی، پتانسیل رهایش مواد نانومقیاس و پیامدهای سلامت و ایمنی محیطی محصولات نانوپدید راهنمایی می‌کند.	NanoGRID
ابزار راهنمای مبتنی بر وب، اساساً با هدف هدایت صنعت در ارزیابی ریسک‌های بالقوه مرتبط با طراحی محصولات نانوپدید و به‌کارگیری مناسب‌ترین ارزیابی ریسک و راهبردهای کاهش ریسک برای یک محصول خاص است.	GUIDEnano
سامانه نرم‌افزاری SUNDS می‌تواند ریسک شغلی، مصرف‌کننده و محیط‌زیستی ناشی از MNM در محصولات صنعتی را در طول چرخه‌حیات آنها برآورد کند. در موقعیت‌هایی که ریسک‌ها قابل قبول نیستند، SUNDS اقدامات مدیریت ریسک مناسب از جمله اطلاعاتی در مورد هزینه‌های آنها در مقایسه با مزایای فناوری‌های نانو را پیشنهاد می‌کند.	SUNDS

جدول ۶ – (ادامه)

توصیف کوتاه	چارچوب تصمیم‌گیری ^۱
چارچوب سه‌لایه‌ای برای گروه‌بندی و آزمودن نانومواد، از جمله ملاحظات رهایش چرخه‌حیات [188]، [190]	DF4nanoGrouping
تلفیق چهار موضوع مواد، مواجهه، مخاطره و ارزیابی ریسک و مدیریت نانومواد را به‌عنوان ابزار مدیریت ریسک [191].	چارچوب ارزیابی ریسک MARINA
رویکرد بررسی سراسری ^۲ متمرکز بر گروه‌بندی و آنالیز نانومواد [192]	ECHA/JRC/RIVM
چارچوب سه‌لایه‌ای گروه‌بندی مواد برای ریسک‌های شغلی، مصرف‌کننده و محیط‌زیستی آنها براساس مجموعه‌ای هماهنگ از خواص مواد [189]	nanoGRAVUR
^۱ برنامه‌های اتحادیه اروپا برای ارزیابی نانومواد	
^۲ Read-Across Approach	

سه چارچوب تصمیم‌گیری اول فهرست‌شده در جدول ۶ با جزئیات بیشتر در زیر توضیح داده شده است.

راهنمای نانو برای استقرار آگاهانه ریسک^۱ (NanoGRID) یک چارچوب و ابزار چند لایه است که راهنمایی‌های کلی رتبه‌بندی و انتخاب روش‌های آزمون مرتبط برای تعیین سرنوشت محیط‌زیستی و اثرات نانومواد و فناوری‌های نانوپدید را ارائه می‌دهد. چارچوب لایه‌ای، کاربر را از طریق فرایند تعیین خواص فیزیکی MNMs، پتانسیل رهایش مواد در مقیاس نانو و پیامدهای ایمنی و بهداشت محیطی NEPs راهنمایی می‌کند. این چارچوب همچنین کاربر را با تعاریف، انتشارات و اسناد مربوط به مقررات مناسب مرتبط می‌کند.

راهنمای NanoGRID از پنج لایه ساخته شده است و به کاربر اجازه می‌دهد فقط از لایه‌های لازم برای انتخاب آزمون استفاده کند. لایه ۱، کاربر را از طریق معیارهای غربالگری برای MNM راهنمایی می‌کند که براساس مقدار مواد، اندازه، خواص، رده‌های فناوری و استفاده است. لایه ۱، به گردآوری اطلاعات پایه با تمرکز بر چرخه‌حیات، توصیف و رده‌بندی نانومواد کمک می‌کند. لایه ۲، بر رهایش بالقوه MNMs از مواد نانوپدید تمرکز دارد. در لایه ۲، رتبه‌بندی برای مسیرهای رهایش بالقوه، استفاده بالقوه و انبارش نانومواد اختصاص داده شده است. رتبه‌های صفر تا پنج (پنج محافظه‌کارانه‌ترین فرض است) توسط کاربر با پاسخ دادن به یک سری سؤالات در مورد خواص فیزیکی و شیمیایی MNM و برهم‌کنش بالقوه محیطی اختصاص داده می‌شود. سپس روش‌های مطالعه رهایش به ترتیب اهمیت به‌وسیله چارچوب NanoGRID برای MNM انتخابی براساس پاسخ‌های ارائه‌شده توسط کاربر در مورد برهم‌کنش‌های MNM با محیط، رتبه‌بندی می‌شوند. مدت زمان، هزینه، تخصص مورد نیاز و اهمیت آزمون‌ها در رتبه‌بندی راهنمای روش آزمون گنجانده شده است. لایه‌های ۳ و ۴ بر سرنوشت و مخاطره MNM تمرکز دارند. مقادیر حاصل از آزمون را

1- Nano Guidance for Risk Informed Deployment

می‌توان برای استفاده در گزارش لایه ۵ وارد ابزار کرد. مطالعات موردی با نانومواد آزاد با استفاده از NanoGRID تحلیل شده و توسط کندی^۱ و همکاران ارائه شده است [193].

نمونه دیگری از چارچوب تصمیم‌گیری SUNDS است. این یک سامانه نرم‌افزاری مبتنی بر شبکه است که برای برآورد ریسک‌های شغلی، مصرف‌کننده، سلامت عمومی و محیط زیستی ناشی از نانومواد در محصولات صنعتی واقعی در طول چرخه‌حیات آنها طراحی شده است. در شرایطی که ریسک‌ها کنترل نمی‌شوند، SUNDS اقدامات مدیریت ریسک مناسب از جمله اطلاعاتی در مورد هزینه‌های آنها در مقابل مزایای فناوری‌ها را پیشنهاد می‌کند. این سامانه می‌تواند به‌طور همزمان ریسک‌ها را در مرحله‌های مختلف چرخه‌حیات، اهداف، فعالیت‌ها و مسیرهای مواجهه بر اساس داده‌های سمیت درون‌تنی^۲ و سناریوهای انتشار ارزشیابی کند. یکپارچه‌سازی چرخه‌حیات و اطلاعات ره‌ایش در SUNDS در مطالعه موردی مس در پیوست الف نشان داده شده است [194]. مشخص شد که در طول چرخه‌حیات از این فرمول‌بندی‌ها، در پوشش‌های چوبی ضدباکتری و ضدقارچ و آغشته‌سازی شده^۳ استفاده می‌شود و تحلیل ریسک‌ها، خطرات تنفس CuO را در سناریوهای انتشار که شامل کارگرانی که پودرهای خشک را کارورزی می‌کنند و عملیات سنباده‌زنی را انجام می‌دهند و همچنین خطرات احتمالی بلعیدن برای کودکان در مواجهه نانو $\text{Cu}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3$ را در سناریویی شامل انتقال دست به دهان ماده ره‌ایش‌یافته از چوب آغشته‌شده نشان داد.

مثال دیگر GUIDEnano است، یک ابزار مبتنی بر شبکه که هر کاربر بالقوه، از جمله توسعه‌دهندگان NEP (عمدتاً صنعتی) را برای طراحی و کاربرد مناسب‌ترین راهبردهای ارزیابی ریسک و کاهش ریسک برای یک محصول خاص راهنمایی می‌کند. این ابزار روش‌شناسی‌های نوآورانه‌ای را برای ارزشیابی و مدیریت ریسک‌های سلامت انسان و محیط‌زیست NEPs با در نظر گرفتن کل چرخه‌حیات محصول شامل می‌شود: سنتز MNM، ساخت NEPs، استفاده و مرحله پایان عمر. اجرای صحیح این راهنما تضمین می‌کند که ریسک‌های مرتبط با یک NEP، در کل چرخه‌حیات و زنجیره ارزش آن، مطابق با جدیدترین دانش در زمان پیاده‌سازی، به‌طور مناسب ارزشیابی شده و تا سطح قابل قبولی کاهش یافته است. ارزشیابی یک NEP با استفاده از این ابزار برای ارتباط ریسک با تنظیم‌کنندگان مقررات، شرکت‌های بیمه و جامعه نیز مفید است.

به‌طور خاص، پودمان (ماژول) مواجهه GUIDEnano شامل کتابخانه‌ای از کارت‌های فعالیت^۴ است که در آن نرخ ره‌ایش برای فرایندهای مختلف که در تمام مرحله‌های چرخه‌حیات NEPs انجام می‌شود، ثبت می‌شود. دو روش کلی برای تعیین مواجهه در ابزار وجود دارد: از طریق داده‌های ره‌ایش که با استفاده از مدل پراکنه به داده‌های مواجهه تبدیل می‌شوند، یا از طریق درون‌داد داده‌های مواجهه از مدل‌های مواجهه موجود. برای مدل‌سازی مواجهه، کتابخانه سناریوی مواجهه (ESL)^۵ توسعه‌یافته در پروژه MARINA به ابزار

1- Kennedy
2- In vivo
3- Impregnation
4- Activity card library
5- Exposure Scenario Library

GUIDEnano مرتبط است (۴۴ سناریو اضافی براساس اندازه‌گیری‌ها در محفظه‌های مواجهه و در محل کار گنجانده شده است). برای مواردی که کاربر هیچ کارت فعالیتی ندارد و بنابراین هیچ داده رهایش/مواجهه‌ای برای سناریوی ارزیابی (AS)^۱ در دسترس نیست، راهنمایی برای تعیین شباهت، ارتباط و کیفیت یک منبع داده برای سناریوهای قابل مقایسه موجود در منابع علمی ارائه شده است. بنابراین، داده‌های رهایش تولید یا جمع‌آوری شده به دنبال توصیه‌های این استاندارد، کتابخانه‌ای از کارت‌های فعالیت GUIDEnano را با داده‌های با کیفیت بالا و قرار گرفتن در مواجهه ارزشمند برای اهداف ارزشیابی ریسک غنی می‌کند.

چارچوب‌های تصمیم‌گیری در جزئیات رویکردها و ویژگی‌های کاربریشان متفاوتند، اما همه برای پشتیبانی از یک تصمیم طراحی شده‌اند: شناسایی نمونه‌برداری مناسب برای هدف و روش‌های آنالیزی، یا پشتیبانی از یک تصمیم مدیریت ریسک. استفاده کارآمد از منابع مستلزم آن است که روش نمونه‌برداری به سناریو و تصمیم مدیریت ریسک که باید گرفته شود متصل باشد. برای هر چارچوب، تحلیل در زمینه یک فرمول‌بندی مشکل خاص انجام می‌شود که سناریو مواجهه و استفاده، MNM، زمینه اطراف و NEP را توصیف می‌کند. کاربرد مناسب این چارچوب‌ها مستلزم آن است که نتایج در چارچوب فرمول‌بندی مشکل خاص در نظر گرفته شود.

پیوست الف

(آگاهی‌دهنده)

مثال‌های مطالعه موردی

الف-۱ کلیات

چندین نمونه کار شده از چارچوب پشتیبانی تصمیم‌گیری در این پیوست ارائه شده است. هدف از این پیوست، استفاده از چارچوب پشتیبانی تصمیم‌گیری به منظور روشن کردن نیازهای نمونه‌برداری و تحلیل روش است. نتیجه‌گیری و انتخاب‌های اسناد در اینجا فقط برای شرح ارائه شده است.

همانطور که در زیربند ۶-۳ ذکر شد، پنج کاربرد مطالعه موردی خاص به تفصیل ارائه شده است. مطالعات موردی گنجانده شده در این پیوست، براساس در دسترس بودن منابع علمی کافی برای پرداختن به جنبه‌های مختلف چارچوب انتخاب شدند.

الف- قطعات سبک ساخته شده از اپوکسی - نانولوله کربنی چنددیواره (به عنوان مثال کاربرد در هواپیما). این مثال حالتی را نشان می‌دهد که MNM نسبت به زمینه واجهنده تر است.

ب- منسوجات آغشته شده به نانوذرات نقره. این مثال حالتی را نشان می‌دهد که MNM نسبت به زمینه واجهندگی کمتری دارد.

پ- به چوب‌هایی آغشته شده به MNM بر پایه مس که در فضای باز در خاک قرار می‌گیرند (مثلاً تیرهای چوبی ایوان). این مثال حالتی را نشان می‌دهد که MNM نسبت به زمینه واجهندگی کمتری دارد. برخی از چالش‌های اندازه‌شناسی در اینجا در سناریوهای منسوج-نقره یا نقاط کوانتومی در یک بسپار مشابه هستند.

ت- قطعات خودرو ساخته شده از MWCNT یا Fe_2O_3 در گرمانرم (PP و PA). این مثال موردی را نشان می‌دهد که در آن MNM و زمینه هر دو در برابر بیشتر تنش‌ها واجهنده هستند، اما نه همیشه به یک اندازه. فرایندهای پایان عمر هم برای MNM و هم برای زمینه مخرب هستند. چالش‌های اندازه‌شناختی در این مورد شبیه به آن چیزی است که با اکسید فلز در رنگ‌ها یا پوشش‌ها مشاهده می‌شود (سازوکارهای تخریب زمینه مشابه، اما چالش‌های اندازه‌شناختی کمتر).

ث- چاپ سه‌بعدی MWCNT حاوی گرمانرم. این مثال توضیح می‌دهد که MNM نسبت به زمینه واجهنده تر است. انتظار می‌رود فرایندهای پایان عمر هم برای MNM و هم برای زمینه مخرب باشند.

مثال‌ها از فرایند ساختاریافته یکسانی برای هر نگرانی رهایش پیروی می‌کنند: سناریوهای رهایش به همراه ماهیت زمینه و MNM شناسایی می‌شوند. سپس پیامدهای هر یک از این عوامل شناسایی و در صورت لزوم شرح داده می‌شود. شکل‌های رهایش و روش‌های مورد استفاده در منابع علمی شرح داده شده، شناسایی شده است. مرحله‌های اضافی اطلاعات مربوط به محتوای MNM (به‌عنوان مثال درصد)، اطلاعات مربوط به سازگاری با زمینه و پراکنه در زمینه را دریافت می‌کند. برای هر یک از این مرحله‌ها، پیامدهایی برای مرحله چرخه‌حیات مرتبط مشخص می‌شود. جدول ۵ ساختار استفاده شده برای هر یک از مثال‌ها را توضیح می‌دهد.

تمام مثال‌های این پیوست از روند ساختاری مشابهی پیروی می‌کنند که در جدول ۵ آمده است.

برای استفاده از چارچوب، از بالا به پایین و از راست به چپ کار کنید: ابتدا از مرحله (۱) برای شناسایی سناریوهای رهایش استفاده کنید، سپس به مرحله (۲) برای شناسایی زمینه، مرحله (۳) برای شناسایی MNM بروید. برای هر خط، سؤال را بیان کنید، پاسخ را جمع‌آوری کنید و پیامدها را در نظر بگیرید. پیامدها بر رهایش و متمایز کردن چهار مرحله اصلی چرخه‌حیات متمرکز هستند که در آن ساخت و/یا هم‌گذاری بیش از هر چیز، نگرانی‌های شغلی ایجاد می‌کند، مرحله استفاده عمدتاً نگرانی‌های مصرف‌کننده و زیست‌محیطی و مرحله پایان عمر عمدتاً نگرانی‌های زیست‌محیطی ایجاد می‌کند. پیامدهای افزوده را می‌توان برای انعکاس وضعیت در نظر گرفت. هر سلول شواهدی از منابع علمی مربوط به مثال ارائه می‌دهد. مرحله ۴ اختیاری است و اطلاعات مربوط به محتوای MNM (به‌عنوان مثال درصد)، اطلاعات را در مورد سازگاری با زمینه و پراکنش در زمینه جمع‌آوری می‌کند. برای هر یک از این مرحله‌ها، پیامدهایی را برای مرحله چرخه‌حیات نیز در نظر می‌گیریم. دو سطر پایانی به شکل‌های رهایش و روش‌های مورد استفاده برای اندازه‌گیری رهایش (همانطور که در منابع علمی شرح داده شده است) می‌پردازد. صورت(های) تکه‌های رهایش یافته، یعنی میزان اتصال MNM به زمینه در تکه‌های رهایش یافته (کاملاً، تا حدی، دست‌نخورده)، با شماهای مناسب در شکل ۳ نشان داده شده است.

الف-۲ قطعات سبک ساخته شده از اپوکسی - نانولوله کربنی چنددیواره

جدول الف-۲، استفاده از چارچوب پشتیبانی تصمیم‌گیری را با استفاده از داده‌های مربوط به قطعه‌های چندسازه سبک اپوکسی - نانولوله کربنی چنددیواره به کاررفته در هواپیما نشان می‌دهد. در این مثال، MNM نسبت به زمینه واجهنده‌تر است. انتظار می‌رود فرایندهای پایان عمر هم برای MNM و هم برای زمینه مخرب باشند.

جدول الف - ۲- توضیح چارچوب پشتیبانی تصمیم‌گیری برای قطعات سبک ساخته‌شده از اپوکسی - نانولوله کربنی چنددیواره به‌کاررفته در هواپیما



پایان عمر		مرحله استفاده	مرحله هم‌گذاری	مراحل ساخت	پاسخ	پرسش	
عمل‌آوری نهایی در کارخانه زباله‌سوزی:	ساختار شکنی قطعات بزرگتر:	چندسازه‌ها معمولاً پوشانده می‌شوند (رنگ، مواد دیگر)، بنابراین به‌عنوان مثال، با هوازدگی تخریب شیمیایی نمی‌شوند. چرخه مکانیکی به دلیل بارگذاری‌های مختلف ممکن است منجر به تغییرات مواد شود (ترک خوردگی‌های محلی؟) ترک خوردگی‌های محلی می‌توانند در چندسازه‌های کربن - اپوکسی مورد استفاده در ساختار فضاپیماها ظاهر شوند [195] در مرحله استفاده رهايش تصادفی (بسیار نادر) و تعمیرات احتمالی (به مرحله هم‌گذاری مراجعه کنید) را داریم استفاده (حوادث، تعمیرات) و پایان عمر (بازیافت): تنش مکانیکی (سرعت‌های نسبی بر حسب m/s، برای چند ثانیه)	در طول هم‌گذاری در هواپیما: فرایندهای مکانیکی، ماشین‌کاری (سوراخ‌کاری، اره‌کشی ^۱ ، سنباده‌زنی)، انحنای دادن ^۲ ، پخت [195] (سرعت‌های نسبی بر حسب m/s، برای چند ثانیه)	مخلوط کردن در رزین (آسیاکاری سه‌میله‌ای) تنش گرمایی محدودشده (پخت: C ۱۲۰، ۴ h) [105] آماده‌سازی چندلایه ^۱ تقویت‌شده با الیاف شیشه یا چندلایه‌های تقویت‌شده با الیاف کربن یا MWCNT چندسازه‌های نهایی را تشکیل می‌دهند [38] نانوجندسازه‌های MWCNT / بسیار با فرایند روزن‌رانی [113]، [197] توجه: در مرحله هم‌گذاری و استفاده، چندسازه‌های نهایی (یعنی اپوکسی + MWCNT + شیشه ماکروسکوپی / الیاف کربن) بررسی خواهد شد	قطعات سبک ساخته‌شده از چندسازه‌های اپوکسی به‌کاررفته در هواپیما چندسازه‌های بر پایه اپوکسی به دلیل استحکام و سختی ویژه بالا، وزن کم و عدم خوردگی آنها در سازه‌های قاب هواپیماهای تجاری استفاده شده است [195]، [196].	سناریو(های) رهايش	۱
	تنش گرمایی شدید حین زباله‌سوزی: کمینه °C ۸۵۰ در دقیقه برای کمینه ۲ ثانیه (شرایط اجباری برای کارخانه‌های زباله‌سوزی) [1948]						

جدول الف - ۲ (ادامه)

پیامدهای اندازه‌گیری رهائش			پاسخ	پرسش	
پایان عمر	مرحله استفاده	مرحله هم‌گذاری	مراحل ساخت		
نقطه اشتعال $> 600^{\circ}\text{C}$ تخریب بالاتر از 500°C	از دیداد طول در شکست بالاتر از ۵٪ تا ۶٪، انتظار می‌رود که تحت تنش مکانیکی به تکه‌های نسبتاً بزرگ‌تر ($>> 100\text{ nm}$) تکه شود	بسپارهای گرماسخت از نظر شیمیایی بسیار واجهنده هستند، تنش گرمایی (دمای بالا) مورد انتظار نیست رزین‌های اپوکسی خواص عالی مانند پایداری گرمایی و مکانیکی بالا و مقاومت شیمیایی مناسب نشان می‌دهند [199]	انتشار بخارات حین مخلوط‌کردن رزین و سخت‌کننده. دژدود (فیوم) بسپاری در فرایند روزن‌رانی رهائش می‌شود [197]	اپوکسی	۲ شناسایی زمینه
MWCNT در دمای بالای 600°C در هوا تجزیه می‌شود [53] پنگ و همکاران [202]، اکسایش MWCNTs را با آنالیز گرموزن‌سنجی (TGA) در هوا مورد مطالعه قرار دادند. بیشینه نرخ افت وزن در دمای 695°C با نرخ حرارت‌دهی	MWCNT می‌تواند تحت کشش مکانیکی پاره / شکسته شود، اگرچه احتمال خروج بیشتر است	علاوه بر تعمیرات (به هم‌گذاری مراجعه کنید) هیچ تغییری حین پیرسازی مورد انتظار نیست. تعدادی از مطالعات تخریب با UV نشان داد که لایه سطحی غنی از اپوکسی نانوچندسازه نسبتاً سریع حذف و سطح تقریباً کامل با شبکه‌ای از MWCNT پوشیده شد [31]، [33]، [41]، [201]. یکپارچگی آسیبی ندید	MWCNT می‌تواند تحت کشش مکانیکی پاره / شکسته شود، اگرچه احتمال خروج بیشتر است MWCNTs بیرون‌زده از تکه‌های بسپاری پس از ماشین‌کاری مکانیکی در بسیاری از مطالعات مشاهده شده‌اند [38]، [40]، [41]، [68]، [105] MWCNTs رهائش‌یافته ممکن است در طول فرایند سایش در مقایسه با نمونه‌های جاسازی‌شده کوتاه شوند [105]	MWCNT	۳ شناسایی MNM

<p>۱ °C/min اتفـاق افتـاد. پایـداری اکسایشی MWCNTs به عیوب و قطر لوله بستگی دارد [203]. MWCNTs پایداری گرمایی بالایی دارند و می‌توانند پس از عملیات گرمایی چندسازه‌ها در معرض مواجهه قرار گیرند و همچنان یکپارچگی ساختاری خود را حفظ کنند [204]. رهایش MWCNTs با تجزیه گرمایی چندسازه‌های – epoxy MWCNTs در یک کوره لوله‌ای مشاهده نشد [69].</p>						
--	--	--	--	--	--	--

جدول الف - ۲ (ادامه)

پیامدهای اندازه‌گیری رهایش				پاسخ	پرسش	
پایان عمر	مرحله استفاده	مرحله هم‌گذاری	مراحل ساخت			
خاکستر باقی‌مانده ممکن است حاوی MWCNT نسوخته باشد [205].				پراکنه ضعیف MWCNTs در اپوکسی در ۴٪ گزارش شده است [40].	محتوا و سازگاری در MNM در زمینه، وضعیت پراکنه MNM در زمینه	۴
MWCNT در دمای بالاتر از ۶۰۰ °C در هوا تجزیه می‌شود [53]	اره‌کشی منجر به تکه‌هایی با MWCNT جاسازی شده، گاهی اوقات MWCNT بیرون‌زده، بدون MWCNT آزاد می‌شود [46]	برای تعمیرات تکه‌های مشاهده شده با MWCNT جاسازی شده، گاهی اوقات MWCNT بیرون‌زده، بدون MWCNT آزاد [۴۴]، [206]	تکه‌های مشاهده شده با MWCNT جاسازی شده، گه‌گاه MWCNT بیرون‌زده، بدون MWCNT آزاد [206]، [47]، [46]، [44]	بدون نشر MWCNT	= شکل‌های رهایش در منابع علمی برای مورد خاص مشاهده شده است	
			 مقدار بسیار کمی از MWCNTs تکی و کلوخه مستقر از چندسازه‌های اپوکسی با سایش [68]، [105] و سنباده‌زنی با ۴٪ MWCNT رهایش یافتند [40]			

جدول الف - ۲ (ادامه)

پیامدهای اندازه‌گیری رهائش				پاسخ	پرسش	
پایان عمر	مرحله استفاده	مرحله هم‌گذاری	مراحل ساخت			
نمونه‌برداری زمان واقعی هواسل، برای آنالیز ذرات NAS / نمونه‌های صافی با استفاده از ابزار FMPS، SMPS، CPC، SEM، آنالیز خاکستر SEM / باقی‌مانده با TXRF [205] ^{۱۰}	نمونه‌برداری زمان واقعی هواسل، برای آنالیز نمونه‌های صافی ذرات با استفاده از ابزار FMPS، SMPS، CPC، TEM، SEM [46]	تخریب UV، مواجهه با رطوبت و حمام آب به‌عنوان شبیه‌سازی تنش و تلفیق با ماشین‌کاری [65] برای تعمیرات: به مرحله هم‌گذاری مراجعه کنید	سنباده‌زنی، سایش، سوراخ‌کاری خشک و تر، ازه‌کشی، آسیاب کردن، برس زدن به‌عنوان شبیه‌سازی تنش [207] نمونه‌برداری زمان واقعی از هواسل، برای آنالیز ذرات NAS / نمونه‌های صافی با استفاده از ابزار FMPS ^۷ ، SMPS ^۸ ، CPC ^۹ ، SEM NIOSH 5040 [139] پروژه NanoRelease [208]	روش‌های مورد استفاده در منابع علمی ذکر شده		
¹ Laminate ² Sawing ³ Winding ⁴ Shredding ⁵ Fume ⁶ Pang ⁷ Fast Mobility Particle Sizer ⁸ Scanning Mobility Particle Sizer ⁹ Condensation Particle Counter ¹⁰ Total Reflection X-Rays Fluorescence						

الف-۳ منسوجات آغشته شده به نانوذرات نقره

جدول الف-۳، استفاده از چارچوب پشتیبانی تصمیم‌گیری را با استفاده از داده‌های نانوذرات نقره در نساجی برای کاربردهای ضد میکروبی نشان می‌دهد. این مثال گنجاندن نانوذرات نقره در منسوجات پنبه/پلی استر برای لباس‌هایی با اهداف ضدباکتری را نشان می‌دهد و موردی را نشان می‌دهد که MNM نسبت به زمینه واجهندگی کمتری دارد. دو فرایند پایان عمر در نظر گرفته شده است: دفع پارچه در خاک‌چال و زباله‌سوزی.

جدول الف - ۳- توضیحات چارچوب پشتیبانی تصمیم‌گیری برای نانوذرات نقره در کاربردهای نساجی

پیامدهای اندازه‌گیری رهائش		پاسخ	پرسش	
پایان عمر		مراحل ساخت	مرحله استفاده	
زباله‌سوزی	خاک‌چال	رهائش حین استفاده می‌تواند عمده‌تاً به دلیل شستشوی‌های خانگی از جایی که آب‌های رهائش یافته به سامانه فاضلاب، WWTP و بعداً به محیط‌زیست می‌روند، اتفاق بیفتد [210]، [211] در پوشاک، سایش مکانیکی و عرق تولیدشده حین پوشیدن منسوجات می‌توانند رهائش ایجاد کند [212]، [213]	منسوجات ضد میکروبی مورد استفاده برای لباس (مانند جوراب، زیرپیراهنی، شلوار)	۱ سناریوهای رهائش
عملیات نهایی در کارخانه زباله‌سوزی: تنش گرمایی شدید در حین زباله‌سوزی، به‌عنوان مثال اتحادیه اروپا شرایط اجباری زیر را برای این کارخانه‌ها دارد: کمینه °C ۸۵۰، برای کمینه زمان ۲ s [198]	منسوجات معمولاً به خاک‌چال ریخته می‌شوند، جایی که آبشویی نانوذرات به خاک می‌تواند رخ دهد [214]، [215]	نانوذرات Ag معمولاً از طریق فرایند لایه‌گذاری ^۱ به منسوجات وارد می‌شوند [209] از آنجایی که نانوذرات Ag در یک پراکنه (شیمی‌تر) هستند، احتمال رهائش در هوا وجود ندارد. با این حال، اگر محلول آغشته‌سازی یا آب مورد استفاده برای تمیز کردن گیرنده‌ها به‌درستی دفع نشود، نانوذرات نقره می‌توانند پس از دفع در سامانه فاضلاب به WWTP برسند.		

جدول الف - ۳ (ادامه)

پیامدهای اندازه‌گیری رهائش		پاسخ	پرسش		
پایان عمر	مرحله استفاده	مراحل ساخت			
پنبه در دمای بالاتر از ۱۵۰ °C تجزیه می‌شود پلی استر در دمای بالاتر از ۵۰۰ °C تجزیه می‌شود	پنبه ————— زیست‌تخریب‌پذیر است. حدود ۲۰۰ سال طول می‌کشد تا بقایای پلی‌استر تجزیه شوند.	رهائش منسوجات حین فرایند ساخت (مثلاً لایه‌گذاری) احتمالاً محدود است	رهائش منسوجات حین فرایند ساخت (مثلاً لایه‌گذاری) احتمالاً محدود است	بیشتر منسوجات عملیاتی شده متداول پنبه و پلی‌استر هستند	۲ شناسایی زمینه
Ag در دمای ۹۶۲ °C ذوب می‌شود.	نقره در دو شکل اصلی وجود دارد: Ag ⁰ (نانوذره) و Ag ⁺ (یون حل شده) [215]	شواهدی از اصلاح نقره زیر نور خورشید یافت شده است [211].	عموماً از نانوذرات نقره در پراکنه (شیمی تر) استفاده می‌شود که به احتمال زیاد رهائش نمی‌شود. هنگامی که از آن به‌عنوان پودر استفاده می‌شود، ممکن است به‌دلیل رهائش در هوا، یک مواجهه شغلی رخ دهد.	نانوذرات Ag	۳ شناسایی MNM

جدول الف - ۳ (ادامه)

پیامدهای اندازه‌گیری رهائش		پاسخ	پرسش
پایان عمر	مرحله استفاده	مراحل ساخت	
روش استاندارد EPA 1311: روش اجرایی آبشویی مشخصه‌یابی سمیت [214] ICP-MS، اندازه‌گیر زتا [214]	استاندارد ISO 105-C06، ماندگاری ^۲ رنگ در شستشوی خانگی و تجاری ICP-MS (sp) ICP-OES [214]؛ TSEM ^۳ و STEM ^۴ جفت‌شده به EDX ^۵ [216] بازدهی ضد میکروبی پارچه‌ها با توجه به اصلاح جزئی روش آزمون AATCC 100-2004 آزموده شد [210]	فرایند لایه‌گذاری [214]	روش‌های مورد استفاده در منابع علمی نشان داده شده
¹ Padding ² Fastness ³ Transmission Mode Of The Sem ⁴ Scanning Transmission Electron Microscopy ⁵ Transmission Scanning Electron Microscopy			

الف-۴ چوب‌های آغشته به MNM بر پایه مس، قرارگرفته در فضای باز در خاک

جدول الف-۴، استفاده از چارچوب پشتیبانی تصمیم‌گیری را با استفاده از داده‌های چوب‌های آغشته به MNM بر پایه مس که در فضای باز در خاک قرار می‌گیرند (مانند تیرهای چوبی استفاده شده در ایوان) نشان می‌دهد. زمینه و MNM به‌عنوان محمل رهایش کنترل‌شده یون مس برای جلوگیری از زیست‌تخریبی قارچی در سطح چوب عمل می‌کنند. این مثال حالتی را نشان می‌دهد که MNM پایدار نیست (از زمینه چوب واجهنده‌تر است). برخی از چالش‌های اندازه‌شناسی در اینجا در سناریوهای نساجی Ag یا QD در یک بسیار مشابه هستند.

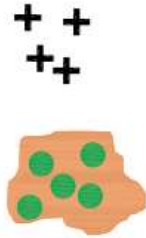


جدول الف -۴- چوب بسیار ریزشده عمل آوری شده با مس

پیامدهای اندازه گیری رهایش				پاسخ	پرسش
پایان عمر	استفاده تصادفی	مرحله استفاده	ساخت		
زباله سوزی تجاری یا شرایط هوازدگی خاک چال	اولیه: اره کشی، سنباده زنی، ساییدگی مکانیکی و انسانی شکست ساختار ^۳ در سوزاندن در فضای باز (حیات)	چوب تحت فشار قرار داده شده در برابر هوازدگی در فضای باز (UV، باران، آب نمک، رطوبت زمین و زیست تخریبی قارچی) مقاومت می کند	تزییق پیوسته فشار، دوازده طبقه بندی برای کاربردهای مختلف (AWPA) ^۱ [219] ۸۰٪ ارزش بازار، چوب تحت فشار قرارداد شده کاج جنوبی با مس آزوله ^۲ بسیار ریز است [72]	فضای باز/داخلی (تماس با زمین، ساختاری) زمین های بازی، شمع های اسکله، پیاده روی روی تخته	سناریوهای رهایش
مشابه بالا	مشابه بالا	چوب نسبتاً در برابر عوامل هوازدگی، به جز برای زیست تخریبی واجهنده است	فرآوری السوار، منجر به رهایش غبار چوب می شود که می تواند برای سلامتی مخاطره آمیز باشد	به طور معمول، کاج زرد جنوبی (AWPA)	شناسایی زمینه

جدول الف - ۴ (ادامه)

پیامدهای اندازه‌گیری رهایش			پاسخ	پرسش
پایان عمر	استفاده تصادفی	مرحله استفاده	ساخت	
اگرچه زباله‌سوزی چوب - مس بسیارریزشده گزارش نشده است، زباله‌سوزی چوب‌های آمایش شده با CCA منجر به تبخیر As می‌شود درحالی‌که Cr و Cu در خاکستر باقی می‌مانند [223]	تکه‌های چوبی از چوب‌های پیش‌هوازدگی با سنباده‌زنی ذرات مس کربنات بسیارریزشده، رهایش شده است [72] سایش مکانیکی پسا‌هوازدگی یا تماس با انسان، تکه‌های سلولزی را رهایش می‌کند که ممکن است حاوی یون مس کمپلکس آلی باشد، اما به احتمال زیاد حاوی نانوذرات مس کربنات نیستند [220] اگرچه سوزاندن چوب - مس بسیارریزشده گزارش نشده است، سوزاندن در فضای باز چوب‌های عمل‌آوری‌شده با ^{235}U CCA منجر به تبخیر As می‌شود در حالی که Cr و Cu در خاکستر باقی می‌مانند [222]	رهایش کنترل‌شده یون مس، رشد کپک و قارچ و متعاقب آن زیست‌تخریبی را مهار می‌کند کارایی چوب آغشته به مس کربنات بسیارریزشده تقریباً مشابه با مس معمولی (غیر ذره‌ای) است.	مس کربنات بسیارریزشده در زمینه چوب محافظت می‌شود یون مس کمپلکس آلی و آزاد در سطح چوب رهایش می‌شود 	شناسایی MNM ذرات مکعبی مس کربنات بسیارریزشده ۵۰ nm تا ۱۰۰ nm تقریباً ۶۰٪ تعداد $100\text{ nm} >$ [72]، [73]
NA	NA	چوب معمولاً خشک می‌شود و مس کربنات اضافی سطح آن حذف می‌شود. از تجربه شخصی در فروشگاه‌های خرده‌فروشی، مس کربنات باقی‌مانده از «چوب تر» به‌طور نامناسب خشک‌شده می‌تواند پوشش خمیری مانند که به راحتی منتقل می‌شود، روی چوب ایجاد کند.	چوب با فرمول‌بندی مس کربنات آزوله بسیارریزشده اختصاصی در یک مخزن تحت فشار، به‌صورت پیوسته تزریق می‌شود 	محتوا و سازگاری MNM در زمینه، وضعیت پراکنه MNM در زمینه بارگذاری چوب - مس بسیارریزشده بسته به کاربرد مورد نظر چوب، بین 0.06 lbs/ft^3 تا 0.31 lbs/ft^3 است [219]

جدول الف - ۴ (ادامه)

پیامدهای اندازه‌گیری رهایش		پاسخ	پرسش	
<p>پایان عمر</p> <p>زباله‌سوزی چوب عمل‌آوری‌شده با CCA در ۱۶۷۳ K تا ۸۷۲ K دماهای منجر به تبخیر As می‌شود در حالی که Cr و Cu در خاکستر باقی می‌مانند [223]</p>	<p>استفاده تصادفی</p> <p>یون مس از خاک آره و غبار سنباده به شکل‌های مشابه چوب جامد آبشویی‌شد [220]</p>  <p>سوزاندن چوب عمل‌آوری‌شده با CCA در فضای باز منجر به تبخیر As می‌شود، در حالی که Cr و Cu به صورت $CuCr_2O_4$ و $CuCrO_2$ در خاکستر باقی می‌مانند [222]</p>	<p>مرحله استفاده</p> <p>مس از چوب خریداری‌شده و هوازده شده حین آزمون‌های شبیه‌سازی‌شده با قرار گرفتن در مواجهه پوستی [72] و سایش مکانیکی [83] رهایش شد</p>  <p>آبشویی محیطی یا پروتکل هوازدگی NanoRelease نشان داد که مس عمدتاً به صورت یونی رهایش می‌شود</p> 	<p>ساخت</p> <p>مس رهایش یافته حین فرایند ساخت گزارش نشده است</p>	<p>شکل‌های رهایش مشاهده شده در منابع علمی برای مورد خاص</p>
<p>روش‌های مورد استفاده در آنالیز هواسل در مدل‌های سوزاندن باز و تجاری شامل: نمونه‌برداری مودی، ICP-MS، SEM، WD-XRF، XRD [222]، [223]</p>	<p>روش‌های پاک‌کردن، نمونه‌برداری، سایش، آنالیز هواسل شامل APS، SMPS، DMA، CPC، SEM، ICPMS می‌شود [83]</p> <p>آزمون‌های آبشویی با استفاده از EN 84 یا پروتکل هوازدگی NanoRelease، آنالیز با تک ذره ICP-MS، AUC، UV-Vis، ICP-MS [73]، TEM، SEM، XRD</p>	<p>روش‌های پاک‌کردن اصلاح‌شده CPSC و NIST در محل کار اعمال نشده است. روش‌های آنالیزی برای هوا و سطوح عبارتند از: APS، SMPS، DMA، CPC، ICP-MS، SEM، XRD...</p>	<p>روش‌های مورد استفاده در منابع علمی شرح داده شده است</p>	

¹ American Wood-Preservers' Association
² Azolate
³ Deconstruction
⁴ Chromated Copper Arsenate
⁵ Advanced Photon Source
⁶ Dynamic Mechanical Analysis
⁷ Moudi
⁸ Wavelength Dispersive X-Ray Fluorescence

الف-۵ قطعات خودرو ساخته شده از MWCNT یا Fe_2O_3 در بسپارهای گرماسخت (PA و PP)

جدول الف-۵، استفاده از چارچوب پشتیبانی تصمیم‌گیری را با استفاده از داده‌های مربوط به قطعات خودرو ساخته شده از MWCNT یا Fe_2O_3 در گرمانرم‌ها (PA و PP) نشان می‌دهد. این مثال موردی را نشان می‌دهد که در آن MNM و زمینه هر دو در برابر بیشتر تنش‌ها واجهنده هستند، اما نه همیشه به یک اندازه. فرایندهای پایان عمر می‌توانند هم برای MNM و هم برای زمینه مخرب باشند. چالش‌های اندازه‌شناختی در این مورد شبیه به آن چیزی است که با اکسید فلز در رنگ‌ها یا پوشش‌ها مشاهده می‌شود (سازوکارهای تخریب زمینه مشابه، اما چالش‌های اندازه‌شناختی کمتر).

جدول الف -۵- قطعات خودرو ساخته شده از MWCNT یا Fe₂O₃ در گرمانرم‌ها (PA و PP): هر دو MNM و زمینه در برابر بیشتر تنش‌ها واجهنده هستند، اما فرایندهای پایان عمر ممکن است برای MNM و زمینه مخرب باشند

پایان عمر		پایان عمر	استفاده	ساخت	پاسخ	پرسش	
تصفیه نهایی در کارخانه زباله‌سوزی:	ساختار شکنی قطعات بزرگتر:	تنش مکانیکی (سرعت‌های نسبی بر حسب m/s، برای چند ثانیه)	تخریب شیمیایی (هوازدگی، برای چندین سال)	تنش گرمایی محدود (قالب‌گیری تزریقی: ۲۳۰ °C، ۱۰ s)	قطعات خودرو ساخته شده از نانوچندسازه‌های گرمانرم	سناریو(های) رهايش	۱
تنش گرمایی شدید در طول (زباله‌سوزی پسماند: ۸۵۰ °C، ۲ s)	ازدیاد طول در شکست بیش از ٪ ۱۰، انتظار می‌رود به تکه‌های نسبتاً بزرگتر تکه تکه شود (<< ۱۰۰ nm) تحت تنش مکانیکی.	نسبتاً واجهنده در اثر هوازدگی (لایه سطحی نازک میکرومتری تخریب می‌شود)	واجهنده در برابر تنش گرمایی محدود (بدون تخریب شیمیایی قابل توجه، اما دژدوهای بسیاری ممکن است رهايش شود)	PA یا PP	شناسایی زمینه	۲	
MWCNT در دمای بالاتر از ۶۰۰ °C در هوا تجزیه می‌شود [53]. ذرات Fe ₂ O ₃ در ۸۵۰ °C پایدار هستند، اما ممکن است تبلور را تغییر دهند [53].	MWCNT ممکن است تحت کشش مکانیکی پاره شود، اگرچه خروج احتمال بیشتری دارد ذرات Fe ₂ O ₃ در برابر تنش‌های مکانیکی واجهنده هستند	MWCNT و Fe ₂ O ₃ از نظر شیمیایی در برابر هوازدگی مقاوم هستند.	MWCNT و Fe ₂ O ₃ از نظر شیمیایی در برابر تنش گرمایی محدود مقاوم هستند.	Fe ₂ O ₃ یا MWCNT	شناسایی MNM		

جدول الف - ۵ (ادامه)

پیامدهای اندازه‌گیری رهائش			پاسخ	پرسش
پایان عمر	مرحله استفاده	مراحل ساخت		
<p>سطوح اندک MWCNTs و نانوذرات Fe_2O_3 در هواسل رهائش شده. MWCNT در هواسل آشکارسازی نشد.</p> <p>خاکستر باقیمانده (زمانی که Fe_2O_3 پرکننده MNM است) بیشتر از افزودنی MNM تشکیل شده است [53]، [54]</p>	<p>پارامترهای مورد نیاز برای پیش‌بینی مدل‌ها یا گروه‌بندی‌های آینده</p>	<p>پارامترهای مورد نیاز برای پیش‌بینی مدل‌ها یا گروه‌بندی‌های آینده</p>	<p>زیر ۵٪ سازگاری، پراکنه ناشناخته</p>	<p>محتوا و سازگاری در MNM، زمین‌ه، وضعیت پراکنه MNM در زمینه</p>
<p>نانوپودر کلوخه‌شده به‌عنوان خاکستر باقیمانده (در صورت استفاده از افزودنی MNM Fe_2O_3) [53]</p>  <p>استحاله بالقوه زمینه رهائش شده به دلیل وجود افزودنی MNM (به‌عنوان مثال افزایش محتوای PAH) [52]</p> 	<p>تکه‌های مشاهده‌شده با MNM جاسازی‌شده، گاهی اوقات MNM بیرون‌زده، بدون MNM آزاد [36]، [221]</p> 	<p>تکه‌های مشاهده‌شده با MNM جاسازی‌شده، بدون MNM آزاد [44]، [206]</p> 	<p>هواسل‌های آلی مشاهده‌شده (دژدوهای بسیاری، که از نظر شیمیایی با زمینه شناسایی می‌شوند) [224]، [225]</p> 	<p>شکل‌های رهائش مشاهده شده در منابع علمی برای مورد خاص</p>

جدول الف - ۵ (ادامه)

		پرسش	پاسخ	پیامدهای اندازه‌گیری رهایش
پایان عمر		مرحله استفاده	مراحل ساخت	
<p>نمونه‌برداری از هواسل در زمان واقعی و اندازه - تکه‌تکه‌شده به‌وسیله ضربه‌گیر آبخاری فشرده.</p> <p>اندازه‌گیری اندازه زمان واقعی در محل با اندازه‌گیر ذرات هواسل و اندازه‌گیر روبش تحرک ذرات.</p> <p>نمونه‌برداری از خاکستر باقی‌مانده.</p> <p>TGA-FTIR در محل برای شناسایی گازهای خاموش^۲.</p> <p>هر دوی هواسل رهایش‌شده و خاکستر باقیمانده با ICP-MS (ترکیب‌بندی عنصری)، GS-MS (کمی‌سنجی کربن عنصری در مقابل آلی)، EM با EDX (ریخت‌شناسی و ترکیب‌بندی شیمیایی)، NMR (ترکیب‌بندی شیمیایی)، XRD (آنالیز فاز بلوری) آزمایش شدند [54]، [53]، [226]</p>	<p>شبییه‌سازی تنش = ISO 4892-3 = [231] تا 535 MJ/m^2.</p> <p>نمونه‌برداری = غوطه‌وری سیال‌های + فراصوت</p> <p>آنالیز = TEM، JCPMS، UVVis، AUC/FFF.</p> <p>(= هوازگی NanoRelease پروتکل)</p>	<p>شبییه‌سازی تنش = سنباده‌زنی نمونه‌برداری = هواسل؛ آنالیز = SEM، CPC</p> <p>(= بهترین تقریب موجود از تنش‌های دنیای واقعی)؛</p>	<p>نمونه‌برداری از هواسل در دنیای واقعی ساخت. آنالیز با SEM، EDX، CPC</p>	<p>روش‌های مورد استفاده در منابع علمی ذکر شده</p>

¹ Polycyclic Aromatic Hydrocarbons

² Off gas

^۳ گازی که به‌عنوان محصول فرعی یک فرایند صنعتی تولید می‌شود یا با یک شی یا ماده ساخته‌شده خارج می‌شود

الف-۶ چاپ سه‌بُعدی MNM حاوی گرمانرم

الف-۶-۱ کلیات

جدول الف-۶، استفاده از چارچوب پشتیبانی تصمیم‌گیری را با استفاده از داده‌های چاپ سه‌بُعدی MNM (MWCNT) حاوی گرمانرم‌ها نشان می‌دهد. این مثال از دو سناریوی ره‌ایش (خانه و مدرسه) استفاده می‌کند که هر کدام برای آنها ارزیابی شده است

الف- فرآوری مذاب توسط مصرف‌کننده؛

ب- استفاده مصرف‌کننده از محصول و

پ- دفع.

این مثال موردی را نشان می‌دهد که در آن MNM نسبت به زمینه واجهنده‌تر است، اما انتظار می‌رود فرایندهای پایان عمر هم برای MNM و هم برای زمینه مخرب باشند.

الف-۶-۲ سناریوی ره‌ایش ۱

الف-۶-۲-۱ مرحله‌های ساخت و هم‌گذاری

یک چاپگر سه‌بُعدی در خانه با استفاده از یک رشته ABS^۱ با MWCNT برای چاپ یک لیوان قهوه در دمای ۲۳۰ °C به مدت ۶ ساعت (مقادیر فرضی) استفاده می‌شود. چاپگر سه‌بُعدی در زیرزمین قرار دارد و خانه دارای سامانه HVAC^۲ بدون کنترل‌های مهندسی دیگر است. نگرانی در این مرحله، ره‌ایش ذرات آزاد MWCNT یا ABS با بیرون‌زده از زمینه است.

الف-۶-۲-۲ مرحله استفاده

لیوان قهوه با دهان و دست خود کاربر در تماس است.

الف-۶-۳-۲ پایان عمر

لیوان قهوه در سطل زباله دفع می‌شود.

الف-۶-۳ سناریوی ره‌ایش ۲

الف-۶-۳-۱ مرحله‌های ساخت و هم‌گذاری

1- Acrylonitrile Butadiene Styrene

2- Heating, Ventilation, and Air Conditioning

یک چاپگر سه‌بعدی در کلاس مدرسه ابتدایی استفاده می‌شود. چاپگر سه‌بعدی از یک رشته ABS با MWCNT برای چاپ یک اسباب‌بازی در دمای °C ۲۳۰ به مدت ۶ ساعت استفاده می‌کند. بچه‌ها در تمام روز و زمان هم‌گذاری، در کلاس هستند. نگرانی در این مرحله، ره‌ایش ذرات آزاد MWCNT یا ABS با MWCNT بیرون‌زده از زمینه است.

الف-۶-۳-۲ مرحله استفاده

اسباب‌بازی، یک چک^۱ یا قسمتی از چکر^۲ است که کودکان روزانه از آن استفاده می‌کنند. بچه‌ها به قطعات دست می‌زنند و احتمالاً در دهانشان قرار می‌دهند. تکه‌هایی از مواد ممکن است در کلاس به‌صورت غبار جمع شوند.

الف-۶-۳-۳ پایان عمر

قطعات چکر در سطل زباله ریخته می‌شوند.

1- Check
2- Checker Piece

جدول الف -۶- چاپ سه‌بُعدی MNM حاوی گرمانرم


پيامدهای اندازه‌گیری رهائش			پاسخ	پرسش		
پایان عمر	مرحله استفاده	مرحله هم‌گذاری	مراحل ساخت			
آماده‌سازی نهایی در کارخانه زباله‌سوزی:	خاک‌چال	ممکن است مرتباً به کار رود در معرض دمای بالا قرار می‌گیرد	ممکن است نیاز به هم‌گذاری داشته باشد یا نداشته باشد.	رشته‌های ABS چندسازه‌های MWCNT در دسترس را خریداری کنید	چاپ سه‌بُعدی قطعات با «برساخت رشته ذوب‌شده ^۱ » (FFF) درجه مصرفی برای مصرف‌کنندگان به بازار عرضه شده است	۱ سناریوهای رهائش
تنش گرمایی شدید حین زباله‌سوزی: کمینه °C ۸۵۰ در دقیقه برای حداقل ۲ ثانیه (شرایط اجباری برای کارخانه‌های زباله‌سوزی) [198]	قطعات به عنوان زباله دور ریخته می‌شوند. احتمالاً به اندازه کافی کوچک است که در معرض سناریوی از نوع خرد کردن قرار نگیرد ممکن است خاک‌چال شود	می‌تواند چکانده شود دهان بردن بسته به کاربرد و سن کاربر امکان‌پذیر است. ترک خوردگی‌ها و خراش موضعی محتمل است تکه‌ها می‌توانند در کلاس جمع شوند	به نوعی فرآیند پرداخت نیاز دارد زیرا سطح خشن خواهد بود. سایش، خراش، برش	گلوله‌های ABS را خریداری کنید و MWCNTs یا سایر MNMs را با استفاده از فرآیند روزن‌رانی رشته‌ای موجود در بازار مخلوط کنید	گستره متنوعی از رشته‌های گرمانرم را می‌توان استفاده کرد. همچنین، از مواد پرکننده مختلف برای ایجاد خواص ویژه به رشته‌ها استفاده می‌شود.	
			نانوچندسازه‌های MWCNT/بسیار با فرآیند روزن‌رانی [113, 197]	مخلوط کردن سفارشی مصرفی رشته‌ها با روزن‌ران در دسترس است.	چندسازه‌های برپایه ABS به دلیل پایداری و استحکام گرمایی بالا در اسباب‌بازی‌ها، ابزارهای کوچک و ابزارک‌ها ^۲ استفاده می‌شوند.	
			چاپ سه‌بُعدی عمدتاً فرآیند روزن‌ران به‌علاوه حرارت‌دادن قطعات (مرحله حرارت‌دادن) و سایش برای مرحله پرداخت است - حذف سوراخ‌ها، صاف کردن سطح و غیره.	رشته‌های چندسازه ABS برای هر قطعه‌ای که به‌صورت خشن استفاده شود یا در مواجهه دمای بالا قرار می‌گیرد (مثلاً در یک ماشین داغ) استفاده می‌شود.	کیف تلفن همراه، دستگیره، پایه گوشی، جواهرات (حلقه و دستبند)، پروژه کلاسی در مدرسه	



جدول الف - ۶ (ادامه)

پیامدهای اندازه‌گیری رهائش		پاسخ	پرسش		
پایان عمر	مرحله استفاده	مرحله هم‌گذاری	مراحل ساخت		
در دمای بالاتر از ۵۰۰ °C تجزیه می‌شود	بسیارهای گرماسخت از نظر شیمیایی بسیار واجهنگدی هستند و هیچ تنش گرمایی (دمای بالا) انتظار نمی‌رود	ABS به دلیل خواص مکانیکی مناسب مانند مقاومت در برابر ضربه، چقرمگی و پایداری گرمایی استفاده می‌شود. ABS در مواجهه UV تخریب می‌شود [227]	نشر بخارات حین روزن‌رانی. دزدود بسیاری در فرآیند روزن‌ران رشته‌ای رهائش شد. دزدود و ذرات بسیاری در فرآیند چاپ سه‌بعدی رهائش می‌شوند. شرایط انباشت رشته می‌تواند بر کیفیت چاپ و رهائش تأثیر بگذارد. تنظیمات دمای چاپ می‌تواند بر روند رهائش تأثیر بگذارد.	شناسایی زمینه	
MWCNT در دمای بالاتر از ۶۰۰ °C در هوا تجزیه می‌شود [53] پنگ و همکاران [194]، اکسایش MWCNTs در هوا را با آنالیز گرماوزن‌سنجی (TGA) مطالعه کردند. بیشینه نرخ افت وزن در دمای ۶۹۵ °C در سرعت حرارت‌دهی	MWCNT ممکن است تحت کشش مکانیکی پاره شود یا بشکند، اگرچه خروج احتمال بیشتری دارد	علاوه بر تعمیرات (به مرحله هم‌گذاری مراجعه کنید) هیچ تغییری به دلیل پیرسازی مورد انتظار نیست. تعدادی از مطالعات تخریب UV نشان داد که لایه سطحی غنی از اپوکسی نانوجندسازه نسبتاً سریع حذف شد و یک سطح را تقریباً به‌طور کامل با شبکه‌ای از MWCNTs	MWCNT ممکن است تحت کشش مکانیکی پاره شود یا بشکند، اگرچه خروج احتمال بیشتری دارد. MWCNTs بیرون‌زده از تکه‌های بسیاری پس از ماشین‌کاری مکانیکی در بسیاری از مطالعات مشاهده شده است [38, 40, 41, 105, 68]	دمای روزن‌رانی نسبتاً پایین است بنابراین به احتمال زیاد استحاله شیمیایی در MWCNTs ایجاد نمی‌شود. فرآیند روزن‌رانی ممکن است MWCNTs را به لوله‌های کوتاه‌تر تبدیل کند یا کلوخه‌ها را از هم جدا کند	۳ شناسایی MNM

<p>۱ °C/min انجام شد. پایداری اکسایشی MWCNTs به عیوب و قطر لوله بستگی دارد [203]. MWCNTs پایداری گرمایی بالایی دارند و ممکن است پس از عملیات گرمایی چندسازه‌ها در مواجهه قرار گیرند و همچنان یکپارچگی ساختاری خود را حفظ کنند [204]. رهایش MWCNTs با تجزیه گرمایی چندسازه‌های نانولوله‌های کربنی چنددیواره/ اپوکسی در کوره لوله‌ای مشاهده نشد [69]</p>		<p>[31, 33, 41, 201] یکپارچگی آسیبی ندیده بود. پیامدهای بالقوه رهایش در طی رفتارهای به‌دهان‌گذاری کودکان باید در نظر گرفته شود.</p>	<p>MWCNTs رهایش یافته می‌توانند حین فرآیند سایش در مقایسه با نمونه‌های جاسازی‌شده کوتاه شوند [105]</p>			
<p>خاکستر باقیمانده ممکن است حاوی MWCNT نسوخته باشد [205] MWCNT در دمای بالاتر از ۶۰۰ °C در هوا تجزیه می‌شود [53]</p>	<p>اره‌کشی منجر به قطعاتی با MWCNT جاسازی‌شده، گاهی اوقات MWCNT بیرون‌زده، بدون MWCNT آزاد می‌شود [46]</p>	<p>شکستگی، سایش، ضربه، دستکاری خشن قطعات مشاهده‌شده با MWCNT جاسازی‌شده، گاهی اوقات MWCNT بیرون‌زده، بدون MWCNT آزاد</p>	<p>تکه‌های مشاهده شده با MWCNT جاسازی‌شده، گاهی اوقات MWCNT بیرون‌زده، بدون MWCNT آزاد [47]، [46]، [44]، [206]. بدون MWCNT خالی در طول فرآیند چاپ سه‌بعدی [230] ذرات بزرگتر ABS با</p>	<p>چندسازه‌های MWCNT ABS تجاری در دسترس پراکنه خوبی دارند. گستره از ۰٪ تا ۵٪ MWCNTs ممکن است به عملیات سطحی تکمیلی نیاز داشته باشند. انتشار بخارات حین روزن‌رانی. انتشار ذرات چندسازه</p>	<p>= شکل‌های رهایش در منابع علمی مورد خاص مشاهده</p>	<p>محتوا و سازگاری در MNM زمین، وضعیت پراکنه MNM در زمینه</p>

			MWCNTs جاسازی شده و بیرون زده حین چاپ سه بُعدی رهایش شدند [230]	ABS/MWCNT در طول روزن رانی [228, 229]	شده است		
نمونه برداری زمان واقعی از هواسل، برای آنالیز نمونه های NAS ذرات/صافی آنالیز با ابزار FMPS، SEM، CPC، SMPS آنالیز خاکستر باقیمانده با SEM/TXRF [205]	نمونه برداری زمان واقعی از هواسل، برای آنالیز نمونه های صافی ذرات با استفاده از FMPS، CPC، SMPS، SEM، TEM [46]	تخریب UV، مواجهه با رطوبت و حمام آب به عنوان شبیه سازی تنش و تلفیق با ماشین کاری [65]	سنباده زنی، سایش، مرطوب کردن و سعی در سوراخ کاری، ااره کشی، آسیاب کردن، برس زدن به عنوان شبیه سازی تنش [207] نمونه برداری زمان واقعی از هواسل، برای نمونه های NAS/صافی ذرات آنالیز با استفاده از روش SEM، CPC، SMPS، FMPS NIOSH 5040 [139] پروژه NanoRelease [208]	CPC، DMA، OPC، PID ^۴ (آشکارساز یونش نوری)	روش های مورد استفاده در منابع علمی ذکر شده		
<p>¹ Fused Filament Fabrication ² Gadget ³ Optical Particle Counters ⁴ Photoionization Detector</p>							

کتابنامه

- [1] NATIONAL RESEARCH COUNCIL (NRC), Science and Decisions: Advancing Risk Assessment. National Academies Press, 2009.
- [2] KINGSTON Christopher, et al. Release Characteristics of Selected Carbon Nanotube Polymer Composites. Carbon, Mar, 2014, vol. 68, no. 68, pp. 33-57. ISSN 0008-6223.
- [3] Imtiaz S. et al. , A Review Featuring Fabrication, Properties and Applications of Carbon Nanotubes (CNTs) Reinforced Polymer and Epoxy Nanocomposites. Chinese J. Polym. Sci. 2018, vol. 36, pp. 445–461.
- [4] Palermo V. et al. Nanoscale Mechanics of Graphene and Graphene Oxide in Composites: A Scientific and Technological Perspective. Adv. Mater. 2016, vol. 28, no. 29, pp. 6232-6238 2016.
- [5] Chee W.K., Lim H.N., Huang N.M., Harrison I., Nanocomposites of Graphene/polymers: a Review. RSC Adv. 2015, vol. 5, No. 83, pp 68014-68051.
- [6] ROTHON, Roger N.; and DeARMITT, Chris. Composites using Nano-Fillers. Particulate-Filled Polymer Composites, 2003, pp. 489-514.
- [7] Srivastava S.K., Pramanik M., Acharya H. Ethylene/vinyl Acetate copolymer/clay Nanocomposites. Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics, 02/01; 2019/07, 2006, vol. 44, no. 3, pp. 471-480. ISSN 0887-6266.
- [8] El-Fattah M.A. et al. , Studying the Effect of Organo-Modified Nanoclay Loading on the Thermal Stability, Flame Retardant, Anti-Corrosive and Mechanical Properties of Polyurethane Nanocomposite for Surface Coating. Prog. Org. Coatings, 2015, vol. 89, pp. 212-219.
- [9] Chrissafis K., Paraskevopoulos K., Tsiaoussis I., Bikiaris D.N., Comparative study of the effect of different nanoparticles on the mechanical properties, permeability, and thermal degradation mechanism of HDPE. J. Appl. Polym. Sci. 2009, vol. 114, no. 3, pp 1606-1618.
- [10] Yang F., Nelson G.L., Combination effect of nanoparticles with flame retardants on the flammability of nanocomposites. Polym. Degrad. Stab. 2011, vol. 96, no. 3, pp. 270-276.
- [11] Sawai J., Quantitative Evaluation of Antibacterial Activities of Metallic Oxide Powders (ZnO, MgO and CaO) by Conductimetric Assay. Journal of Microbiological Methods, 2003, vol. 54, no. 2, pp. 177-182.
- [12] Seyed Dorraji M., Rasoulifard M.H., Shajeri M. et al. , The role of prepared ZnO nanoparticles on improvement of mechanical and antibacterial properties of flexible polyurethane foams: experimental modeling. Polym Bull., 2018, vol 74, no. 4, pp. 1519-1533.
- [13] Espitia P.J.P. et al. Zinc Oxide Nanoparticles: Synthesis, Antimicrobial Activity and Food Packaging Applications. Food and Bioprocess Technology, 2012, vol. 5, no. 5, pp. 1447-1464. 91 ref. ISSN 1935-5130.

- [14] SCHNEIDER Jenny, et al. Understanding TiO₂ Photocatalysis: Mechanisms and Materials. *Chemical Reviews*, 20140919, Oct 08, 2014, vol. 114, no. 19, pp. 9919-9986. ISSN 1520-6890; 0009-2665.
- [15] LUTTRELL Tim, et al. Why is Anatase a Better Photocatalyst than Rutile?—Model Studies on Epitaxial TiO₂ Films. *Scientific Reports*, 20140210, Feb 10, 2014, vol. 4, pp. 4043. ISSN 2045-2322; 2045-2322.
- [16] Chatterjee A., Properties Improvement of PMMA using Nano TiO₂. *J. Appl. Polym. Sci.* 2010, vol. 118, no. 5, pp. 2890-2897.
- [17] Yinghong X. et al. ET al. , Nanometre-sized TiO₂ as applied to the modification of unsaturated polyester resin. *Mater. Chem. Phys.* 2003, vol. 77, no. 2, pp. 609-611.
- [18] DALLAS Panagiotis; SHARMA, Virender K., and ZBORIL, Radek. Silver Polymeric Nanocomposites as Advanced Antimicrobial Agents: Classification, Synthetic Paths, Applications, and Perspectives. *Advances in Colloid & Interface Science*, 20110531, Aug 10, 2011, vol. 166, no. 1-2, pp. 119-135. ISSN 1873-3727; 0001-8686.
- [19] Liya GUO et al. , Polymer/nanosilver Composite Coatings for Antibacterial Applications. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2013, vol. 439, pp. 69-83.
- [20] PAUL, Donald R.; and ROBESON, Liyod M. *Polymer Nanotechnology: Nanocomposites*. *Polymer*, 2008, vol. 49, no. 15, pp. 3187-3204.
- [21] WOHLLEBENWendel, et al. , Release from Nanomaterials during their use Phase: Combined Mechanical and Chemical Stresses Applied to Simple and Multi-Filler Nanocomposites Mimicking Wear of Nano-Reinforced Tires. *Environmental Science: Nano*, 2016, vol. 3, no. 5, pp. 1036-1051.
- [22] ZENGJijun, et al. , Processing and Properties of Poly (Methyl Methacrylate)/carbon Nanofiber Composites. *Composites Part B: Engineering*, 2004, vol. 35, no. 3, pp. 245-249.
- [23] BAO, SP; and TJONG, S.C. Mechanical Behaviors of polypropylene/carbon Nanotube Nanocomposites: The Effects of Loading Rate and Temperature. *Materials Science and Engineering: A*, 2008, vol. 485, no. 1-2, pp. 508-516.
- [24] YAZDANI, Hessam; SMITH, Benjamin E. and HATAMI, Kianoosh. Electrical Conductivity and Mechanical Performance of Multiwalled CNT-filled Polyvinyl Chloride Composites Subjected to Tensile Load. *Journal of Applied Polymer Science*, 2016, vol. 133, no. 29.
- [25] Shanghua LI et al. , Synthesis and Magnetic Properties of Bulk Transparent PMMA/Fe-Oxide Nanocomposites. *Nanotechnology*, 2009, vol. 20, no. 18, pp. 185607.
- [26] XIN, Fei; and LI, Lin. Decoration of Carbon Nanotubes with Silver Nanoparticles for Advanced CNT/polymer Nanocomposites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2011, vol. 42, no. 8, pp. 961-967.
- [27] BHINGARDIVE, Viraj; SUWAS, Satyamand; BOSE, Suryasarathi. New Physical Insights into the Electromagnetic Shielding Efficiency in PVDF Nanocomposites Containing Multiwall Carbon Nanotubes and Magnetic Nanoparticles. *RSC Advances*, 2015, vol. 5, no. 97, pp. 79463-79472.

- [28] TWOMEY Janet M. Sustainable Energy Solutions Task 4.2: UV Degradation Prevention on Fiber Reinforced Composite Blades. Final Report, 2010.
- [29] BUSQUETS-FITÉ, Martí, et al. Exploring Release and Recovery of Nanomaterials from Commercial Polymeric Nanocomposites. IOP Publishing, 2013.
- [30] FERNANDEZ-ROSA Elisabet, et al. , Influence of Nanomaterial Compatibilization Strategies on Polyamide Nanocomposites Properties and Nanomaterial Release during the use Phase. Environmental Science & Technology, 2016, vol. 50, no. 5, pp. 2584-2594.
- [31] NGUYEN, Tinh, et al. Fate of Nanoparticles during Life Cycle of Polymer Nanocomposites. IOP Publishing, 2011.
- [32] NGUYEN Tinh, et al. , Impact of UV Irradiation on Multiwall Carbon Nanotubes in Nanocomposites: Formation of Entangled Surface Layer and Mechanisms of Release Resistance. Carbon, 2017, vol. 116, pp. 191-200.
- [33] PETERSEN Elijah J., et al. , Methods to Assess the Impact of UV Irradiation on the Surface Chemistry and Structure of Multiwall Carbon Nanotube Epoxy Nanocomposites. Carbon, 2014, vol. 69, pp. 194-205.
- [34] Vilar G. et al. , Monitoring Migration and Transformation of Nanomaterials in Polymeric Composites during Accelerated Aging. IOP Publishing, 2013.
- [35] WOHLLEBEN, Wendel; and NEUBAUER, Nicole. Quantitative Rates of Release from Weathered Nanocomposites are Determined Across 5 Orders of Magnitude by the Matrix, Modulated by the Embedded Nanomaterial. Nanoimpact, 2016, vol. 1, pp. 39-45.
- [36] WOHLLEBEN Wendel, et al. , NanoRelease: Pilot Interlaboratory Comparison of a Weathering Protocol Applied to Resilient and Labile Polymers with and without Embedded Carbon Nanotubes. Carbon, 2017, vol. 113, pp. 346-360.
- [37] Yadong LV et al. , Outdoor and Accelerated Laboratory Weathering of Polypropylene: A Comparison and Correlation Study. Polymer Degradation and Stability, 2015, vol. 112, pp. 145- 159.
- [38] CENA, Lorenzo G.; and PETERS, Thomas M. Characterization and Control of Airborne Particles Emitted during Production of epoxy/carbon Nanotube Nanocomposites. Journal of Occupational and Environmental Hygiene, 2011, vol. 8, no. 2, pp. 86-92.
- [39] Methner M., Crawford C., Geraci C., Evaluation of the Potential Airborne Release of Carbon Nanofibers during the Preparation, Grinding, and Cutting of Epoxy-Based Nanocomposite Material. Journal of Occupational and Environmental Hygiene, 2012, vol. 9, no. 5, pp. 308-318.
- [40] HUANG Guannan, et al. , Evaluation of Airborne Particle Emissions from Commercial Products Containing Carbon Nanotubes. Journal of Nanoparticle Research, 2012, vol. 14, no. 11, pp. 1231.
- [41] HIRTH Sabine, et al. , Scenarios and Methods that Induce Protruding or Released CNTs After Degradation of Nanocomposite Materials. Journal of Nanoparticle Research, 2013, vol. 15, no. 4, pp. 1504.

- [42] GÖHLER Daniel, et al. , Characterization of Nanoparticle Release from Surface Coatings by the Simulation of a Sanding Process. *Annals of Occupational Hygiene*, 2010, vol. 54, no. 6, pp. 615- 624.
- [43] GOMEZ Virginia, et al. , Comparison of Dust Release from Epoxy and Paint Nanocomposites and Conventional Products during Sanding and Sawing. *Annals of Occupational Hygiene*, 2014, vol. 58, no. 8, pp. 983-994.
- [44] Kang J. et al. 2017. , Generation and Characterization of Aerosols Released from Sanding Composite Nanomaterials Containing Carbon Nanotubes. *Nanoimpact*, vol. 5, pp. 41-50.
- [45] Golanski L. et al. , Release-Ability of Nano Fillers from Different Nanomaterials (Toward the Acceptability of Nanoproduct). *Journal of Nanoparticle Research*, 2012, vol. 14, no. 7, pp. 962.
- [46] BELLODhimiter, et al. , Exposure to Nanoscale Particles and Fibers during Machining of Hybrid Advanced Composites Containing Carbon Nanotubes. *Journal of Nanoparticle Research*, 2009, vol. 11, no. 1, pp. 231-249.
- [47] BELLODhimiter, et al. , Characterization of Exposures to Nanoscale Particles and Fibers during Solid Core Drilling of Hybrid Carbon Nanotube Advanced Composites. *International Journal of Occupational and Environmental Health*, 2010, vol. 16, no. 4, pp. 434-450.
- [48] NEUBAUER, Nicole; WOHLLEBEN, Wendeland TOMOVIĆ, Željko. Conductive Plastics: Comparing Alternative Nanotechnologies by Performance and Life Cycle Release Probability. *Journal of Nanoparticle Research*, 2017, vol. 19, no. 3, pp. 112.
- [49] GIRALDO Luis F., et al. , Scratch and Wear Resistance of Polyamide 6 Reinforced with Multiwall Carbon Nanotubes. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2008, vol. 8, no. 6, pp. 3176- 3183.
- [50] Ogura I. et al. Airborne Particles Released by Crushing CNT Composites. *J. Phys.*, 2017, Conf. Ser. 838, 012015.
- [51] ISO 15270, Plastics — Guidelines for the recovery and recycling of plastics waste
- [52] SINGH Dilpreet, et al. , Nanofiller Presence Enhances Polycyclic Aromatic Hydrocarbon (PAH) Profile on Nanoparticles Released during Thermal Decomposition of Nano-Enabled Thermoplastics: Potential Environmental Health Implications. *Environmental Science & Technology*, 2017, vol. 51, no. 9, pp. 5222-5232.
- [53] SOTIRIOU Georgios A., et al. , Thermal Decomposition of Nano-Enabled Thermoplastics: Possible Environmental Health and Safety Implications. *Journal of Hazardous Materials*, 2016, vol. 305, pp. 87-95.
- [54] SOTIRIOU Georgios A., et al. , An Integrated Methodology for the Assessment of Environmental Health Implications during Thermal Decomposition of Nano-Enabled Products. *Environmental Science: Nano*, 2015, vol. 2, no. 3, pp. 262-272.
- [55] DUNCAN, Timothy V.; and PILLAI, Karthik. Release of Engineered Nanomaterials from Polymer Nanocomposites: Diffusion, Dissolution, and Desorption. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2015 vol. 7, no. 1, pp. 2-19.
- [56] EUROPEAN COMMISSION HEALTH AND CONSUMER DIRECTORATE-GENERAL 2013, Union Guidance on Regulation (EU) No 10/2011 on plastic materials

- and articles intended to come into contact with food as regards information in the supply chain [online]. [Accessed 30 July 2019]. Available from: https://ec.europa.eu/food/sites/food/files/safety/docs/cs_fcm_plastic-guidance_201110_reg_en.pdf
- [57] Bott J., Franz R., Investigations into the Potential Abrasive Release of Nanomaterials due to Material Stress Conditions-Part A: Carbon Black Nano-Particulates in Plastic and Rubber Composites. *Applied Sciences*, 2019, vol. 9, no. 2, pp. 214-228
- [58] SABER, Anne Thoustrup, et al. Epoxy Composite Dusts with and without Carbon Nanotubes Cause Similar Pulmonary Responses, but Differences in Liver Histology in Mice Following Pulmonary Deposition. *Particle and Fibre Toxicology*, 2016, vol. 13, no. 1, pp. 37.
- [59] SABER, Anne Thoustrup, et al. Nanotitanium Dioxide Toxicity in Mouse Lung is Reduced in Sanding Dust from Paint. *Particle and Fibre Toxicology*, 2012, vol. 9, no. 1, pp. 4.
- [60] WOHLLEBENWendel, et al. , Elastic CNT–polyurethane Nanocomposite: Synthesis, Performance and Assessment of Fragments Released during use. *Nanoscale*, 2013, vol. 5, no. 1, pp. 369-380.
- [61] WOHLLEBENWendel, et al. , On the Lifecycle of Nanocomposites: Comparing Released Fragments and their in-vivo Hazards from Three Release Mechanisms and Four Nanocomposites. *Small*, 2011, vol. 7, no. 16, pp. 2384-2395.
- [62] PANGChengfang, et al. , Releases from Transparent Blue Automobile Coatings Containing Nanoscale Copper Phthalocyanine and their Effects on J774 A1 Macrophages. *Nanoimpact*, 2017, vol. 7, pp. 75-83.
- [63] AMORIM, Mónica JB, et al. Environmental Impacts by Fragments Released from Nanoenabled Products:Multiassay A, Multimaterial Exploration by the SUN Approach. *Environmental Science & Technology*, 2018, vol. 52, no. 3, pp. 1514-1524.
- [64] WATSON-WRIGHT, Christa; SINGH, Dilpreetand DEMOKRITOU, Philip. Toxicological Implications of Released Particulate Matter during Thermal Decomposition of Nano-Enabled Thermoplastics. *Nanoimpact*, 2017, vol. 5, pp. 29-40.
- [65] HARPER, Stacey, et al. Measuring Nanomaterial Release from Carbon Nanotube Composites: Review of the State of the Science. IOP Publishing, 2015.
- [66] Duncan T. V., Release of Engineered Nanomaterials from Polymer Nanocomposites: the Effect of Matrix Degradation. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2015, 7(1), 20–39.
- [67] Ogura I. et al. Particle Release from Single-Wall and Multiwall Carbon Nanotubes in Polystyrene-Based Composites during Grinding. *J. Phys.*, 2015, Conf. Ser. 617, 012028.
- [68] SCHLAGENHAUFLukas, et al. , Carbon Nanotubes Released from an Epoxy-Based Nanocomposite: Quantification and Particle Toxicity. *Environmental Science & Technology*, 2015, vol. 49, no. 17, pp. 10616-10623.
- [69] SCHLAGENHAUFLukas, et al. , Decomposition and Particle Release of a Carbon nanotube/epoxy Nanocomposite at Elevated Temperatures. *Journal of Nanoparticle Research*, 2015, vol. 17, no. 11, pp. 440.

- [70] PILLAIKarthik V., et al. , Environmental Release of core-shell Semiconductor Nanocrystals from Free-Standing Polymer Nanocomposite Films. *Environmental Science: Nano*, 2016, vol. 3, no. 3, pp. 657-669.
- [71] Santiago-Rodriguez L. et al. , Assessment of the Bioaccessibility of Micronized Copper Wood in Synthetic Stomach Fluid. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 2015, vol. 4, pp. 85-92.
- [72] Platten III, William Eet al. , Estimating Dermal Transfer of Copper Particles from the Surfaces of Pressure-Treated Lumber and Implications for Exposure. *Science of the Total Environment*, 2016, vol. 548, pp. 441-449.
- [73] Pantano D. et al. , Transformations of Nanoenabled Copper Formulations Govern Release, Antifungal Effectiveness, and Sustainability Throughout the Wood Protection Lifecycle. *Environmental Science & Technology*, 2018, vol. 52, no. 3, pp. 1128-1138.
- [74] Mitrano D. M., Arroyo Rojas Dasilva Y., Nowack B. Effect of Variations of Washing Solution Chemistry on Nanomaterial Physicochemical Changes in the Laundry Cycle. 2015 Aug 18. ISBN 1520-5851.
- [75] Störmer A. et al. , Critical Review of the Migration Potential of Nanoparticles in Food Contact Plastics. *Trends in Food Science & Technology*, 2017, vol. 63, pp. 39-50.
- [76] MITRANODM et al. , Review of nanomaterial aging and transformations through the life cycle of nano-enhanced products', *Environment International*, 2015, vol. 77, pp. 132-47.
- [77] BELLODhimiter, et al. , Particle Exposure Levels during CVD Growth and Subsequent Handling of Vertically-Aligned Carbon Nanotube Films. *Carbon*, 2008, vol. 46, no. 6, pp. 974-977.
- [78] PFEFFERKORN Frank E., et al. , Characterization of Exposures to Airborne Nanoscale Particles during Friction Stir Welding of Aluminum. *Annals of Occupational Hygiene*, 2010, vol. 54, no. 5, pp. 486-503.
- [79] HUANG Cheng-Hsiung, et al. , Measurements of Respirable Dust and Nanoparticle Concentrations in a Titanium Dioxide Pigment Production Factory. *Journal of Environmental Science and Health Part A*, 2010, vol. 45, no. 10, pp. 1227-1233.
- [80] Birch M.Eileen, et al. , Exposure and Emissions Monitoring during Carbon Nanofiber production—Part I: Elemental Carbon and iron-soot Aerosols. *Annals of Occupational Hygiene*, 2011, vol. 55, no. 9, pp. 1016-1036.
- [81] DAHMM Matthew M., et al. , Occupational Exposure Assessment in Carbon Nanotube and Nanofiber Primary and Secondary Manufacturers. *Annals of Occupational Hygiene*, 2012, vol. 56, no. 5, pp. 542-556.
- [82] CURWIN, Brian; and BERTKE, Steve. Exposure Characterization of Metal Oxide Nanoparticles in the Workplace. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 2011, vol. 8, no. 10, pp. 580- 587.
- [83] CIVARDI Chiara, et al. , Release of Copper-Amended Particles from Micronized Copper-Pressure Treated Wood during Mechanical Abrasion. *Journal of Nanobiotechnology*, 2016, vol. 14, no. 1, pp. 77.
- [84] KUHLBUSCH, TAJ; NEUMANN, S. and FISSAN, H. Number Size Distribution, Mass Concentration, and Particle Composition of PM1, PM2. 5, and PM10 in Bag Filling

- Areas of Carbon Black Production. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 2004, vol. 1, no. 10, pp. 660- 671.
- [85] JIANGJingkun, et al. , Particulate Matter Distributions in China during a Winter Period with Frequent Pollution Episodes (January 2013). *Aerosol Air Qual.Res*, 2015, vol. 15, no. 2, pp. 494- 503.
- [86] Li-Ming LO et al. , Particle Emissions from Laboratory Activities Involving Carbon Nanotubes. *Journal of Nanoparticle Research*, 2017, vol. 19, no. 8, pp. 293.
- [87] BROUWER, Derk H.; GIJSBERS, Jose HJ and LURVINK, Marc WM. Personal Exposure to Ultrafine Particles in the Workplace: Exploring Sampling Techniques and Strategies. *Annals of Occupational Hygiene*, 2004, vol. 48, no. 5, pp. 439-453.
- [88] Golanski L. et al. , Characterization of Abrasion-Induced Nanoparticle Release from Paints into Liquids and Air. IOP Publishing, 2011.
- [89] RAYNORPeter C., et al. , Assessing Potential Nanoparticle Release during Nanocomposite Shredding using Direct-Reading Instruments. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 2012, vol. 9, no. 1, pp. 1-13.
- [90] ONO-OGASAWARA, Mariko, et al. Approach to the Exposure Assessment of MWCNT by Considering Size Distribution and Oxidation Temperature of Elemental Carbon. IOP Publishing, 2013.
- [91] MAYNARDAndrew D., et al. , Exposure to Carbon Nanotube Material: Aerosol Release during the Handling of Unrefined Single-Walled Carbon Nanotube Material. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*, 2004, vol. 67, no. 1, pp. 87-107.
- [92] HANJeong Hee, et al. , Monitoring Multiwalled Carbon Nanotube Exposure in Carbon Nanotube Research Facility. *Inhalation Toxicology*, 2008, vol. 20, no. 8, pp. 741-749.
- [93] FUJITANIYuji, et al. , Measurement of the Physical Properties of Aerosols in a Fullerene Factory for Inhalation Exposure Assessment. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 2008, vol. 5, no. 6, pp. 380-389.
- [94] Methner M., Effectiveness of Local Exhaust Ventilation (LEV) in Controlling Engineered Nanomaterial Emissions During Reactor Cleanout Operations. *J. Occup. Environ. Hyg.* 2008, vol. 5, no. 6, pp. D63-69.
- [95] Methner M., Effectiveness of a Custom-Fitted Flange and Local Exhaust Ventilation (LEV) System in Controlling the Release of Nanoscale Metal Oxide Particulates during Reactor Cleanout Operations. *International Journal of Occupational and Environmental Health*, 2010, vol. 16, no. 4, pp. 475-487.
- [96] Lee J. MAHENDRA, S and ALVAREZ, P. J. Nanomaterials in the Construction Industry: A Review of their Applications and Environmental Health and Safety Considerations. 2010 Jul 27. ISBN 1936-0851.
- [97] Johnson D. R. et al. Potential for Occupational Exposure to Engineered Carbon-Based Nanomaterials in Environmental Laboratory Studies. 2010 Jan. ISBN 1552-9924; 0091-6765. [98] Ogura I. et al. , Potential release of carbon nanotubes from their composites during grinding. *J. Phys.*, 2013, Conf. Ser., 429, 012049.
- [99] NIOSH, 1994. Method 7402: Asbestos by TEM. [Accessed 24 February 2020]. Available from: <https://www.cdc.gov/niosh/docs/2003-154/pdfs/7402.pdf>

- [100] GUIOT, Arnaud; GOLANSKI, Luana and TARDIF, François. Measurement of Nanoparticle Removal by Abrasion. IOP Publishing, 2009.
- [101] VORBAU, Manuel; HILLEMANN, Lars and STINTZ, Michael. Method for the Characterization of the Abrasion Induced Nanoparticle Release into Air from Surface Coatings. Journal of Aerosol Science, 2009, vol. 40, no. 3, pp. 209-217.
- [102] GÖHLER, Daniel, et al. Nanoparticle Release from Nanocomposites due to Mechanical Treatment at Two Stages of the Life-Cycle. IOP Publishing, 2013.
- [103] HAGENDORFERHarald, et al. , Size-Fractionated Characterization and Quantification of Nanoparticle Release Rates from a Consumer Spray Product Containing Engineered Nanoparticles. Journal of Nanoparticle Research, 2010, vol. 12, no. 7, pp. 2481-2494.
- [104] KOPONEN, Ismo Kalevi; JENSEN, Keld Alstrup and SCHNEIDER, Thomas. Comparison of Dust Released from Sanding Conventional and Nanoparticle-Doped Wall and Wood Coatings. Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology, 2011, vol. 21, no. 4, pp. 408.
- [105] SCHLAGENHAUFLukas, et al. , Release of Carbon Nanotubes from an Epoxy-Based Nanocomposite during an Abrasion Process. Environmental Science & Technology, 2012, vol. 46, no. 13, pp. 7366-7372.
- [106] SACHSE, Sophia, et al. Physical Characteristics of Nanoparticles Emitted during Drilling of Silica Based Polyamide 6 Nanocomposites. IOP Publishing, 2012.
- [107] BISHOP Lindsey, et al. In Vivo Toxicity Assessment of Occupational Components of the Carbon Nanotube Life Cycle to Provide Context to Potential Health Effects. ACS Nano, 2017, vol. 11, no. 9, pp. 8849-8863.
- [108] CEN, EN 689: Workplace Exposure. Measurement of Exposure by Inhalation to Chemical Agents. Strategy for Testing Compliance with Occupational Exposure Limit Values, 2018.
- [109] Bevington C. et al. , Indoor Exposure Product Testing Product Protocol, Version 2.0. Washington, DC: US EPA (Unites States Environmental Protection Agency), 2017. Available from [https:// www .epa .gov/sites/production/files/2018 -01/documents/indoor_exposure_testing_protocols_version_2.pdf](https://www.epa.gov/sites/production/files/2018-01/documents/indoor_exposure_testing_protocols_version_2.pdf)
- [110] BARON, Paul A.; and WILLEKE, Klaus. Aerosol Measurement: Principles, Techniques, and Applications, 2001.
- [111] PLITZKO Sabine. Workplace Exposure to Engineered Nanoparticles. Inhalation Toxicology, 2009, vol. 21, no. sup1, pp. 25-29.
- [112] JANKOVICJohn T., et al. , Particle Loss in a Scanning Mobility Particle Analyzer Sampling Extension Tube. International Journal of Occupational and Environmental Health, 2010, vol. 16, no. 4, pp. 429-433.
- [113] Fleury D. et al. 2013. , Identification of the Main Exposure Scenarios in the Production of CNTPolymer Nanocomposites by Melt-Moulding Process. Journal of Cleaner Production, vol. 53, pp. 22-36.
- [114] R'MILIBadr, et al. , Analysis of Particle Release using LIBS (Laser-Induced Breakdown Spectroscopy) and TEM (Transmission Electron Microscopy) Samplers when Handling CNT (Carbon Nanotube) Powders. Journal of Nanoparticle Research, 2011, vol. 13, no. 2, pp. 563-577.

- [115] LEPPÄNENMaija, et al. , Exposure to CeO₂ Nanoparticles during Flame Spray Process. *Nanotoxicology*, 2012, vol. 6, no. 6, pp. 643-651.
- [116] Thayer D. et al. , A Personal, Thermophoretic Sampler for Airborne Nanoparticles. *Aerosol Science and Technology*, 2011, vol. 45, no. 6, pp. 744-750. © ISO 2021 – All rights reserved 63 No further reproduction or distribution is permitted. Copyrighted material licensed to University of www.igaaper.ir by Techstreet LLC, subscriptions.techstreet.com, downloaded on 2022-04-30 06:15:18 +0000 by University of www.igaaper.ir User. ISO/TR 22293:2021(E)
- [117] TSAISJ, et al. , Airborne Nanoparticle Release Associated with the Compounding of Nanocomposites using Nanoalumina as Fillers. *Aerosol Air Qual Res*, 2008, vol. 8, no. 2, pp. 160- 177.
- [118] TSAISJ, et al. , Control of Airborne Nanoparticles Release during Compounding of Polymer Nanocomposites. *Nano*, 2008, vol. 3, no. 04, pp. 301-309.
- [119] TSAISu-Jung, et al. , Characterization and Evaluation of Nanoparticle Release during the Synthesis of Single-Walled and Multiwalled Carbon Nanotubes by Chemical Vapor Deposition. *Environmental Science & Technology*, 2009, vol. 43, no. 15, pp. 6017-6023.
- [120] BOTT, Johannes; STÖRMER, Angela and FRANZ, Roland. Migration of Nanoparticles from Plastic Packaging Materials Containing Carbon Black into Foodstuffs. *Food Additives & Contaminants: Part A*, 2014, vol. 31, no. 10, pp. 1769-1782.
- [121] Addo NTIMSusana, et al. , Consumer use Effects on Nanoparticle Release from Commercially Available Ceramic Cookware. *Food Control*, 2018, vol. 87, pp. 31-39.
- [122] REEDRobert B., et al. , Detection of Single Walled Carbon Nanotubes by Monitoring Embedded Metals. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 2013, vol. 15, no. 1, pp. 204-213.
- [123] HYUNGHoon, et al. , Natural Organic Matter Stabilizes Carbon Nanotubes in the Aqueous Phase. *Environmental Science & Technology*, 2007, vol. 41, no. 1, pp. 179-184.
- [124] Holbrook R., David; KLINE, Carly N. and FILLIBEN, James J. Impact of Source Water Quality on Multiwall Carbon Nanotube Coagulation. *Environmental Science & Technology*, 2010, vol. 44, no. 4, pp. 1386-1391.
- [125] ZHANGWen, et al. , Modeling the Primary Size Effects of Citrate-Coated Silver Nanoparticles on their Ion Release Kinetics. *Environmental Science & Technology*, 2011, vol. 45, no. 10, pp. 4422- 4428.
- [126] Petersen E. J., Huang Q., Weber W. J., Ecological Uptake and Depuration of Carbon Nanotubes by *Lumbriculus Variegatus*. *Environ Health Perspect*. 2008, vol. 116, no. 4, pp. 496–500.
- [127] Petersen E. J. et al. , Effects of Polyethyleneimine-Mediated Functionalization of Multi-Walled Carbon Nanotubes on Earthworm Bioaccumulation and Sorption by Soils. *Environ Sci Technol*. 2011, vol. 45, no 8, pp. 3718–3724.
- [128] Petersen E. J. et al. , Influence of Polyethyleneimine Graftings of Multi-Walled Carbon Nanotubes on their Accumulation and Elimination by and Toxicity to *Daphnia Magna*. *Environ Sci Technol*. 2011, vol. 45, no. 3, pp. 1133-1138.

- [129] Ogura I. Guide to Evaluating Emission and Exposure of Carbon Nanomaterials (Carbon Nanotubes and Graphenes). Technology Research Association for Single Wall Carbon Nanotubes and Research Institute of Science for Safety and Sustainability, Japan, 2018, April (English edition).
- [130] JIANG Lin, et al. Evaluation of Particles Released from Single-Wall Carbon nanotube/polymer Composites with or without Thermal Aging by an Accelerated Abrasion Test. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 2014, vol. 11, no. 10, pp. 658-664. JOHNSON, D. R., et al. Potential for Occupational Exposure to Engineered Carbon-Based Nanomaterials in Environmental Laboratory Studies. 2010 Jan. ISBN 1552-9924; 0091-6765.
- [131] STAROSTK Kristof, et al. , Assessment of Nanoparticles Release into the Environment during Drilling of Carbon nanotubes/epoxy and Carbon nanofibres/epoxy Nanocomposites. *Journal of Hazardous Materials*, 2017, vol. 340, pp. 57-66.
- [132] Peters T. M. et al. , Airborne Monitoring to Distinguish Engineered Nanomaterials from Incidental Particles for Environmental Health and Safety. *J Occup Environ Hyg.* 2009; vol. 6, no. 2, pp. 73–81.
- [133] KUHNBUSCH, TAJ; and FISSAN, H. Particle Characteristics in the Reactor and Pelletizing Areas of Carbon Black Production. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 2006, vol. 3, no. 10, pp. 558-567.
- [134] Methner M.M. et al. , Identification and Characterization of Potential Sources of Worker Exposure to Carbon Nanofibers During Polymer Composite Laboratory Operations. *J. Occup. Environ. Hyg.* 2007, vol. 4, no. 12, pp. D125-130.
- [135] DOUDRICK, Kyle; HERCKES, Pierre and WESTERHOFF, Paul. Detection of Carbon Nanotubes in Environmental Matrices using Programmed Thermal Analysis. *Environmental Science & Technology*, 2012, vol. 46, no. 22, pp. 12246-12253.
- [136] Ogura I. et al. Quantitative Measurement of Carbon Nanotubes Released from their Composites using Thermal Carbon Analysis. *J. Phys.*, 2015, Conf. Ser. 617, 012014.
- [137] Ogura I. et al. , Quantitative measurement of carbon nanotubes released from their composites by thermal carbon analysis. *J. Phys.*, 2017, Conf. Ser. 838, 012014.
- [138] NIOSH, 2003, Method 7300: Elements by ICP(Nitric/Perchloric Acid Ashing) [online]. NIOSH Manual of Analytical Methods (NMAM) 4th Edition. [Accessed 30 July 2019]. Available from: <https://www.cdc.gov/niosh/docs/2003-154/pdfs/7300.pdf>
- [139] NIOSH, 2003, Method 5040: Diesel Particulate matter (as elemental carbon) [online]. NIOSH Manual of Analytical Methods (NMAM) 5th Edition. [Accessed 30 July 2019]. Available from: <https://www.cdc.gov/niosh/docs/2003-154/pdfs/5040.pdf>
- [140] United States Environmental Protection Agency–US EPA, Method 3051A: Microwave Assisted Acid Digestion of Sediments, Sludges, Soils, and Oils. SW-846: Test Methods for Evaluation of Solid Waste Physical and Chemical Methods, Office of Solid Waste, 2007.
- [141] NIOSH, 2003, Method 7303: Elements by ICO (Hot Block/HCl/HNO₃ Digestion) [online]. NIOSH Manual of Analytical Methods (NMAM) 4th Edition. [Accessed 30 July 2019]. Available from: <https://www.cdc.gov/niosh/docs/2003-154/pdfs/7303.pdf>

- [142] LIZF, et al. , The Quantitative Characterization of the Concentration and Dispersion of MultiWalled Carbon Nanotubes in Suspension by Spectrophotometry. *Nanotechnology*, 2006, vol. 17, no. 15, pp. 3692.
- [143] GORHAM Justin M., et al. , Detecting Carbon in Carbon: Exploiting Differential Charging to Obtain Information on the Chemical Identity and Spatial Location of Carbon Nanotube Aggregates in Composites by Imaging X-Ray Photoelectron Spectroscopy. *Carbon*, 2016, vol. 96, pp. 1208-1216.
- [144] TAGMATARCHIS Nikos, et al. , Separation and Purification of Functionalised Water-Soluble MultiWalled Carbon Nanotubes by Flow Field-Flow Fractionation. *Carbon*, 2005, vol. 43, no. 9, pp. 1984-1989.
- [145] KAEGIRalf, et al. , Release of Silver Nanoparticles from Outdoor Facades. *Environmental Pollution*, 2010, vol. 158, no. 9, pp. 2900-2905.
- [146] BANDYOPADHYAY, Susmita; PERALTA-VIDEA, Jose R. and GARDEA-TORRESDEY, Jorge L. Advanced Analytical Techniques for the Measurement of Nanomaterials in Food and Agricultural Samples: A Review. *Environmental Engineering Science*, 2013, vol. 30, no. 3, pp. 118-125.
- [147] TIEDEK Karen, et al. , Detection and Characterization of Engineered Nanoparticles in Food and the Environment. *Food Additives and Contaminants*, 2008, vol. 25, no. 7, pp. 795-821.
- [148] DUNCAN Timothy V.; and SINGH, Gurmit. *Nanotechnologies in Food*, 2017. *Nanomaterials in Food Products: A New Analytical Challenge*, pp. 143-177.
- [149] Echlin P., 2009. *Handbook of Sample Preparation for Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis*.
- [150] Helian LI et al. , Suspension Stability and Aggregation of Multi-Walled Carbon Nanotubes as Affected by Dissolved Organic Matters Extracted from Agricultural Wastes. *Environmental Pollution*, 2016, vol. 210, pp. 323-329.
- [151] LATHAM Andrew H., et al. , TEM-Induced Structural Evolution in Amorphous Fe Oxide Nanoparticles. *Journal of the American Chemical Society*, 2006, vol. 128, no. 39, pp. 12632- 12633.
- [152] ISO 13318-1, Determination of particle size distribution by centrifugal liquid sedimentation methods — Part 1: General principles and guidelines
- [153] Jespersen T.S., Nygard J., Mapping of individual carbon nanotubes in polymer/nanotube composites using electrostatic force microscopy. *Applied Physics Letters*, 2007, vol. 90, 183108.
- [154] Zhao M. et al. , Subsurface characterization of carbon nanotubes in polymer composites via quantitative electric force microscopy. *Nanotechnology*. 2010, vol. 21, 225702.
- [155] Soo J. C. Monaghan, et al. (2016). Air sampling filtration media: Collection efficiency for respirable size-selective sampling. *Aerosol science and technology: the journal of the American Association for Aerosol Research*, 2016, vol. 50 no. 1, pp. 76–87.
- [156] Schutz J., HALLIBURTON, B., BROWN, S. *Developing Workplace Detection and Measurement Techniques for Carbon Nanotubes*. *Nanotechnology Research Reports, Safe Work Australia*: 2010.

- [157] United States Consumer Product Safety Commission - US CPSC, Report for Task Order 0001, Project 1B – Nano Analytical Methods Database. 2018. Prepared by University of Cincinnati. Available at <https://www.cpsc.gov/Research-Statistics/chemicals/nanotechnology>.
- [158] WARHEIT David B., et al. , Health Effects Related to Nanoparticle Exposures: Environmental, Health and Safety Considerations for Assessing Hazards and Risks. *Pharmacology & Therapeutics*, 2008, vol. 120, no. 1, pp. 35-42.
- [159] Petersen E. J. et al. , Potential release pathways, environmental fate, and ecological risks of carbon nanotubes. 2011. *Environmental science & technology*. 2011, vol. 45, no. 23, pp. 9837- 9856.
- [160] ZHANG Luqing, et al. , Effect of Natural and Synthetic Surface Coatings on the Toxicity of Multiwalled Carbon Nanotubes Toward Green Algae. *Carbon*, 2015, vol. 83, pp. 198-207.
- [161] Hamilton JR, Raymond Fet al. , Length, but Not Reactive Edges, of Cup-Stack MWCNT is Responsible for Toxicity and Acute Lung Inflammation. *Toxicologic Pathology*, 2018, vol. 46, no. 1, pp. 62-74.
- [162] Line C. et al. , Carbon nanotubes: Impacts and behaviour in the terrestrial ecosystem – A review. *Carbon*, 2017, vol. 123, pp. 767-785.
- [163] HASSELLÖV Martin, et al. , Nanoparticle Analysis and Characterization Methodologies in Environmental Risk Assessment of Engineered Nanoparticles. *Ecotoxicology*, 2008, vol. 17, no. 5, pp. 344-361.
- [164] Sadik O. A. et al. Current and Emerging Technologies for the Characterization of Nanomaterials. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 07/07, 2014, vol. 2, no. 7, pp. 1707-1716.
- [165] LABORDA, Francisco; BOLEA, Eduardo and JIMENEZ-LAMANA, Javier. Single Particle Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry for the Analysis of Inorganic Engineered Nanoparticles in Environmental Samples. *Trends in Environmental Analytical Chemistry*, 2016, vol. 9, pp. 15-23.
- [166] Birch E. et al. , Analysis of carbon nanotubes and nanofibers on mixed cellulose ester filters by transmission electron microscopy. *NIOSH Manual of Analytical Methods (NMAM)*, 5th Edition, 2017. Available at: <https://www.cdc.gov/niosh/nmam/pdf/chapter-cn.pdf>
- [167] TROMP Peter C., et al. , A New Approach Combining Analytical Methods for Workplace Exposure Assessment of Inhalable Multi-Walled Carbon Nanotubes. *Annals of Work Exposures and Health*, 2017, vol. 61, no. 7, pp. 759-772.
- [168] DEMENT John M., et al. , Airborne Fiber Size Characterization in Exposure Estimation: Evaluation of a Modified Transmission Electron Microcopy Protocol for Asbestos and Potential use for Carbon Nanotubes and Nanofibers. *American Journal of Industrial Medicine*, 2015, vol. 58, no. 5, pp. 494-508.
- [169] Mattenklott M., Thomas P., Criteria for Counting Carbon Nanotubes and Other Nano-Scale Particles with Scanning Electron-Microscopic Evaluation. *Gefahrstoffe Reinhaltung Der Luft*, 2012, vol. 72, no. 11-12, pp. 477-483.

- [170] HANDY Richard D., et al. Practical Considerations for Conducting Ecotoxicity Test Methods with Manufactured Nanomaterials: What have we Learnt so Far? *Ecotoxicology*, 05/01, 2012, vol. 21, no. 4, pp. 933-972. ISSN 1573-3017.
- [171] ALGERHeather, et al. , Methods to Evaluate Uptake of Engineered Nanomaterials by the Alimentary Tract. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2014, vol. 13, no. 4, pp. 705-729.
- [172] SINGHGurmit, et al. , Measurement Methods to Detect, Characterize, and Quantify Engineered Nanomaterials in Foods. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2014, vol. 13, no. 4, pp. 693-704.
- [173] NOONANGregory O., et al. , Measurement Methods to Evaluate Engineered Nanomaterial Release from Food Contact Materials. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2014, vol. 13, no. 4, pp. 679-692.
- [174] SZAKALChristopher, et al. , Measurement Methods for the Oral Uptake of Engineered Nanomaterials from Human Dietary Sources: Summary and Outlook. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2014, vol. 13, no. 4, pp. 669-678.
- [175] ASTM E 1301 – 95: Standard Guide for Proficiency Testing by Interlaboratory Comparisons. ASTM International.
- [176] ISO/IEC, GUIDE 43-1: Proficiency testing by interlaboratory comparisons - Part 1: Development and operation of proficiency testing schemes.
- [177] ISO Guide 30, Reference materials — Selected terms and definitions
- [178] Roebben G. et al. , Reference Materials and Representative Test Materials: The Nanotechnology Case. *Journal of Nanoparticle Research*, 2013, vol. 15, no. 3, pp. 1455.
- [179] BIPM IEC, et al. International Vocabulary of Metrology—Basic and General Concepts and Associated Terms (VIM), 3rd Edn, JCGM 200:2008.
- [۱۸۰] استاندارد ملی ایران شماره ۱۵۶۰۳: سال ۱۳۹۷، فناوری نانو- تعیین اندازه نانوذرات با استفاده از روش میکروسکوپی نیروی اتمی- راهنما
- [181] ASTM E2524-08:2013, Standard Test Method for Analysis of Hemolytic Properties of Nanoparticles. ASTM International
- یادآوری- استاندارد ملی ایران شماره ۱۲۹۶۳: سال ۱۳۸۹، فناوری نانو- تعیین ویژگی‌های همولیتیک نانوذرات - روش آزمون با استفاده از استاندارد ASTM E 2524-08:2008 تدوین شده است.
- [182] ASTM E2526-08:2013, Standard Test Method for Evaluation of Cytotoxicity of Nanoparticulate Materials in Porcine Kidney Cells and Human Hepatocarcinoma Cells
- [183] ASTM Research Report RR:E56-1001:2009, An interlaboratory study was conducted by twenty-six laboratories testing five samples to establish a precision statement for test method E2490
- [184] ISO 5470-1, Rubber- or plastics-coated fabrics — Determination of abrasion resistance — Part 1: Taber abrader
- یادآوری - استاندارد ملی ایران شماره ۱- ۷۶۲۱: سال ۱۳۹۶، پارچه های روکش شده با لاستیک و پلاستیک - تعیین مقاومت سایشی- قسمت ۱: ساینده با Taber با استفاده از استاندارد ISO 5480-1: 2010 تدوین شده است

- [185] ASTM D4060-95:2001, Standard Test Method for Abrasion Resistance of Organic Coatings by the Taber Abraser
- یادآوری - استاندارد ملی ایران شماره ۱۴۹۸۰: سال ۱۳۹۹، پوشش‌های آلی - تعیین مقاومت سایشی به‌وسیله ساینده تبر - روش آزمون با استفاده از استاندارد ASTM D4060: 2019 تدوین شده است.
- [186] ISO/TR 10929, Nanotechnologies — Characterization of multiwall carbon nanotube (MWCNT) samples
- یادآوری - استاندارد ملی ایران شماره ۱۷۹۹۱: سال ۱۳۹۲، فناوری نانو - تعیین مشخصات نمونه‌های نانولوله کربنی چند جداره (MWCNT)، با استفاده از استاندارد ISO/TR 10929: 2012 تدوین شده است.
- [187] FADEELBengt, et al. , Advanced Tools for the Safety Assessment of Nanomaterials. Nature Nanotechnology, 2018, vol. 13, no. 7, pp. 537.
- [188] ARTSJosje HE, et al. , A Decision-Making Framework for the Grouping and Testing of Nanomaterials (DF4nanoGrouping). Regulatory Toxicology and Pharmacology, 2015, vol. 71, no. 2, pp. S1-S27.
- [189] WOHLLEBEN Wendel, et al. The nanoGRAVUR framework to group (nano)materials for their occupational, consumer, environmental risks based on a harmonized set of material properties,
- [190] ARTSJosje HE, et al. , Case Studies Putting the Decision-Making Framework for the Grouping and Testing of Nanomaterials (DF4nanoGrouping) into Practice. Regulatory Toxicology and Pharmacology, 2016, vol. 76, pp. 234-261.
- [191] Peter BOS et al. , The MARINA Risk Assessment Strategy: A Flexible Strategy for Efficient Information Collection and Risk Assessment of Nanomaterials. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2015, vol. 12, no. 12, pp. 15007-15021.
- [192] ECHA Guidance on information requirements and chemical safety assessment. Appendix R.6-1 for nanofoms applicable to the Guidance on QSARs and Grouping of Chemicals. 2019, Version 2.0, December.
- [193] KENNEDYAlan J., et al. , Assessing Nanomaterial Exposures in Aquatic Ecotoxicological Testing: Framework and Case Studies Based on Dispersion and Dissolution. Nanotoxicology, 2017, vol. 11, no. 4, pp. 546-557.
- [194] HRISTOZOVDanail, et al. , Quantitative Human Health Risk Assessment Along the Lifecycle of Nano-Scale Copper-Based Wood Preservatives. Nanotoxicology, 2018, vol. 12, no. 7, pp. 747-765.
- [195] Vasiliev V., Razin A.2006. , Anisogrid Composite Lattice Structures for Spacecraft and Aircraft Applications. Composite Structures, vol. 76, no. 1-2, pp. 182-189.
- [196] Perret B. et al. 2011. , Novel DOPO-Based Flame Retardants in High-Performance Carbon Fibre Epoxy Composites for Aviation. European Polymer Journal, vol. 47, no. 5, pp. 1081-1089.
- [197] THOMPSONDrew, et al. , Aerosol Emission Monitoring and Assessment of Potential Exposure to Multi-Walled Carbon Nanotubes in the Manufacture of Polymer Nanocomposites. Annals of Occupational Hygiene, 2015, vol. 59, no. 9, pp. 1135-1151.

- [198] EU Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council of 24 November 2010 on Industrial Emissions (Integrated Pollution Prevention and Control). Official Journal of the European Union.
- [199] Ellis B., 1993. Chemistry and Technology of Epoxy Resins. Springer.
- [200] Hollertz R. et al. 2011. , Improvement of Toughness and Electrical Properties of Epoxy Composites with Carbon Nanotubes Prepared by Industrially Relevant Processes. Nanotechnology, vol. 22, no. 12, pp. 125702.
- [201] Ging J. et al. 2014. , Development of a Conceptual Framework for Evaluation of Nanomaterials Release from Nanocomposites: Environmental and Toxicological Implications. Science of the Total Environment, vol. 473, pp. 9-19.
- [202] Pang L.S., Saxby J.D., Chatfield S.P.1993. , Thermogravimetric Analysis of Carbon Nanotubes and Nanoparticles. The Journal of Physical Chemistry, vol. 97, no. 27, pp. 6941-6942.
- [203] Bom D. et al. 2002. , Thermogravimetric Analysis of the Oxidation of Multiwalled Carbon Nanotubes: Evidence for the Role of Defect Sites in Carbon Nanotube Chemistry. Nano Letters, vol. 2, no. 6, pp. 615-619.
- [204] Wang J., Schlagenhauf L., Setyan A.2017. , Transformation of the Released Asbestos, Carbon Fibers and Carbon Nanotubes from Composite Materials and the Changes of their Potential Health Impacts. Journal of Nanobiotechnology, vol. 15, no. 1, pp. 15.
- [205] Stahlmecke B. et al. , 2014. Investigations on CNT Release from Composite Materials during End of Life. Handbook of Nanosafety: Measurement, Exposure and Toxicology, pp. 242-255.
- [206] Scott K., Meisenkothen F., Consumer Products: Developing consensus measurement approaches for the analysis of release materials from nanocomposites. Abstract of presentations at Nanotech 2016. Available at: <https://www.nist.gov/publications/nanorelease-consumer-products-developing-consensus-measurement-approaches-analysis>
- [207] Schlagenhauf L., Nüesch F., Wang J., Release of Carbon Nanotubes from Polymer Nanocomposites. Fibers, 2014, vol. 2, no. 2, pp. 108-127.
- [208] NanoRelease Project, 2020. <https://nanorelease.org/>
- [209] Scott K., Pomar-Portillo V., Vázquez-Campos S. 2017. Nanomaterials in Textiles. Metrology and Standardization of Nanotechnology: Protocols and Industrial Innovations, pp. 559-572.
- [210] REED Robert B., et al. , Potential Environmental Impacts and Antimicrobial Efficacy of Silver-and Nanosilver-Containing Textiles. Environmental Science & Technology, 2016, vol. 50, no. 7, pp. 4018-4026.
- [211] Mitrano D.M., Lombi E., Dasilva Y.A.R., Nowack B.2016. , Unraveling the Complexity in the Aging of Nanoenhanced Textiles: A Comprehensive Sequential Study on the Effects of Sunlight and Washing on Silver Nanoparticles. Environmental Science & Technology, vol. 50, no. 11, pp. 5790-5799.
- [212] Wagener S. et al. 2016. , Textile Functionalization and its Effects on the Release of Silver Nanoparticles into Artificial Sweat. Environmental Science & Technology, vol. 50, no. 11, pp. 5927-5934.

- [213] Von Goetz N. et al. 2013. , Migration of Ag-and TiO₂-(Nano) Particles from Textiles into Artificial Sweat Under Physical Stress: Experiments and Exposure Modeling. *Environmental Science & Technology*, vol. 47, no. 17, pp. 9979-9987.
- [214] Mitrano D.M., Limpiteprakan P., Babel S., Nowack B.2016. , Durability of Nano-Enhanced Textiles through the Life Cycle: Releases from Landfilling After Washing. *Environmental Science: Nano*, vol. 3, no. 2, pp. 375-387.
- [215] Limpiteprakan P., Babel S.2016. , Leaching Potential of Silver from Nanosilver-Treated Textile Products. *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 188, no. 3, pp. 156.
- [216] Lorenz C. et al. 2012. , Characterization of Silver Release from Commercially Available Functional (Nano) Textiles. *Chemosphere*, vol. 89, no. 7, pp. 817-824.
- [217] Pohle D. et al. 2007. , Antimicrobial Properties of Orthopaedic Textiles After in-Situ Deposition of Silver Nanoparticles. *Polymers and Polymer Composites*, vol. 15, no. 5, pp. 357-363.
- [218] Mitrano D.M. et al. 2014. , Presence of Nanoparticles in Wash Water from Conventional Silver and Nano-Silver Textiles. *ACS Nano*, vol. 8, no. 7, pp. 7208-7219.
- [219] AWWA, 2019 AWWA Book of Standards. American Wood Protection Association, 2019.
- [220] Platten W. et al. , 2014. Release of Micronized Copper Particles from Pressure Treated Wood Products. Washington, DC: US Environmental Protection Agency
- [221] NEUBAUERNicole, et al. , Nanoscale Coloristic Pigments: Upper Limits on Releases from Pigmented Plastic during Environmental Aging, in Food Contact, and by Leaching. *Environmental Science & Technology*, 2017, vol. 51, no. 20, pp. 11669-11680.
- [222] Wasson S.J. et al. 2005. , Emissions of Chromium, Copper, Arsenic, and PCDDs/Fs from Open Burning of CCA-Treated Wood. *Environmental Science & Technology*, vol. 39, no. 22, pp. 8865- 8876.
- [223] Matsumoto T., Matsuura H., Tsukihashi F., 2012. Oxidation and Evaporation Behaviors of Cr, Cu and as during Incineration of Wood Treated by Chromated Copper Arsenate Preservative.
- [224] Koivisto A.J. et al. 2017. , First Order Risk Assessment for Nanoparticle Inhalation Exposure during Injection Molding of Polypropylene Composites and Production of Tungsten-CarbideCobalt Fine Powder Based upon Pulmonary Inflammation and Surface Area Dose. *Nanoimpact*, vol. 6, pp. 30-38.
- [225] Ashter A. et al. 2010. , Effects of Nanoparticle Feed Location during Nanocomposite Compounding. *Polymer Engineering & Science*, vol. 50, no. 1, pp. 154-164.
- [226] Singh D. et al. 2016. , End-of-Life Thermal Decomposition of Nano-Enabled Polymers: Effect of Nanofiller Loading and Polymer Matrix on by-Products. *Environmental Science: Nano*, vol. 3, no. 6, pp. 1293-1305.
- [227] WIKIPEDIA, Acrylonitrile butadiene styrene. 2019, last edited 24 February 2020. Available at https://en.wikipedia.org/wiki/Acrylonitrile_butadiene_styrene
- [228] Zontek T.L. et al. , An Exposure Assessment of Desktop 3D printing. *Journal of Chemical Health and Safety*, 2017, vol. 24, no. 2, pp 15-25.

- [229] Stephens B., Azimi P., El Orch Z., Ramos T.2013. , Ultrafine Particle Emissions from Desktop 3D Printers. Atmospheric Environment, vol. 79, pp. 334-339.
- [230] Gorman J.M., Scott K.C., Norris S., Important factors in characterizing particle release during 3D printing of MWCNT enabled filaments. Presentation to QEEN II, 9-10 October 2018. Available at <https://www.nano.gov/sites/default/files/Gorham%20QEEN%20II%20meeting%202018-final%20JMM.pdf>
- [231] ISO 4892-3, Plastics — Methods of exposure to laboratory light sources — Part 3: Fluorescent UV lamps)
- یادآوری - استاندارد ملی ایران شماره ۳-۱۲۵۲۳: سال ۱۳۹۵، پلاستیک‌ها-روش‌های نوردهی با منابع نوری آزمایشگاهی - قسمت ۳: لامپ‌های فلورسنت فرابنفش، با استفاده از استاندارد ISO 4892-3:2016 تدوین شده است.