بسمه تعالی

جزوه ایمنی آزمایشگاه نانو فناوری

تهیه و گردآوری:

دکتر صدیقه برنده

دکتر سمیراسادات ابوالمعالی

دکتر فخرالسادات فرودی

دکتر مینا شفیعی

نانوذرات به مواد بسیار ریزی اطلاق می‌شوند که در فرایندهای مختلف طبیعی یا با فرایندهای نانوفناوری تهیه می‌شوند. ظهور این مواد، بیشتر صنایع از جمله داروسازی، الکترونیک، مواد غذایی، نساجی و سایر صنایع را تحت تأثیر خود قرار داده است. خواص منحصر به فرد نانوذرات در مقایسه با انواع ترکیبات درشت (macro) شیمیایی باعث ماندگاری و افزایش کارایی محصولات شده است. با تمام این مزایا، نانومواد گونه‌های ناشناخته‌ای از مواد شیمیایی هستند که نمی‌توان بدون شناسایی دقیق و مؤثر، آن‌ها را به‌طور گسترده‌ای مورد بهره‌برداری قرار داد. مطالعات اخیر حاکی از بروز بیماری‌ها و ناهنجاری‌های جبران‌ناپذیری بر سلامت موجودات زنده است که تنها متأثر از این مواد بوده‌اند بنابراین در همین راستا برای حفاظت از سلامت انسان‌ها، قوانین و مجریان قانون در سطوح ملّی و بین‌المللی بسیار تأثیرگذار هستند. هدف این مقاله بررسی اهمیت واپایش (control) و قانونگذاری در حوزه نانوفناوری است.

مقدمه

فناوری نانو یک حوزه در حال رشد و گسترش است. اما همراه با این گسترش و خلق فرصتهای نو برای ایجاد صنایع، کاربردها و محصولات جدید ممکن است اثرات زیان آوری را بر سلامت انسان و محیط زیست تحمیل کند. در مقیاس نانو، خصوصیات مواد دستخوش تغییرات بسیاری می‌شود. به تبع این تغییرات، پیش‌بینی، شناسایی، ارزیابی و کنترل ریسک‌های بهداشتی، ایمنی و زیست محیطی ناشی از نانومواد نیز با چالش مواجه است. آزمایشات انجام شده روی خرگوش‌ها نشان داده است نانوذراتی که در ناحیه بینی جایگزین می‌شوند قادرند از طریق اعصاب بویایی مستقیماً به مغز منتقل شوند. بطور کلی، نانوذرات استنشاق شده نسبت به ذرات بزرگ‌تر به میزان بیشتری در ناحیه میانی و تحتانی سیستم تنفسی جایگزین می‌شوند.

مواجهه با نانومواد ممکن است از طریق استنشاق، تماس پوستی و بلع اتفاق افتد. مطالعات حیوانی نشان می‌دهد ذرات بسیار ریز کم محلول ممکن است نسبت به ذرات بزرگتر سمی‌تر باشند. این ذرات به دلیل اندازه بسیار کوچکشان میتوانند به اعماق ریه نفوذ نموده و از طریق ورود به جریان خون به سایر بخش‌های بدن منتقل شوند.

نانوذرات، به دلیل اندازه کوچک و سطح زیاد، واکنش پذیری بسیار زیادی از خود نشان می‌دهند. همین خصوصیت سبب می‌شود تا نسبت به ذرات درشت‌تر ریسک حریق و انفجار بیشتری ایجاد کنند. سال‌هاست که از نانوذرات مهندسی شده و مواد متخلخل نانوساختار، بعنوان کاتالیست، برای افزایش سرعت واکنش‌ها یا کاهش دمای لازم برای واکنش گازها و مایعات به شکل موثری استفاده می‌شود. بسته به ترکیب و ساختار آنها، تعدادی از نانومواد ممکن است باعث واکنش‌های کاتالیستی اولیه (آغازگر) و افزایش خطر آتش گرفتن و انفجار شوند که تنها با توجه به ترکیب شیمیایی آن‌ها قابل پیش بینی نیست. نانوذرات، به علت داشتن سطح وسیع ویژه، ممکن است در زمان استفاده دارای الکتریسیته ساکن زیادی شوند، بطوری‌که با پخش شدن در هوا ابر قابل انفجاری را تشکیل داده و خود به خود مشتعل شوند (مانند نانوپودر آهن).

بنابراین ضروری است کلیه مسئولین و مدیران محیط‌های کاری نانو، پس از انجام ارزیابی‌های لازم، جهت کنترل ریسک‌های بهداشتی و ایمنی نانومواد، اقدامات لازم را به عمل آورند. اگرچه هنوز استانداردها و راهنماهای ویژه‌ای برای ارزیابی و کنترل ریسک‌های مذکور وجود ندارد، لیکن تحقیقات اولیه نشان می‌دهند روش‌ها یا سامانه‌های کنترلی مورد استفاده برای آزمایشگاه‌ها یا کنترل آئروسل‌ها، برای کنترل ریسک‌های بهداشتی و ایمنی نانومواد موثر خواهند بود. این استاندارد راهنمایی برای انتخاب روش‌های مناسب کاهش مواجهه با نانوذرات و حذف یا کاهش ریسک فاکتورها جهت تأمین سلامت و ایمنی کارکنان و کاهش اثرات زیست

محیطی می‌باشد. لذا این راهنماها به هیچ‌وجه مانع از تلاش مدیران و مسئولین محیط‌های کاری نانو برای ایجاد یا بهبود شیوه‌های اختصاصی ارزیابی و کنترل خطرات و تأیید کفایت کنترل‌های بکارگرفته شده برای حفاظت از سلامت کارکنان نمی‌باشد.

اثرات نانومواد روی سلامت انسان و ایمنی افراد

- ورود به جریان خون و انتقال به اعضاء مختلف بدن پس از استنشاق
- جایگزینی نانوذرات (۳۷-۳۵ نانومتر) در ناحیه بینی و انتقال مستقیم به مغز از طریق اعصاب بویایی؛ به دلیل قدرت جذب و فعالیت بیولوژیکی بالا
- آغاز واکنش‌های کاتالیستی توسط برخی از نانو مواد
- ریسک بیشتر حریق و انفجار نانوذرات نسبت به ذرات درشت‌تر با ترکیب شیمیایی مشابه، به علت افزایش سطح و واکنش پذیری
- جذب از طریق پوست: ورود به سیستم لنفاوی پس از گذر از لایه درم و توزیع سیستمیک در بدن

در زمان نبود اطلاعات قوی در خصوص ریسک نانومواد، بکارگیری شیوه‌های احتیاط آمیز توصیه می‌شود. چون این شیوه‌ها صرفا بر اتخاذ مراحل مناسب برای کاهش قابل ملاحظه احتمال آسیب تاکید دارند، نیازمند گذشت زمان برای دستیابی به اطلاعات کامل نمی‌باشند.

بکارگیری اقدامات احتیاط آمیز بدین معنی است که سازمان‌ها تا زمان درک کامل خطرات بهداشتی و ایمنی نانوذرات، با استفاده از اطلاعات بهداشتی و ایمنی موجود، از کارکنان خود محافظت مناسب به عمل آورند و هرگز به معنای عدم استفاده از نانوذرات نمی‌باشد.

آئین کار سلامت و ایمنی در محیط‌های کار با نانومواد

این آئین‌نامه در کلیه محیط‌های کاری نانو کاربرد داشته و شایسته است توسط مدیران، متخصصین و کارکنان کلیه محیط‌های کاری نانو با هدف ایجاد محیط کار سالم، حفظ سلامت کارکنان، آموزش کارکنان، تهیه آئین‌های کار اختصاصی و تهیه تجهیزات و امکانات ایمنی مورد نیاز به کار گرفته شود .راهنماهای ارائه شده در این استاندارد می‌تواند جهت مدیریت موضوعات بهداشتی، ایمنی و زیست محیطی مرتبط با موارد زیر مورد استفاده قرار گیرد:

۱- نانومواد مهندسی شده

۲- نانوذرات

۳- مواد اولیه مورد استفاده در سنتز نانومواد و مواد بینابینی و پسماندهای حاصل از سنتز آن‌ها

۴- آزمایشگاه‌ها و مراکز تحقیقاتی نانو

اصطلاحات و تعاریف

محیط‌های کاری نانو

به محیط‌هایی اطلاق می‌شود که در آن‌ها ذرات نانومقیاس مهندسی شده ساخت، تولید، استفاده یا فرآوری می‌شوند. برخی از این محیط‌های کاری عبارتند از مراکز تحقیق و توسعه، مراکز صنعتی و آزمایشگاه‌های کنترل کیفی.

نانومقیاس

محدوده اندازه که از ۱ تا ۱۰۰ نانومتر متغیر است.

نانوماده

ماده ای است که حداقل یکی از ابعاد آن و یا اجزا تشکیل دهنده آن در مقیاس نانو قرار دارد.

نانوذره

نانوماده ای است که هر سه بعد آن در مقیاس نانو باشد.

یادآوری- چنانچه نسبت بلندترین به کوتاه‌ترین محور یک نانوماده بیش از سه برابر باشد اصطلاح نانومیله یا نانوصفحه اطلاق می‌شود.

نانوذرات مهندسی شده

نانوذراتی هستند که بطور عمدی و با هدف ایجاد خصوصیات ویژه تولید شده اند.

نانوذرات مهندسی شده غیر متصل (UNP) Unbound engineered nanoparticles

آن دسته از ذرات نانومقیاسی هستند که درون یا روی یک ماتریکس (مانند یک ماتریکس پلیمری) قرار نداشته و در دما و فشار محیط می‌توانند در هوا پخش شده و مدت ها معلق باقی بمانند.

ذره اولیه

ذره ای که از تجمع ذرات کوچکتر بوجود نیامده باشد و در خلال مرحله هسته زایی در فاز بخار و قبل از انعقاد تشکیل می‌شود.

انبوهه (Aggregate)

ذره ای است شامل ذرات جوش خورده یا با پیوند قوی که مساحت سطح خارجی حاصل آن می تواند به طور چشمگیری از مجموع سطوح محاسبه شده برای تک تک اجزاء کوچکتر باشد.

کلوخه (Agglomerate)

مجموعه ای از ذرات یا انبوهه‌ها یا مخلوط با اتصال سست که مساحت سطح خارجی منتجه آن مشابه مجموع سطوح تک تک اجزاء است.

یادآوری- نیروهایی که کلوخه را یکپارچه نگه می‌دارد نیروهای ضعیف هستند، مانند نیروهای واندروالس و همین‌طور گره خوردگی فیزیکی ساده.

یادآوری- کلوخه‌ها را ذرات ثانویه نیز می‌نامند.

فیلتر **HEPA**

فیلتری که قادر است ذرات ۳۰۰ نانومتر و بزرگ‌تر را با بازده حداقل ۹۹/۹۵٪ جمع آوری و نگهداری کند. به عبارتی از هر ۱۰۰۰۰ ذره ۳۰۰ نانومتری فقط ۵ ذره می‌تواند از این فیلتر عبور کند.

فیلتر ULPA

فیلتری که قادر است ذرات ۱۲۰ نانومتر را با بازده حداقل ۹۹/۹۹٪ جمع آوری و نگهداری کند.

فاکتور حفاظت (APF)

سطحی از حفاظت تنفسی است که پیش‌بینی می‌شود در محیط کار توسط یک وسیله حفاظت تنفسی یا گروهی از وسایل حفاظت تنفسی، به شرط اجرا و نگهداری موثر برنامه حفاظت تنفسی، برای کارکنان تأمین گردد. فاکتور حفاظت که در واقع نشانگر کارآیی و راندمان وسیله حفاظت تنفسی است از طریق آزمون‌های کمی تناسب تعیین می‌شود که مقدار عددی آن برابر است با غلظت آلاینده در خارج از ماسک تقسیم بر غلظت آلاینده در داخل ماسک. برای مثال، اگر فردی در محیطی که غلظت آلاینده مورد نظر در آن برابر ۱۰۰ است از ماسکی با فاکتور حفاظتی ۲۰ استفاده کند، انتظار می‌رود که غلظت آلاینده در درون ppm ۵ بیشتر نباشد. مقادیر فاکتور حفاظتی بر اساس مطالعات آزمایشگاهی و با در نظر گرفتن ppm ماسک از فاکتورهای متنوعی از قبیل؛ نشت به داخل بدلیل نفوذ از فیلتر و اطراف ماسک بدست آمده است. در حال حاضر اطلاعات خاصی درباره نشت نانوذرات به داخل ماسک در دسترس نیست.

تهیه دستورالعمل کار با نانومواد در آزمایشگاه

هدف از تدوین این دستورالعمل، ارائه راهنمایی‌هایی است که بتواند در محیط‌های آزمایشگاهی با ایجاد کنترل‌های مهندسی و مدیریتی، به حفظ سلامت کارکنان کمک کند. این دستورالعمل همچنین راهنمایی‌هایی برای مواد نامعلوم موجود در زمینه نانومواد که خطرات آن‌ها هنوز تعیین نشده است، ارائه می‌دهد و به کاهش ریسک آسیب‌دیدگی کاربران کمک می‌کند. در به کارگیری مواد نانو برای دستیابی به اهداف کنترلی و به حداقل رساندن مواجهه افراد با ذرات باید برنامه‌های عملکردی تهیه شود. این برنامه عملکردی باید توسط سرپرست آزمایشگاه تهیه شود. در این خط مشی، برای به حداقل رساندن مواجهه با ذرات نانو تا پایین‌ترین حد قابل اجرا (ALARP: As Low As Reasonably Practicable) تأکید می‌شود. این خط مشی باید به اطلاع کلیه کارکنان سازمان رسانده شده و روش‌های اجرایی، دستورالعمل‌ها و موارد آموزشی منعکس شود.

طراحی برنامه عملیاتی مستنداتی که باید تهیه، نگهداری و به روزآوری شوند، باید حداقل شامل موارد زیر باشند:

۱- شرح مسئولیت‌های افراد در جهت کاهش میزان مواجهه با نانوذرات

۲- تهیه خصوصیات مواد و اطلاعات مربوط به ایمنی آن‌ها (برگه‌های شناسنامه ایمنی مواد شیمیایی)

۳- ارزیابی‌های کیفی و کمی مواجهه با نانوذرات، ارزیابی خطر و تجزیه و تحلیل آن

۴- تحلیل‌های مهندسی و انتخاب تجهیزات مناسب در آزمایشگاه

۵- ارائه مقرراتی در زمینه فعالیت‌های آزمایشگاهی، روش‌های اجرای کار (SOP: Standard Operating Procedures) و خط مشی‌ها و روش‌های مقابله با وضعیت‌های اضطراری

۶- ارائه مواد آموزشی به آزمایش‌کنندگان و بازآموزی دوره‌ای به آن‌ها

۷- ارایه برنامه‌های زمان‌بندی برای تعمیر و نگهداری، صدور گواهی عملکرد و اثربخشی تجهیزات پایش و کنترل نانو مواد

اقدامات مورد نیاز برای به کارگیری مواد نانو در آزمایشگاه

کاهش مواجهه با نانومواد با پایش مستمر نانومواد موجود در آزمایشگاه فراهم می‌شود. مراکز علمی در سطح جهان عوارض ناشی از مواد شیمیایی را در غلظت‌های گوناگون بررسی کرده‌اند و در موارد متعدد حد مجاز تماس با آلاینده‌ها بیان شده است. در حال حاضر، هیچ حد مجاز مواجهه ویژه‌ای برای مواجهه با نانوذرات مهندسی شده (به جز نانوذراتTiO_2) وجود ندارد. این در حالی است که چنین حدود و راهنماهایی از طریق سازمان‌هایی مانند اداره ایمنی و بهداشت حرفه‌ای آمریکا (OSHA [Occupational Safety and Health Administration])، انجمن ملی ایمنی و بهداشت حرفه‌ای آمریکا (NIOSH [National Institute of Occupational Safety and Health])، کمیته دولتی متخصصین بهداشت صنعتی آمریکا (ACGIH [American Conference of Govermental Industrial Hygienists]) و وزارت بهداشت، درمان و آموزش پزشکی کشور برای ذرات درشت‌تر با ترکیب شیمیایی مشابه وجود دارد.

شواهد علمی نشان می‌دهد نانوذرات ممکن است به لحاظ بیولوژیکی فعال‌تر از ذرات درشت‌تر با ترکیب شیمیایی مشابه باشند، به همین دلیل ممکن است در صورت استنشاق، خطرات بیشتری تحمیل کنند؛ بنابراین در یک رویکرد محافظه‌کارانه، برای تعیین خطر تماس با نانوذرات بعد از تعیین مواجهه با نانومواد، باید حدود مجاز فعلی و افزایش فعالیت بیولوژیکی نانوذرات تواما در نظر گرفته شوند یا به عبارتی، مقادیر مواجهه با نانومواد در مقادیری کمتر از حدود مجاز فعلی در نظر گرفته شود.

راهبردهای مختلف کنترل مواجهه با نانومواد شامل حذف خطر (Elimination)، جایگزینی مواد و فرآیندهای پرخطر با مواد و فرآیندهای کم‌خطر (Substitution)، محصورکردن فرآیندها (Enclose)، کنترل‌های مهندسی (Engineering Controls)، کنترل‌های مدیریتی (Administrative Controls)، و استفاده از تجهیزات حفاظت فردی (Personal Protective Equipments (PPE)) است. ترتیب اجرای این کنترل‌ها باید مطابق شکل ۱ رعایت شود به طوری که بالاترین گزینه، قدم اول در فرآیندهای کنترلی است. در عمل معمولاً ترکیب مناسبی از این استراتژی‌ها، بهترین شیوه کنترل مواجهه با نانومواد را فراهم خواهد کرد.

شکل ۱- اجرای روش‌های کنترل مواجهه با نانومواد

تهیه برگه اطلاعات ایمنی خاص نانومواد Specific Safety Data Sheet (SDS)

آگاهی از خطرات ناشی از نانومواد و چگونگی پیشگیری از این خطرات اهمیت زیادی دارد. تهیه فهرست نانومواد مورد استفاده در آزمایشگاه و اطلاعات لازم در خصوص سمیت آن‌ها، قدم اول جهت کاربری این مواد است. یکی از مهم‌ترین منابع برای تهیه روش‌های مناسب در به کارگیری نانومواد، استخراج شناسنامه ایمنی مواد شیمیایی است. هر آزمایشگاه باید فهرستی از اطلاعات ایمنی خاص نانومواد (SDS) در اختیارداشته باشد که قبل از شروع به کار بررسی و مطالعه شود. برگه اطلاعات ایمنی خاص نانومواد باید شامل شرح محصول، شناسایی خطرات، ترکیبات، خصوصیات فیزیکی و شیمیایی، اقدامات آتش‌نشانی، اقدامات انتشار اتفاقی، حمل و نقل و ذخیره‌سازی، کنترل مواجهه افراد، وسایل حفاظت فردی و دفع آن باشد.

اقدامات کنترل مهندسی

انتخاب روش‌های مختلف کنترل مهندسی در آزمایشگاه باید بر اساس نتیجه حاصل از ارزیابی و تعیین سطح خطر انجام شود. مطابق اصول کنترل مواد خطرناک برای سلامتی، برای کنترل نانوذرات شیوه‌های زیر باید رعایت شود:

الف) ریسک بسیار زیاد - دریافت مشاوره از متخصصین مربوط

ب) ریسک زیاد - محصور کردن فرایند

ج) ریسک کم - اجرای کنترل‌های مهندسی مانند تهویه مکشی موضعیدر زمینه تهویه مهندسی، به کارگیری موارد زیر ضروری است:

- در هر فعالیت آزمایشگاهی که ذرات معلق در هوا تولید می‌شود، از فضاهای محصور استفاده شود که هوای داخل آن تخلیه می‌شود (شکل ۲). نمونه این فضاها، هودهای آزمایشگاهی، هودهای فیوم، کیسه‌های دستکش‌دار (Glove Bags)، و جعبه‌های دستکش‌دار (Glove box) یا کابینت‌های ایمنی زیستی(Biological Safety Cabinet (BSC)) هستند. در صورت عدم

امکان محصور کردن فعالیت یا فرآیند، از هودهای خارجی مثل هودهای دریافت‌کننده و هود اسنورکل (Snorkel Hood) استفاده شود. هودهای فیوم معمول‌ترین کنترل مهندسی هستند که توسط برخی از سازمان‌ها برای کنترل انواع متنوعی از نانومواد مانند نانوپودرها، نانولوله‌های کربنی، تعلیق‌های کلوئیدی، فولرن‌ها، نقاط کوانتومی، پلیمرها، نانوسیم‌ها، نانوبلورها و کربن سیاه مورد استفاده قرار می‌گیرند.

شکل ۲- نمونه‌هایی از محفظه‌های محصور برای کار ایمن با نانومواد

- درجایی که فرآیند یا منبع آلودگی محصور شده است، فشار هوای داخل این فضا باید نسبت به هوای اطراف (به ویژه هوای منطقه تنفسی فرد) منفی باشد تا از انتشار آلودگی به بیرون جلوگیری شود. چنانچه فرد توسط اتاقک‌های جداکننده یا اتاقک‌های کنترل، از فرآیند یا عملیات خطرناک جدا شده باشد، این فضا باید دارای فشار مثبت باشد.
- اگر فرایند را نمی‌توان به شکل محصور انجام داد، از سیستم‌های مهندسی شده دیگری مانند سیستم مکنده موضعی (Local Exhaust Ventilation (LEV)) برای کنترل نانومواد منتشر شده استفاده شود. سیستم گیراندازی موضعی باید تا جایی که ممکن است به منبع تولید نانومواد نزدیک باشد. نصب و راه‌اندازی و کنترل منظم باید برای حفظ مکش تهویه مطابق حدود استاندارد در نظر گرفته شود. عملکرد سامانه‌های تهویه مکشی موضعی ارتباط زیادی با کیفیت و کارآیی طراحی و نگهداری آن‌ها دارد؛ لذا کنترل سامانه‌ها و نگهداری سوابق آن‌ها مهم است. چنانچه سرعت مکش هوا در دهانه هود خیلی بالا باشد، آشفتگی ایجاد شده در جریان هوا (Turbulence) ممکن است سبب فرار مواد از دهانه هود و در نتیجه اتلاف مواد و تنفس آن‌ها توسط آزمایش‌کنندگان شود. سیستم‌های تهویه موضعی مؤثرترین روش کنترل در عملیاتی همچون مخلوط کردن، بازیافت، بسته‌بندی و توزین است. تهویه موضعی به طور متداول در فرآیندهای جوشکاری و برشکاری فلزات استفاده می‌شود.
اگر نانومواد مورد استفاده بسیار سمی هستند یا شکل فیبری/لوله‌ای دارند، از اتاقک‌های محصور مجهز به فیلتر HEPA استفاده شده و در فواصل منظم کارآیی هود تست شود. اگر امکان استفاده از فیلتر HEPA در تهویه وجود ندارد از سیستم‌های تهویه عمومی که هوا را به چرخش در می‌آورد، استفاده شود.

- روش ارزیابی خطر و کنترل مهندسی مناسب، پیاده‌سازی شود. نمونه‌هایی از این کنترل‌ها عبارتند از:
  - پایش متناوب هوا
  - پایش سیستم‌های هشدار دقیق که قادر به شروع عمل یا فرایند اصلاحی باشد
  - عدم به کارگیری هودهای لامینار با جریان افقی که سبب هدایت جریان هوای فیلتر شده به سمت صورت کاربر می‌شوند.
  - حفظ و نگهداری و آزمایش منظم برای اثربخشی در سیستم‌های مکنده

اقدامات کنترل مدیریتی

طراحی دقیق و مؤثر فرآیندها نقش مؤثری در پیشگیری از وقوع مواجهه با نانوذرات دارد. در برخی شرایط، نصب برخی تجهیزات یا فرآیندها، با هدف اصلاح نواقص موجود در طرح اولیه، می‌تواند بسیار مشکل باشد. به همین دلیل در مرحله طراحی باید به جانمایی تجهیزات و تأسیسات، نصب، نحوه کار تجهیزات و ایستگاه‌های کار توجه ویژه‌ای شود.

در صورت امکان، از مواد و فرآیندهای کم خطرتر استفاده شود. نمونه‌هایی از جایگزینی عبارتند از:

- استفاده از نانوساختارهایی که درون مواد جامد جاسازی شده‌اند مانند مواد کپسول شده در یک کیسه پلاستیکی یا کپسول ژلاتینی غیر قابل حل
- استفاده از نانوساختارهایی که روی مواد جامد محکم شده‌اند
- تغییرشکل فیزیکی مواد یا محصول مانند استفاده از نانوذرات به شکل معلق در مایعات (Dispersions)، خمیر (Paste)، گرانول، و یا کامپوزیت به جای استفاده از پودرها یا آئروسل‌ها
- تغییر فرآیندها مانند تغییر فرآیندهای خشک به فرآیندهای تر و استفاده از آب در نقاط انتقال یا خروج مواد خشک یا اصلاح مراحلی از فرآیند در جهت مکانیزه شدن آن

خوردن و آشامیدن تنها در مناطق تعیین‌شده‌ای مجاز است که در آن از مواد شیمیایی و نانوذرات استفاده نمی‌شود. بهتر است از برچسب‌هایی برای نشان دادن این موضوع استفاده شود (شکل ۳).

شکل ۳- استفاده از برچسب برای مدیریت به کارگیری مواد نانو

جهت حفاظت از سلامت آزمایش‌کنندگان نانومواد ، برنامه پایش سلامت (Health Surveillance) باید طرح‌ریزی و اجرا شود. افراد باید به طور دوره‌ای مورد آزمایش‌های مختلف مانند تست ریه، کبد، کلیه و تست خون قرار گرفته و نتایج دوره‌ای مختلف مقایسه شود. این برنامه صرفا باید به وسیله متخصصین بهداشت حرفه‌ای و طب کار و آگاه به خصوصیات و خطرات بالقوه نانومواد انجام پذیرد.

کلیه آزمایشگاه‌های نانو باید برای مقابله با وضعیت‌های اضطراری از قبیل ریخته شدن مواد شیمیایی حاوی نانوذرات، حریق و انفجار پیش‌بینی‌های لازم را داشته باشند.

استفاده از وسایل حفاظت فردی مناسب باید به درستی مدیریت شده و انطباق آن‌ها با برنامه حفاظت تنفسی آزمایشگاه مدنظر قرار گیرد.

در هنگام کار یا جابه‌جایی نانومواد باید از محافظ چشم/صورت، عینک ایمنی، دو جفت دستکش (ترجیحاً دستکش نیتریل)، لباس‌های محافظ یا لباس آزمایشگاه و محافظ تنفسی مانند ماسک گرد و غبار (N95) استفاده شود؛ اما برای تامین حفاظت کامل افراد استفاده از ماسک‌هایی با فیلتر HEPA توصیه می‌شود (شکل۴).

شکل ۴- نمونه‌ای از تجهیزات حفاظت فردی مورد استفاده در آزمایشگاه

- دستکش‌های پلیمری از جنس نیتریل (استفاده از دو جفت دستکش بطور همزمان توصیه می شود.)
- اگر احتمال تماس گسترده نانومواد با پوست وجود دارد، از دو دستکش با آستین بلند استفاده شود. روپوش یا لباس‌های مورد استفاده در آزمایشگاه بهتر است از جنس پارچه‌های با بافت مقاوم در برابر ورود هوا باشد. پوشاک حفاظتی از جنس پارچه های غیربافتنی مثل پارچه های پلی اتیلن با دانسیته بالا حفاظت زیادی در برابر نفوذ نانوذرات دارند. لذا از پوشیدن پوشاک کتانی هنگام کار با نانوذرات اجتناب کنید.
- شلوارهای بلند بدون درز، پیراهن های آستین بلند و روپوش های آزمایشگاهی

- کفش های جلو بسته با قابلیت نفوذ کم (در صورت وجود احتمال خطر انفجارو اشتعال، این کفش ها باید از نوع آنتی استاتیک نیز باشند).
- عینک‌های ایمنی و ماسکهای تمام صورت
- در صورت وجود غلظت بیش از اندازه نانوذرات، از وسایل حفاظت تنفسی فشار مثبت (Powered Air-Purifying Respirator (PAPR) استفاده شود (شکل ۵).
- بعد از استفاده از دستکش، دست ها را تا بالاتر از محل پوشش با آب و صابون بشویید.

شکل ۵- نمونه‌ای از وسیله تصفیه هوا PAPR

بالاترین سطح حفاظت فردی توسط کابینت‌های کلاس ۳ (جعبه دستکش‌دار) فراهم می‌شود که برای کار با میکروارگانیسم‌های بسیار خطرناک و واگیر (گروه ریسک ۴) استفاده می‌شوند. کلیه منافذ این کابینت در برابر ورود گاز عایق است. هوای ورودی توسط فیلتر HEPA ضد عفونی شده و هوای خروجی نیز از دو فیلتر HEPA عبور داده می‌شود (شکل ۶).

کابینت‌های کلاس ۲ نوع B2 (معروف به کابینت‌های تمام مکنده و کابینت‌های کلاس ۳ (جعبه دستکش‌دار) هنگام کار با مقادیر زیاد رادیونوکلایدها و مواد شیمیایی فرار ضروری هستند.

شکل ۶- راست: جعبه دستکش دار (Glove Box)- چپ : کیسه دستکش دار (Glove Bag)

مشخصات فنی و کیفیت سیستم های تهویه موضعی مدنظر برای جمع آوری نانوذرات، باید مشابه مشخصات فنی و کیفیت سیستم‌های مورد استفاده برای جمع آوری گازها و بخارات باشد.

سیستم های تهویه موضعی و مکنده های مورد استفاده برای جمع‌آوری نانوذرات باید به فیلترهای مورد تایید HEPA و یا فیلترهای ULPA مجهز باشند.

هوای جمع‌آوری شده توسط سیستم های تهویه موضعی باید پس از گذر از مرحله فیلتراسیون، در مرحله نهایی توسط وسایل تمیزکننده هوا مانند اسکرابرهای تر یا رسوب‌دهنده‌های الکترواستاتیک تمیز شود. این تجهیزات به ویژه رسوب دهنده‌های الکترواستاتیک برای به دام انداختن ذرات بسیار ریز موثر می‌باشند. صفحات جمع‌آوری کننده این تجهیزات باید در فواصل زمانی مشخص تمیز گردند.

با زباله‌های حاوی نانومواد باید به عنوان زباله‌های خطرناک رفتار شود. آزمایشگاه‌هایی که زباله‌های نانو تولید می‌کنند نباید از سطل زباله‌های معمولی استفاده کنند. روپوش‌های آلوده به نانومواد، دستکش‌ها و سایر وسایل آلوده باید به عنوان زباله خطرناک زیست‌محیطی دور انداخته شوند.

علاوه بر اقدامات انجام گرفته برای پیش‌گیری و کنترل انتشار نانوذرات در محیط کار باید برای جلوگیری از مشتعل شدن آن‌ها نیز تدابیر لازم اتخاذ گردد. برخی از این تدابیر عبارتند از:

- استفاده از تجهیزات برقی و روش های سیم کشی متناسب
- کنترل الکتریسیته ساکن تجهیزات بطور مثال از طریق اتصال به زمین
- ممنوعیت کشیدن سیگار
- کنترل شعله‌های باز و جرقه ها
- کنترل جرقه‌های ناشی از فعالیت‌های مکانیکی از جمله جرقه‌های ناشی از اصطکاک
- پاک کردن سیستم های تولید حرارت و سطوح گرم از گردوغبار
- انتخاب و استفاده درست از وسایل حمل و نقل صنعتی مثل لیفتراک ها

اصول بهداشت فردی در محیط های کاری نانو

- نصب روشویی و دوش در محیط کار امکان تمیز کردن و رفع آلودگی پوستی را فراهم می کند.
- امکانات لازم برای تمیز کردن بهداشتی و ایمن لباس‌های آلوده باید در محیط کار فراهم شود. لباس‌های آلوده به نانوذرات به هیچ‌وجه نباید جهت شستشو به منزل یا خارج از محیط کار منتقل شوند.
- استفاده از هوای تحت فشار برای تمیز کردن لباس ممنوع می‌باشد.
- خوردن، آشامیدن و سیگار کشیدن در محیط کار، جز در مکان‌های تعیین شده، ممنوع می‌باشد.
- کمدهای مربوط به لباس‌های شخصی و لباس‌های کار باید مجزا از هم و در دو مکان جدا باشد.
- کلیه سطوح محیط کار از قبیل کف، دیوارها، سقف، درب‌ها، پله‌ها، میزها، صندلی‌ها، ماشین‌آلات، تجهیزات، و ابزار را حداقل در پایان هر شیفت کاری به روش تر و با استفاده از مکنده های HEPA تمیز کنید. از روش های دیگر مانند شستشو

با حلال، سوزاندن، حل کردن به کمک اسید و تمیز کردن به روش پلاسما نیز می توان برای رفع نانومواد از روی تجهیزات استفاده کرد.

تمیز کردن ریخت و پاش نانومواد

- محوطه ای که دچار آلودگی شده یا انتظار آلودگی آن می‌رود را مشخص نموده و با استفاده از نوارهای هشدار دهنده یا وسایل مناسب دیگر دسترسی افراد متفرقه را به آن محدود کنید.
- مواد پودری را به روش تر و با استفاده از پارچه‌های مرطوب و نانومواد محلول را با استفاده از مواد جاذب تمیز کنید. البته روش های تمیز کردن تر به کمک صابون‌ها یا روغن‌های تمیز کننده ارجح می باشد.
- پس از جمع آوری مایعات و خشک کردن محوطه، جهت به حداقل رساندن پخش شدن نانوذرات در محیط، دور تا دور محوطه را با استفاده از موانع مناسب محصور نمایید. سپس با استفاده از مکنده های ویژه جمع‌آوری نانومواد مجهز به فیلتر HEPA نانوذرات باقی مانده در محل را مکش کنید.
- جهت کاهش احتمال انتشار نانوذرات به سایر نقاط، در خروجی محوطه محصور شده از یک کف پایی در زیر پای افراد درگیر در عملیات تمیز کردن استفاده نمایید.
- به هیچ وجه از فشار هوا جهت تمیز کردن ریخت و پاش نانومواد استفاده نکنید.
- در صورت آلوده شدن لباس به نانومواد سریعا آن‌را تعویض کرده و در صورت تماس با پوست محل تماس را ۱۵ الی ۲۰ دقیقه زیر آب نگهداشته و سپس با آب و صابون بشویید.
- کلیه کارکنانی که با مواد ریخته شده مواجهه داشته‌اند را جهت بررسی و مراقبت پزشکی احتمالی به مرکز پزشکی ارجاع دهید.
- کلیه تجهیزات ایمنی مورد نیاز در مواقع آلودگی از قبیل چشم‌شوی، دوش ایمنی، خاموش کننده‌های چند منظوره حریق (ABC)، کیت کمک‌های اولیه، تجهیزات حفاظت فردی و کیت‌های مقابله با ریخت و پاش باید تهیه و همواره سالم و کامل باشند.

برنامه پایش سلامت

جهت حفاظت از سلامت کارکنان در محیط‌های کاری نانو، برنامه پایش سلامت باید طرح‌ریزی و اجرا شود. کارکنان در معرض ریسک بالای مواجهه مانند محققین مراکز تحقیقاتی و کارکنان تعمیر و نگهداری در اولویت انجام این پایش می‌باشند. این کارکنان باید بطور دوره‌ای مورد آزمایش‌های مختلف مانند تست ریه، کبد، کلیه و عملکرد سیستم خونسازی قرار گرفته و نتایج آن‌ها با نتایج آزمایشات بدو استخدام یا آزمایشات مبنا مقایسه شود.