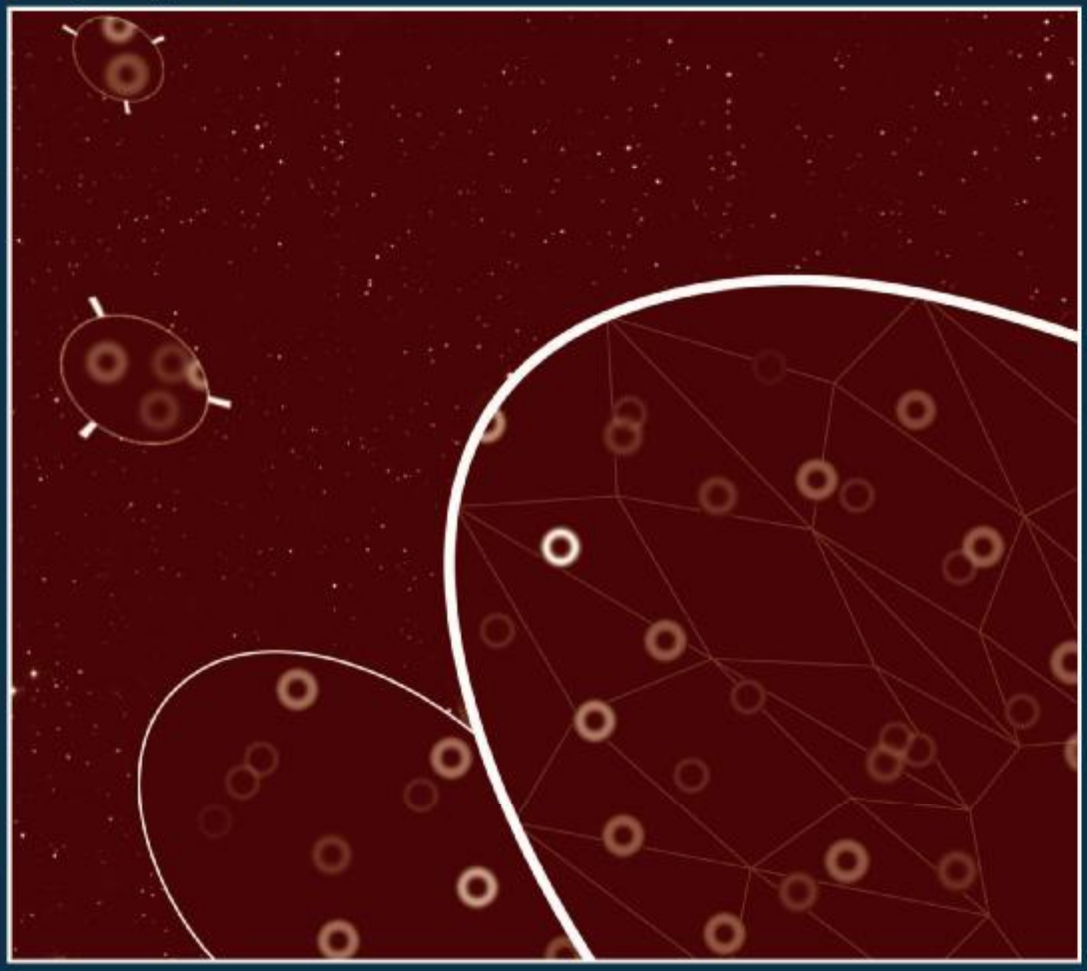
نانوفناوری ایمن

فرصت‌ها و چالش‌ها

- فرصت‌ها و چالش‌ها
- کاربردهای نانوفناوری
- خطرهای احتمالی برای محیط زیست، سلامت، ایمنی
- ارزیابی و تعیین شرایط تماس
- راهنمای کار با نانوذرات مهندسی شده
- نظارت بر سلامت شغلی
- خلاء‌های اطلاعاتی و الزامات پژوهشی آینده

نشریه شماره ۱۰۹



RAH SHAHR
International Group

افق

به نام خداوند جان و خرد

یکصد و نهمین نشریه علمی، فنی و مهندسی ره‌شهر

آدرس وب سایت نشریات فنی گروه بین‌المللی ره‌شهر

http://bulletins.rahshahr.com

آدرس: تهران - میدان ونک، ابتدای بزرگراه حقانی
بعد از چهارراه جهان کودک، خیابان دیدار جنوبی
کوچه هوشیار، پلاک ۳
کدپستی: ۱۵۱۸۷-۵۶۵۱۴

پست الکترونیک: info@rahshahr.com
www.rahshahr.com

تلفن: ۸۲۱۷۲۱۷۲
دورنگار: ۸۸۸۸۳۸۶۸

شماره سند: 01 09653 O PB 0109 00

امور هنری
زهرا قراگوزلو

ناشر
گروه بین المللی ره شهر

لیتوگرافی و چاپ
نقره آبی

ترجمه و گردآوری
ثریا دژبان‌خان
فریبا دژبان خان

صحافی
اندیشه

فهرست:

سخنی با خوانندگان	۳
نانوفناوری: فرصت‌ها و چالش‌ها	۴
کاربردهای نانوفناوری	۶
خطرهای احتمالی برای محیط زیست، سلامت، ایمنی	۱۱
ارزیابی و تعیین شرایط تماس	۱۴
راهنمای کار با نانوذرات مهندسی شده	۱۶
نظارت بر سلامت شغلی	۲۱
خلاءهای اطلاعاتی و الزامات پژوهشی آینده	۲۲

سخنی با خوانندگان

نانوفناوری، یک فناوری توانمندکننده است که امکان پیشرفت‌های بی‌سابقه‌ایی را در زمینه‌های مختلف فراهم می‌آورد. توانایی دستکاری مواد در ابعاد اتم یا مولکول، امکان تولید مواد، ساختار و ابزارهایی را فراهم می‌کند که از خصوصیات منحصر به فرد فیزیکی و شیمیایی ساختارهای مواد در ابعاد نانو استفاده می‌کنند. تحقیقات در فناوری‌های مرتبط با نانو به سرعت در سطح جهانی در حال گسترش است و بی‌تردید چشم‌انداز نانوفناوری بسیار فراتر از کاربردهای کنونی آن خواهد بود.

هر هفته، به طور متوسط سه تا چهار کالای مصرفی جدید مانند پودرها، حلال‌ها و محلول‌های با ابعاد نانو و نیز مواد و ابزارهای نانوساختار و کامپوزیتی وابسته به نانوفناوری، وارد بازار شود[1]. مواد و محصولات نانویی به صورت گسترده‌ای در زمینه‌های دیگر چون نور - الکترونیک، الکترونیک، مغناطیس، تولید مواد پیشرفته با ویژگی‌های خاص و کارایی بالا در تولید و ذخیره‌سازی انرژی، تصویربرداری پزشکی، دارورسازی، لوازم آرایشی، کاتالیست‌ها و بسیاری موارد دیگر که در بخش کاربردهای نانوفناوری معرفی می‌شوند، به کار گرفته می‌شوند. تحقیقات نشان می‌دهد در حال حاضر کاربردهای نوظهور نانوفناوری در اواسط دهه آینده میلادی، تقریباً بر تمام انواع محصولات تولیدی تأثیر گذارد و در سال ۲۰۱۴، حدود ۱۵ درصد تولید جهانی به ارزش ۲/۶ تریلیون دلار را به خود اختصاص دهد[2].

تردیدی نیست که رشد فناوری نانو، منافع اقتصادی و اجتماعی بسیاری به همراه دارد، اما چالش‌های جدیدی را در زمینه‌های مختلف به ویژه سلامت افراد و محیط زیست به وجود آورده است. اطلاعات علمی‌کافی درباره اثرات سلامتی و زیست محیطی نانومواد وجود ندارد. خصوصیات نانومواد با مواد بزرگ‌تر دارای همان ترکیبات شیمیایی متفاوت است، از این رو ابهام‌ها درباره نانومواد بسیار زیاد است.

اطلاعات موجود درباره اثرات منفی نانومواد مهندسی‌شده بر سلامتی، به شناسایی اثرات ناشی از میزان تماس و کنترل میزان قرارگیری در معرض این مواد، محدود است. البته شاید بتوان از اطلاعات علمی‌گسترده موجود درباره تماس حیوانات و انسان‌ها با ذرات بسیار ریز معلق در هوا و واکنش آن‌ها با این مواد، در ارزیابی خطرات احتمالی نانومواد بر سلامتی، استفاده کرد. تا زمانی که اطلاعات کافی در دسترس نباشد، دستورالعمل‌های کاری بایستی براساس بهترین اطلاعات موجود تدوین شوند. اطلاعات علمی‌گسترده درباره مواد از جمله سم‌شناسی و مطالعات همه‌گیر شناسی، روش‌های اندازه‌گیری و کنترل‌های مهندسی، بهترین داده‌هایی است که بر اساس آن می‌توان رویکردهای موقتی را برای کار ایمن با نانومواد و فرضیه‌هایی را برای مطالعه بر روی نانومواد جدید ایجاد کرد.

نشریه حاضر به منظور آشنایی افراد ذینفع، متخصصان سلامت، ایمنی و محیط زیست که باید از تاثیر نانوفناوری بر سلامت شغلی و محیط زیست مطلع باشند و همچنین با هدف ارائه راهبردهایی برای کار ایمن با نانومواد، تدوین شده است؛ پژوهشگران فعال در این زمینه یا افرادی که قصد فعالیت با نانومواد مهندسی‌شده را دارند و درباره اثرات سلامتی، ایمنی و زیست‌محیطی نانومواد پژوهش می‌کنند؛ تدوین‌کنندگان خط مشی‌ها و تصمیم‌گیرندگان در سازمان‌های دولتی و صنایع؛ متخصصان ارزیابی ریسک؛ افرادی که در محل کار با نانومواد سر و کار دارند و یا در معرض آن قرار می‌گیرند؛ کاربران وسایل و تجهیزاتی که با نانومواد ساخته شده‌اند یا افرادی که تحت درمان‌های پزشکی با نانومواد قرار دارند، مخاطبین این نشریه محسوب می‌شوند. اطلاعات و توصیه‌های ارائه شده در این نشریه، با هدف کمک به ارزیابی خطرات بالقوه نانومواد مهندسی شده و آماده‌کردن شرایط برای تدوین یک راهنمای جامع و فراگیر برای کاهش تماس در محل کار آماده شده است.

گروه بین المللی رمشهر

1. www.nanotechproject.org/inventories/consumer
2. Lux Research [2007]

فرصت‌ها و چالش‌ها

به لحاظ تاریخی بسیاری از فناوری‌های جدید در کنار منافع اجتماعی، چالش‌های سلامتی، ایمنی و زیست‌محیطی به همراه داشته‌اند. به عنوان مثال اتومبیل‌ها عموماً منافعی مانند جابه‌جایی افراد و حمل و نقل سریع‌تر و ارزان‌تر را به دنبال داشته ولی به سرعت به دلیل عمده مرگ و میر و جراحات ناشی از تصادف، ایجاد آلودگی در هوا و یا شاید تغییر آب و هوا تبدیل شده‌اند. به صورتی مشابه، گیاهان تغییر یافته از نظر ژنتیکی، ویژگی‌هایی چون مقاومت در برابر آفات و سرما دارند که به محصول بیشتر منجر می‌شود، اما برخی منتقدان براین باورند غذاهای حاصل از تغییرات ژنتیکی، به مقاومت در برابر آلرژی غذایی و آنتی‌بیوتیک‌ها منجر می‌شود. [۴]

هواداران نانوفناوری معتقدند اولاً فرصت حذف یا کاهش خطرهای شناخته شده از طریق بهینه‌سازی مهندسی آن‌ها وجود دارد؛ ثانیاً فناوری نانو، اثرهای مثبتی در تامین سلامت، ایمنی و محیط زیست دارد: [۴]

- کاهش مصرف انرژی، آلودگی و انتشار گازهای گلخانه‌ای
- فرایندهای پاک‌تر و کارآمدتر صنعتی
- کاهش آسیب‌های زیست‌محیطی
- درمان، مدیریت و یا پیش‌گیری از بیماری‌های مهلک
- ارائه مواد جدید ایمن در برابر صدمات، دارای خاصیت خود ترمیمی و در نتیجه پیش‌گیری از بروز نقایص فاجعه‌آمیز.

از سوی دیگر طرفداران محیط زیست معتقدند برخورد با نانوآلودگی‌ها، یکی از چالش‌های بزرگ نانوفناوری خواهد بود.

نانوآلودگی یک واژه کلی برای تمام پسماندهایی است که توسط نانوابزارها یا طی فرایندهای تولید نانومواد ایجاد می‌شوند. این نوع پسماندها به واسطه اندازه آن‌ها می‌توانند بسیار خطرناک باشند. بیشتر نانوذرات مهندسی‌شده در طبیعت یافت نمی‌شوند، بنابراین موجودات زنده، شرایط لازم برای دفع نانوپسماندها را ندارند. [۳]

تعریف‌ها

نانوفناوری: کار با مواد در ابعاد نانو برای تولید مواد، ساختار و ابزارهای جدید[1] در سایت نانوفناوری امریکا، تعریف زیر برای نانوفناوری ارائه شده است: [۲]

- پژوهش و توسعه در محدوده ساختارهایی که حداقل یک بعد آن در حدود ۱ الی ۱۰۰ نانومتر (در حدود اتم/ مولکول) باشد.
- ایجاد و استفاده از ساختارها، ابزارها و سیستم‌هایی که به دلیل ابعاد نانویی خواص و کاربردهای منحصر به فرد دارند.
- توان کنترل و دستکاری در ابعاد اتمی.

نانو اشیاء: براساس استاندارد ISO/TS ۲۷۶۸۷:۲۰۰۸، نانوشیء، ماده ای با یک، دو یا سه بعد خارجی در گستره ابعاد حدود ۱ تا ۱۰۰ نانومتر است. نانو اشیاء معمولاً در یک بستر بزرگ‌تر قرار می‌گیرند که آن را نانومواد می‌نامیم.

نانو اشیاء ممکن است در گاز معلق بوده (نانوآئروسل)، در مایع محلول باشند (نانوهیدروسل) یا در یک ماتریس قرار گیرند (نانوکامپوزیت). [۲]

ذرات اولترافاین[2]: واژه ذره اولترافاین از قدیم الایام در پژوهش‌های مرتبط به آئروسل و منابع سلامت

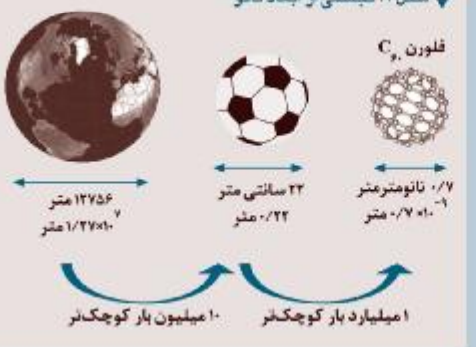
1. http://nano.gov/html/facts/whatIsNano.html

2. Ultrafine

شغلی و محیط زیست، برای توصیف ذرات معلق در هوا با اندازه کوچک تر از ۱۰۰ نانومتر استفاده شده است. صفت اولترافاین برای ذراتی با ابعاد نانو استفاده می‌شود که تعمداً تولید نشده بلکه به صورت تصادفی و فرعی در فرآیندهایی مانند جوش کاری و احتراق تولید می‌شوند. واژه نانوذره، معمولاً درباره ذراتی به کار می‌رود که خصوصیات فیزیکی - شیمیایی آن‌ها وابسته به اندازه آن‌هاست. بنابراین برای معرفی ذرات مهندسی شده از واژه نانوذرات و برای ذراتی که به طور تصادفی با ابعاد نانو تولید می‌شوند، از واژه اولترافاین استفاده می‌شود. [۲]

نانوذرات مهندسی شده تعمداً تولید می‌شوند اما ذرات اولترافاین (نانوذرات جانبی) معمولاً محصولات فرعی فرایندهایی مانند احتراق و تبخیر هستند. نانوذرات مهندسی شده با خصوصیات و ترکیبات (مانند شکل، اندازه، سطح و شیمیایی) خاصی طراحی می‌شوند. نانوذرات جانبی به شکلی تقریباً کنترل نشده، ایجاد و از لحاظ فیزیکی و شیمیایی

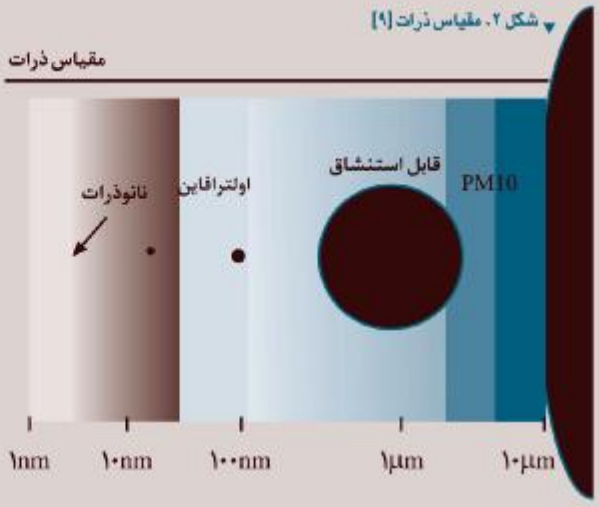
شکل ۱. تجسمی از ابعاد نانو



در مقایسه با نانوذرات مهندسی شده، ناهمگن هستند. [۲]

نانوذرات معلق (نانوآئروسل) عبارت است از مجموعه نانوذرات معلق در گاز. این ذرات ممکن است در قالب نانو اشیاء مجزا، توده و یا مجموعه (ترکیبی از چند نانواشیاء) ظاهر شوند. این مخلوط‌ها می‌توانند ابعادی بیش از ۱۰۰ نانومتر داشته باشد. در مواردی که آئروسل مشتمل بر ذراتی با قطر میکرومتر (یک میلیونیوم متر) است، تعریف آئروسل باید مورد تفسیر قرار گیرد. [۲]

شکل ۲. مقیاس ذرات [۹]



نانو - اولترافاین - کمتر از ۱۰۰ نانومتر (متداول)
نانو - کمتر از ۱۰ نانومتر (دارای عملکردهای خاص)
فاین = ۱۰۰ نانومتر تا ۳ میکرومتر
قابل استنشاق (در موش‌ها) = ۳ میکرومتر تا حداکثر ۵ میکرومتر
قابل استنشاق (در انسان‌ها) = ۵ الی ۱۰ میکرومتر

کاربردهای نانوفناوری

همان‌طور که گفته شد در نانوفناوری، با کوچک شدن اندازه مواد، در خصوصیات فیزیکی آن‌ها، تغییر ایجاد می‌شود. برای مثال در نانوذرات نسبت سطح به حجم افزایش چشم‌گیری می‌یابد. خصوصیات نوری آن‌ها مانند فلورسنس، تابعی از قطرشان می‌شود. زمانی که تعداد زیادی نانوذرات در توده‌های انبوه، در کنار هم قرار می‌گیرند، بر خصوصیات مکانیکی آن ماده مانند سختی یا الاستیسیته را تحت تاثیر قرار می‌دهند. مثلا پلیمرهای متداول در ابعاد نانوذرات به مواد جدیدی تبدیل می‌شوند که در عین سبکی، می‌توان آن‌ها را به عنوان جایگزینی برای فلزات به کار برد که خود می‌تواند نیازهای فراوانی را در جامعه مرتفع سازد. این مواد که با نانوفناوری بهینه‌سازی شده‌اند می‌توانند به‌رغم کاهش چشم‌گیر وزن، پایداری و استقامت بیشتری داشته باشند و به این ترتیب کاربری آن‌ها افزایش یابد. کاربردهای بسیاری برای نانوفناوری برشمرده شده که برخی از آن‌ها معرفی می‌شوند. [۲]

■ پزشکی

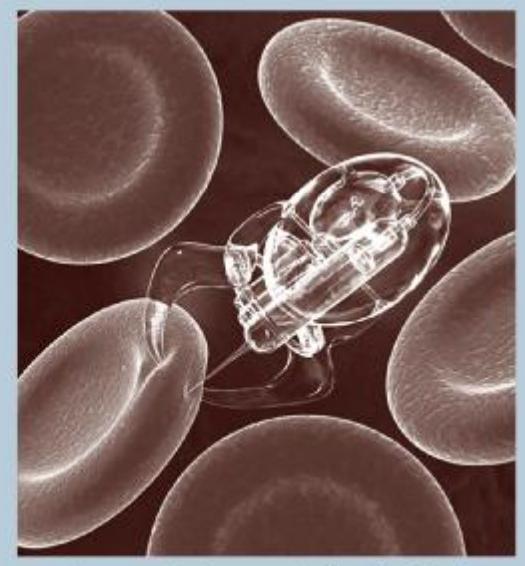
نانومواد در کاربردهای گوناگون در پژوهش‌های زیست‌شناختی و پزشکی به کار گرفته شده است. واژگانی مانند نانوبیوفناوری و نانوپزشکی معرف این موارد کاربرد هستند. همراه کردن نانومواد با مولکول‌ها و ساختارهای بیولوژیکی می‌تواند توانمندی آن‌ها را افزایش دهد.

اندازه نانومواد بسیار شبیه اغلب ساختارهای زیستی و مولکول‌ها است، بنابراین می‌توان از نانومواد هم در پژوهش‌ها و هم کاربردهای داخل اندام موجود زنده و خارج از آن (در آزمایشگاه) استفاده کرد. تاکنون همراه کردن نانومواد با زیست‌شناسی، به توسعه ابزارهای تشخیصی، ابزارهای تحلیلی و ابزارهای دارورسانی منجر شده است. [۳]

کاربردهای تشخیصی

تصویربرداری، نمونه‌برداری میکروسکوپی، ردیابی اختلالات مسیر تنفسی، انجام سریع‌تر، حساس‌تر و انعطاف‌پذیرتر

▼ شکل ۳. کاربردهای نانوفناوری در تشخیص پزشکی [۷]



وسیله‌ای میکروسکوپی که با ورود به جریان خون به وسیله تزریق می‌تواند برای نمونه‌گیری و ردیابی غلظت ترکیبات مختلف مورد استفاده قرار گیرد.

یک نانوربات استنشاق شده، می‌تواند تا اعماق ریه‌ها پیش برود و به سطح بافت بچسبد.

شکل ۴. کاربردهای درمانی نانوفناوری [۷]

نانوربات‌هایی با قابلیت کنترل از راه دور که برای جرم‌گیری دندان‌ها از آن‌ها استفاده می‌شود.

نانوابزارهای پزشکی می‌توانند باکتری‌ها و ویروس‌های ناخواسته را یافته و با ناتوان ساختن آن‌ها موجب تقویت سیستم ایمنی بدن شوند.

ویروس‌یاب

آزمایش‌های بیولوژیکی تشخیصی با استفاده از نانوربات‌ها و تراشه‌های نشان دار، نشان‌دار کردن مولکول‌ها، ساختارها و میکروارگانیزم‌ها با استفاده از نانوذرات مغناطیسی موجود در برخی پادتن‌ها، ردیابی توالی ژنتیکی نمونه‌ها با علامت‌گذاری بخش‌های کوتاهی از DNA با نانوذرات طلا و ... از کاربردهای نانوفناوری در تشخیص پزشکی به شمار می‌روند. [۳] و [۷]

کاربردهای درمانی

دارورسانی، کشتن باکتری‌ها، ویروس‌ها و سلول‌های سرطانی، ترمیم بافت‌های آسیب دیده، انتقال اکسیژن، مراقبت از پوست و دندان‌ها و تقویت سیستم ایمنی بدن برخی از کاربردهای درمانی نانوفناوری در پزشکی هستند. [۳] و [۷]

مهندسی بافت‌ها

از نانوفناوری می‌توان برای تولید مجدد یا ترمیم بافت‌های آسیب دیده، استفاده کرد. در این فرایند که "مهندسی بافت‌ها" نام دارد، با استفاده از نانوذرات و سایر فاکتورهای رشد، با تحریک سلول‌ها به تکثیر آن‌ها می‌پردازند. مهندسی بافت‌ها می‌تواند جایگزین درمان‌های معمول امروزی مانند قطع اعضاء و کاشت مصنوعی شود. نانوفناوری پیشرفته مبتنی بر مهندسی بافت‌ها می‌تواند به افزایش عمر منجر شود. [۳]

دارورسانی

میزان مصرف دارو و هم چنین اثرات جانبی آن را می‌توان با رساندن مستقیم دارو به منطقه آسیب دیده و به اندازه لازم، تا حد زیادی کاهش داد. این روند انتخابی و هدف‌دار می‌تواند هزینه و رنج انسانی را کاهش دهد. به عنوان مثال می‌توان با استفاده از پلیمری خاص[1]، مقدار کمی مولکول دارو را به محل موردنظر منتقل کرد. از کاربردهای بالقوه و مهم می‌توان به درمان سرطان با نانوذرات از جنس آهن یا طلا اشاره کرد.

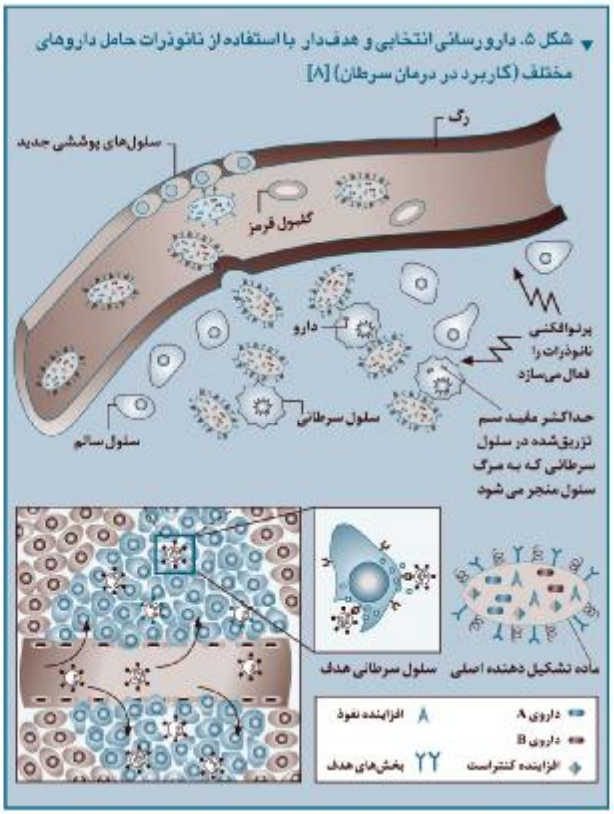
داروهای هدف‌دار، می‌تواند مصرف دارو و هزینه درمان را کاهش داده و صرفه‌جویی در بودجه عمومی را با کاهش هزینه درمانی افزایش دهد. [۳]

■ شیمی و محیط‌زیست

کاتالیست‌های شیمیایی و روش‌های فیلتراسیون، دو نمونه

1. Dendrimer, a copolymer with a regular branching structure attached to a central chain of carbon atoms

▼ شکل ۵. دارورسانی انتخابی و هدف‌دار با استفاده از نانوذرات حامل داروهای مختلف (کاربرد در درمان سرطان) [۸]



مهم از موارد نقش‌آفرینی نانوفناوری در این بخش است. نانوفناوری می‌تواند به تولید مواد جدید با خصوصیات شیمیایی جدید (مثلا نانوذرات با پوشش شیمیایی معین یا خصوصیات نوری خاص) منجر شود. از این دیدگاه، شیمی، علم پایه نانو است.

در کوتاه مدت شیمی می‌تواند به تولید "نانومواد" جدید منجر شود و در بلندمدت با معرفی فرآیندهای برتر مانند "خود ساختارسازی"، راهبردهایی برای صرفه‌جویی در انرژی و زمان ارائه می‌کند. [۳]

کاتالیست‌ها

به دلیل نسبت بالای سطح نانوذرات به حجم آن، از نانوذرات، به عنوان کاتالیست‌های شیمیایی استفاده می‌شود. کاربردهای بالقوه نانوذرات در کاتالیست‌ها از سلول‌های سوختی تا مبدل‌های کاتالیستی، متغیر است. کاتالیست‌ها در تولید مواد شیمیایی نیز اهمیت دارند. در حال حاضر استفاده از نانوذرات پلاتین در تولید نسل بعدی کاتالیست‌های مورد استفاده در خودروها مدنظر است، زیرا نسبت بالای سطح به حجم در این ذرات، می‌تواند میزان پلاتین مورد استفاده در آن‌ها را کاهش دهد. گرچه آزمایش‌ها، نگرانی‌هایی را در مورد ترکیب شدن متان با هوا و در نتیجه اشتعال یک باره نانوذرات دامن زده است. [۳]

فیلتراسیون

انتظار می‌رود نانوشیمی تأثیر به سزایی بر تصفیه آب و فاضلاب، پاک‌سازی هوا و تجهیزات ذخیره انرژی داشته باشد. برای رسیدن به تکنیک‌های مؤثر فیلتراسیون می‌توان از روش‌های مکانیکی یا شیمیایی استفاده کرد.

از نانوفیلتراسیون غالباً برای از بین بردن یون‌ها و جداسازی مایعات مختلف استفاده می‌شود. یکی از مهم‌ترین کاربردهای اولترافیلتراسیون در پزشکی است و نمونه آن در دیالیز کلیه دیده می‌شود. نانوذرات با استفاده از تکنیک‌های جداسازی مغناطیسی، روشی کارآمد و قابل اطمینان برای جدا کردن آلودگی‌های فلزی سنگین از فاضلاب به شمار می‌روند. استفاده از نانوذرات، اثربخشی دفع آلودگی‌ها را افزایش داده و در مقایسه با روش‌های قدیمی فیلتراسیون، ارزان است. در حال حاضر از نانوابزارها برای تصفیه آب استفاده می‌شود.

■ انرژی

موارد کاربرد نانوفناوری در زمینه انرژی عبارتند از: ذخیره‌سازی، تبدیل، بهینه‌سازی تولید از طریق کاهش مواد و کوتاه‌سازی فرایندها، صرفه‌جویی در مصرف انرژی (با بهینه‌سازی عایق‌بندی حرارتی) و بهینه‌سازی منابع انرژی‌های تجدیدپذیر. [۳]

کاهش مصرف انرژی

با استفاده از سیستم‌های بهینه عایق‌بندی، استفاده از سیستم‌های روشنایی یا اشتعال بهتر و نیز استفاده از مواد سبک‌تر و مستحکم‌تر در بخش حمل و نقل، می‌توان انتظار کاهش شدید میزان مصرف انرژی را داشت. [۳]

افزایش راندمان تولید انرژی

در حال حاضر بهترین سلول‌های آفتابی، نیمه‌هادی‌های مختلفی برای جذب انرژی‌های مختلف نور دارند، اما با این وجود بهترین آن‌ها تنها می‌توانند ۴۰ درصد انرژی آفتابی را جذب کنند. سلول‌های آفتابی که به صورت تجاری تولید می‌شوند حتی از این هم ضعیف‌تر هستند، یعنی می‌توانند ۱۵ تا ۲۰ درصد انرژی آفتاب را جذب کنند.

نانوفناوری می‌تواند با استفاده از نانوساختارها، به بهینه‌سازی جذب انرژی آفتاب کمک کند. در حال حاضر میزان بهره‌وری موتورهای درون‌سوز حدود ۳۰ تا ۴۰ درصد است. نانوفناوری می‌تواند با استفاده از کاتالیست‌های مخصوص با افزایش سطح، این اشتعال را بهینه سازد. [۳]

استفاده از سیستم‌های انرژی سازگارتر با محیط‌زیست

نمونه‌ای از این سیستم‌ها، استفاده از پیل‌های سوختی هیدروژنی است که در آن‌ها نیرو از منابع تجدیدپذیر انرژی تامین می‌شوند. مواد مناسب برای ذخیره‌سازی هیدروژن، موادی دارای تعداد بسیار زیادی خلل و فرج در ابعاد نانو هستند. بنابراین بسیاری از مواد با ساختار نانو مانند نانولوله‌ها و زئولیت‌ها با این هدف مورد مطالعه قرار گرفته‌اند.

نانوفناوری می‌تواند با استفاده از نانوفیلترهای دارای خلل و فرج، مبدل‌های کاتالیستی ساخته شده از نانوذرات فلزی و یا نانوذرات کاتالیستی که به عنوان افزودنی به سوخت اضافه می‌شوند و یا روی جداره سیلندر، لایه پوششی تشکیل می‌دهند، به کاهش آلودگی موتورهای سوختی و دود با پاک‌سازی دود خروجی به شیوه مکانیکی، کمک کند و مصرف سوخت را هم کاهش می‌دهد. [۳]

بازیافت باتری‌ها

به دلیل کمبود نسبی میزان انرژی در باتری‌ها، زمان کار آن‌ها محدود است، در نتیجه جایگزینی یا شارژ مجدد آن‌ها ضروری است. تعداد بسیار زیاد باتری‌های مصرف شده، دفع آن‌ها را مشکل ساخته است.

تولید باتری‌هایی با ظرفیت انرژی بالا یا باتری‌های قابل شارژ مجدد یا سوپرخازن‌ها با مدت زمان شارژ بالا با استفاده از نانومواد، می‌تواند برای حل مشکل محدوم کردن باتری‌ها مفید باشد. [۳]

■ اطلاعات و ارتباطات

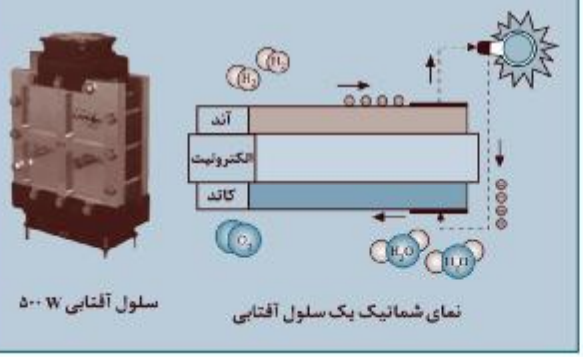
مصرف بهینه انرژی، سیستم‌های قدرتمند کامپیوتری و IT، سرعت بالا و ایمنی از دلایل توسعه نانوفناوری در صنعت اطلاعات و ارتباطات است.

حجم حافظه

طراحی حافظه‌های الکترونیکی در گذشته تا حد زیادی مبتنی بر نحوه تشکیل و ساخت ترانزیستورها بوده و پژوهش‌های صورت گرفته در مورد لوازم الکترونیکی و در نتیجه آن تغییر میان سیم‌کشی‌های عمودی و افقی، ایجاد حافظه‌هایی با ظرفیت بسیار بالا را میسر ساخته است.

از پیشگامان این روند می‌توان به نانترو[1] اشاره کرد که یک حافظه افقی - عمودی مبتنی بر نانولوله کربنی به نام Nano-RAM تولید کرده است. [۳]

شکل ۶. سلول آفتابی. سلول‌های آفتابی از هیدروژن و هوا استفاده می‌کند و به عنوان محصول فرعی آب تولید می‌کند. در نانوفناوری از غشاء نانومواد در این سلول‌ها استفاده شده و برق تولید می‌شود.



سلول آفتابی ۵۰۰ W

نمای شماتیک یک سلول آفتابی

1. Nantero

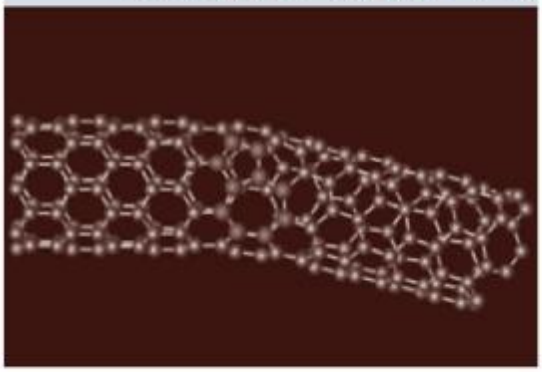
ابزارهای نوری- الکترونیکی جدید

در فناوری ارتباطات مدرن، ابزارهای آنالوگ الکتریکی سنتی جای خود را به ابزارهای نوری - الکترونیکی می‌دهند و دلیل آن نیز طول موج و ظرفیت بسیار بالای این ابزارها است. [۳]

نمایشگرها

با استفاده از نانولوله‌های کربن می‌توان نمایشگرهایی با حداقل مصرف انرژی تولید کرد. نانولوله‌های کربن، رسانای الکتریکی بوده و به دلیل قطر کوچک در حدود چند نانومتر، می‌توان از آن‌ها در نمایشگرها استفاده کرد. [۳]

شکل ۷. نانوتیوب کربن - ۵۰،۰۰۰ بار از مو نازک‌تر [۹]



کامپیوترهای کوآنتومی

با استفاده از قوانین مکانیک کوانتوم، کامپیوترهای کاملاً جدید کوانتومی، تولید می‌شود. کامپیوترهای کوانتومی دارای حافظه با بیت‌های کوانتوم موسوم به کیوبیت[1] هستند که می‌توانند چندین محاسبه را هم زمان انجام دهند. [۳]

■ صنایع سنگین

یکی از کاربردهای اجتناب‌ناپذیر نانوفناوری در صنایع سنگین است. [۳]

هوافضا

استفاده از مواد سبک‌تر و مستحکم‌تر در تولید هواپیماها و به ویژه فضاپیماها که وزن عامل مهمی در آن‌ها محسوب می‌شود به بهبود عملکرد آن‌ها منجر می‌شود. نانوفناوری می‌تواند به کاهش اندازه این تجهیزات و در نتیجه کاهش مصرف سوخت لازم برای پرتاب آن‌ها کمک کند. [۳]

ساخت و ساز

نانوفناوری، ساخت و ساز را سریع‌تر، ارزان‌تر، ایمن‌تر و متنوع‌تر می‌سازد. روند ساخت و ساز مبتنی بر نانوفناوری، امکان ایجاد ساختمان‌ها از خانه‌های پیشرفته گرفته تا آسمان خراش‌های بزرگ را در مدت زمان کمتر و ارزان‌تر، فراهم می‌کند. [۳]

پالایشگاه‌ها

با استفاده از کاربردهای نانوفناوری، می‌توان ناخالصی‌های مواد تولیدی پالایشگاه‌های تولیدکننده فولاد و آلومینیوم را از بین برد.

خودروسازی

مانند هوافضا، می‌توان از مواد سبک‌تر و قوی‌تر برای تولید خودروهای سبک‌تر و تندروتر استفاده کرد. موتورهای سوختی نیز مجهز به قطعاتی با پوشش سخت‌تر و مقاومت بیشتر در برابر حرارت می‌شوند. [۳]

■ کالاهای مصرفی

نانوفناوری هم اکنون نیز با معرفی محصولاتی با عملکردهای جدید از تسهیل نظافت تا مقاومت در برابر کشیدگی در زمینه کالاهای مصرفی تأثیر گذارده است.

پارچه‌های جدید در برابر چروک و لکه‌ها مقاوم هستند. بزودی، با افزودن "مواد الکترونیکی قابل پوشش" پارچه‌ها هوشمند خواهند شد. در حال حاضر نیز کالاهای بسیاری مصرف می‌شوند که با استفاده از نانوذرات بهینه‌سازی شده‌اند، لوازم آرایشی از آن جمله‌اند. [۳]

1. qubit

غذاها

نانوفناوری در تولید، عمل‌آوری، ایمن‌سازی و بسته‌بندی غذاها کاربرد دارد. با استفاده از فرایند بسته‌بندی نانوکامپوزیتی و افزودن مواد ضدباکتری در سطح بسته‌بندی‌ها، می‌توان فرایند بسته‌بندی را بهبود بخشید. نانوکامپوزیت‌ها می‌توانند علاوه بر کم و زیاد کردن میزان نفوذپذیری مواد در برابر گاز براساس میزان نیاز برای تولید محصولات متفاوت، خصوصیات مکانیکی و مقاومت در برابر حرارت و نیز نرخ عبور اکسیژن را در این موارد، بهینه‌سازی کنند. پژوهش‌ها برای استفاده از نانوفناوری در به کارگیری مواد شیمیایی و زیستی به منظور ایجاد تغییرات بیوشیمیایی ادامه دارد.

خانه داری

مهم‌ترین کاربرد نانوفناوری در خانه‌داری استفاده از سطوح "ساده تمیز شونده" یا "خودتمیزکننده" در سرامیک‌ها یا شیشه‌ها است. نانوذرات سرامیک توانسته‌اند میزان مقاومت و صیقل بودن در برابر حرارت تجهیزات خانگی معمول مانند اتو را افزایش دهند.

نساجی

با استفاده از نانوفیبرهای مهندسی شده، تولید منسوجات ضد چروک، ضد آب و ضد لک میسر شده است. منسوجات پردازش شده با نانوفناوری را می‌توان به دفعات کمتر و در دمای پائین‌تر شست. [۳]

نوری

اولین عینک‌های آفتابی که در آن‌ها از پوشش‌های پلیمری فوق نازک ضدانعکاس استفاده شده است، در حال حاضر به بازار عرضه شده‌اند.

در کاربردهای نوری، نانوفناوری می‌تواند به ایجاد سطوح ضدخش با استفاده از نانوکامپوزیت‌ها کمک کند. نانواپتیک می‌تواند امکان افزایش انجام دقیق‌تر جراحی مردمک و جراحی لیزری چشم را نیز افزایش دهد.

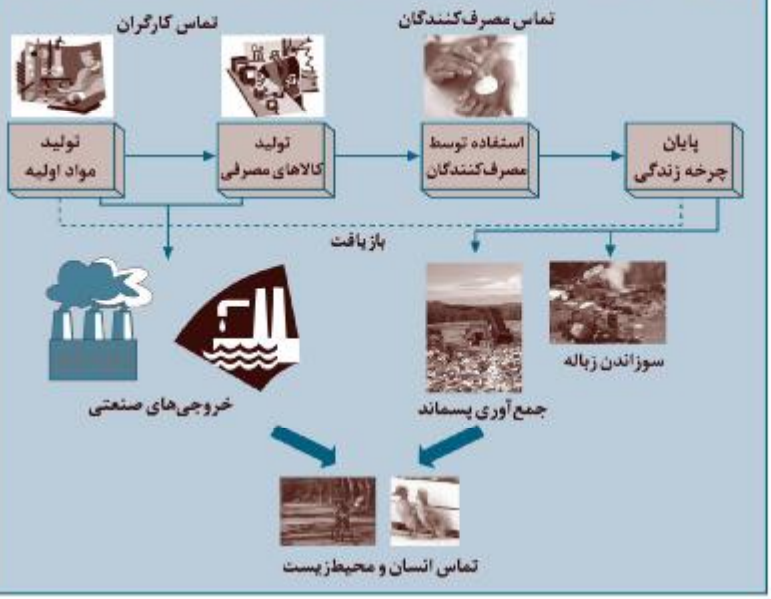
لوازم آرایشی

یکی از رایج‌ترین کاربردهای نانوفناوری در تولید کرم‌های آرایشی و بهداشتی است. ضعف مواد شیمیایی قدیمی از جهت حفاظت در برابر اشعه UV موجب کاهش اثر آن‌ها است. کرم‌های تولیدشده با نانوذرات مواد معدنی مانند دی‌اکسیدتیتانیوم دارای خاصیت ضد ماوراء بنفش هستند. با کوچک‌تر شدن ابعاد ذرات، اثر سفیدکنندگی ناخواسته لوازم آرایشی نیز کاسته می‌شود. [۳]

خطرهای احتمالی برای محیط زیست، سلامت و ایمنی

انسان و محیط‌زیست در مراحل مختلف چرخه زندگی محصول در معرض نانومواد قرار می‌گیرند. (شکل ۸). بنابراین در ارزیابی خطرهای احتمالی باید کل چرخه زندگی نانومواد شامل تولید، انبارش، توزیع، مصرف و دفع آن‌ها مدنظر قرار گیرد.

شکل ۸. مقاطع مختلف تماس انسان و محیط‌زیست با نانومواد در مراحل مختلف چرخه زندگی محصول [۸]



■ خطرهای احتمالی برای محیط‌زیست

پژوهش درباره رفتار نانوذرات در محیط زیست، بسیار محدود بوده است. فرض بر آن است که نانوذرات به راحتی در هوا منتشر می‌شوند، مگر آن که با سایر اجزاء موجود در هوا واکنش دهند. باید مشخص شود آیا نانو ذرات یک ماده شیمیایی خاص، تنها به واسطه اندازه، سطح و میزان پراکندگی رفتاری متفاوت با سایر اشکال فیزیکی و شیمیایی آن ماده، در محیط زیست خواهند داشت یا خیر. هم چنین باید مشخص شود آیا نانوذرات در مقایسه با ذرات بزرگ‌تر، ماندگاری بیشتری در محیط زیست دارند یا خیر. روند توزیع نانوذرات در هوا، آب و خاک و نیز پتانسیل ماندگاری و بیوانباشت نانوذرات در محیط زیست، از ملاحظات مهم زیست‌محیطی به شمار می روند. در ارزیابی خطرهای احتمالی زیست‌محیطی موضوعات زیر باید بررسی و مشخص شوند:

- شناسایی و کمی سازی میزان تماس محیط زیست با نانوذرات؛
- تعیین الگوهای انتشار نانوذرات در محیط زیست و مقدار آن، روش‌های توزیع (شامل انتقال و تجمع) و سرنوشت (از جمله ماندگاری) این ذرات در بخش‌های مختلف محیط زیست؛
- تعیین غلظت نانوذرات براساس سطح و تعداد در محیط زیست
- بررسی احتمال بیوانباشت در گونه‌های آبزی یا خاکزی و نیز احتمال رشد آن‌ها در بخش‌های مختلف محیط زیست.

■ خطرهای احتمالی برای سلامت

نانوفناوری حوزه‌ای در حال رشد است، بنابراین ابهام‌های زیادی درباره خطرهای احتمالی که نانوذرات مهندسی‌شده ممکن است برای سلامت ایجاد کنند، وجود دارد. این ابهامات، محصول خلاءهای اطلاعاتی لازم (مانند راه‌های تماس، نحوه جایگزینی این ذرات در صورت ورود به بدن و تعامل این مواد با سیستم بیولوژیکی بدن) برای پیش‌بینی خطرهای احتمالی برای سلامت است. خطرهای بالقوه برای سلامت در اثر تماس با این ذرات، به میزان و مدت تماس، بقای این مواد در بدن، ماهیت سمی این مواد و میزان آسیب‌پذیری یا سلامت فرد بستگی دارد. هنوز به اطلاعات بیشتری درباره خطرهای تماس با نانوذرات، نیاز است. پژوهش‌های انجام شده روی حیوانات و انسان‌ها، درباره تأثیر مواد اولترافاین و یا قابل استنشاق، ارزیابی اولیه درباره اثرات منفی تماس با مواد (مهندسی شده با ابعاد نانو) مشابه را امکان‌پذیر ساخته است. [۲]

راه‌های تماس

استنشاق: رایج‌ترین راه تماس با ذرات معلق در هوا در محل کار است. نانوذرات بیش از ذرات بزرگ‌تر استنشاق می‌شوند و در ریه‌ها باقی می‌مانند[1] و این مسئله می‌تواند به تدریج موجب افزایش دفعات تنفس و یا تنفس از راه دهان به جای بینی شود[2] و وضعیت افراد دارای بیماری‌های تنفسی مانند آسم را حادتر کند[3]. براساس مطالعات حیوانی، نانوذرات از طریق ریه‌ها وارد جریان خون شده، سپس به سایر اعضاء بدن منتقل می‌شوند[4].

نانوذرات (با میانگین قطر ۳۵ تا ۳۷ نانومتر) که در منطقه بینی مستقر شوند شاید بتوانند از طریق اعصاب بویایی وارد مغز شوند، این مسئله‌ای است که در موش‌ها مشاهده شده است[5]. انتقال ذرات نامحلول با قطر ۲۰ الی ۵۰۰ نانومتر به مغز، از طریق اعصاب حسی (از جمله بویایی) در مطالعات صورت گرفته بر روی حیوانات، گزارش شده است[6]. این راه تماس با نانوذرات و تأثیر آن بر اعضاء، هنوز در انسان‌ها مطالعه نشده است. [۲]

پوست: برخی مطالعات نشان می‌دهد ورود نانوذرات از راه پوست، یکی دیگر از راه‌های تماس شغلی است. در حال حاضر، اثر منفی نفوذ نانوذرات از راه پوست در حیوانات هنوز مشخص نیست. [۲]

1. ICRP 1992
2. Jaques and Kim 200; Daigle et al. 2003
3. Brown et al. 2002
4. Takenaka et al. 2001; Nemmar et al. 2002; Oberdörster et al. 2002
5. Oberdörster et al. 2004; Oberdörster et al. 2005a; Elder et al. 2006
6. De Lorenzo 1970; Adams and Bray 1983; Hunter and Dey 1998

بلعیدن این ذرات می‌تواند نتیجه انتقال ناخواسته آن‌ها از طریق دست به دهان باشد؛ وقوع این مسئله به صورت علمی درباره ذرات معمولی نشان داده شده است، بنابراین می‌توان فرض کرد همین مسئله درباره نانوذرات نیز رخ می‌دهد. بلعیده شدن می‌تواند نتیجه نهایی استنشاق نانوذرات نیز باشد، زیرا ذرات پاک‌شده از ریه‌ها به وسیله حرکت مخاطی، احتمالاً بلعیده می‌شوند[1]. اطلاعات چندانی درباره تاثیرات منفی بلعیده شدن نانوذرات در دست نیست. [۲]

اثرات مشاهده شده در حیوانات

مطالعات تجربی روی موش‌ها نشان می‌دهد مقدارهای یکسان ذرات اولترافاین نامحلول، بیش از ذرات بزرگ‌تر همان ماده می‌تواند در ایجاد التهاب ریوی، صدمات بافتی و تومورهای ریوی مؤثر باشد[2]. این مطالعات نشان داده است که واکنش بدن در برابر مقدار دریافتی ذرات با حلالیت و سمیت پائین[3]، ارتباط مستقیمی با اندازه و سطح ذارت دارد. علاوه بر اندازه و سطح ذرات، پژوهش‌ها نشان داده است سایر خصوصیات ذرات نیز می‌تواند بر میزان سمی بودن آن‌ها تأثیر گذارد. نتایج پژوهش‌ها نشان می‌دهد سمی بودن مقدار معینی از نانوذرات با خصوصیات مشابه، با کاهش اندازه ذرات و افزایش سطح آن‌ها، افزایش می‌یابد. اگر چه ممکن است رابطه مقدار - واکنش، بسته به ترکیب شیمیایی و دیگر خصوصیات ذرات، تغییر کند. [۲]

یافته‌های پژوهش‌های همه‌گیرشناسی درباره ذرات اولترا فاین

نتایج پژوهش‌های همه‌گیرشناسی درباره کارگرانی که با ذرات اولترافاین معلق در هوا تماس داشته‌اند، نشان‌دهنده تضعیف عملکرد ریه‌ها، اثرات نامطلوب بر تنفس، بیماری‌های حاد ریوی و فیبروز[4] است.

برخی پژوهش‌ها نشان می‌دهند که کارگرانی که با برخی ذرات اولترافاین (مانند دود حاصل از جوش کاری) تماس داشته‌اند مبتلا به بیماری‌های ریوی از جمله سرطان ریه و نیز بیمای‌های عصبی شده‌اند[5]. میزان پیچیدگی‌های این پژوهش‌ها درباره نانوذرات مهندسی‌شده که ممکن است خصوصیات متفاوتی نیز داشته باشند، هنوز مشخص نیست. [۲]

پژوهش درباره ذرات معلق در هوا و فیبرها در محل کار، اطلاعات پایه‌ای درخصوص بیماری‌های ریوی ناشی از تماس با ذرات و مکانیزم آن‌ها و نیز ارزیابی کمی (هرچند محدود) خطرهای ناشی از تماس با این ذرات، فراهم می‌آورد. به این ترتیب نتایج این پژوهش‌ها، منجر به تدوین مرجعی شامل اطلاعات پایه و معیاری برای ارزیابی این خطرها بسته به میزان شباهت بیولوژیکی و شرایط تماس با آن‌ها می‌شود.

پژوهش‌های همه‌گیرشناسی نیز نشان می‌دهند که میان بیماری‌های ریوی و قلبی - عروقی در صورت قرار گرفتن در معرض آلودگی هوا ارتباط وجود دارد[6]. نقطه مشترک در این پژوهش‌ها، اندازه‌گیری تعداد ذرات یا غلظت توده‌ای از نانوذرات با اندازه‌های معین است (به عنوان مثال توده‌ای از نانوذرات با قطر ۲/۵ میکرومتر یا کمتر). [۲]

فرضیات ناشی از پژوهش‌های حیوانی و همه‌گیرشناسی

منابع موجود درباره ذرات و فیبرها، بنیانی علمی برای ارزیابی خطرات بالقوه نانومواد مهندسی‌شده، فراهم می‌آورد. با آن که خصوصیات نانومواد مهندسی‌شده می‌تواند بسیار متفاوت باشد،

1. ICRP 1994
2. Lee et al. 1985; Oberdörster and Yu 1990; Oberdörster et al. 1992, 1994 a,b; Heinrich et al. 1995; Driscoll 1996; Lison et al.1997; Tran et al.1999,2000; Brown et al.2001; Duffin et al.2002; Renwick et al.2004; Barlow et al.2005
3. Poorly-Soluble Low Toxicity (PSLT)
4. Kreiss et al. 1997; Gardiner et al. 2001; Antonini 2003
5. Antonini 2003; Park et al.2006; Ambroise et al.2007; Bowler et al. 2007
6. Dockery et al.1993; HEI 2000; Pope et al. 2002, 2004

اصول فیزیک- شیمی و سم‌شناسی گردآوری شده از مطالعات موجود می‌تواند ما را در درک احتمال سمی بودن نانومواد یاری کند. نتایج پژوهش‌های انجام شده روی حیوانات آزمایشگاهی و مطالعات همه‌گیرشناسی به فرضیاتی درباره اثرات بالقوه منفی نانومواد مهندسی‌شده، منجر شده است. این فرضیات مبتنی بر منابع علمی درباره تماس انسان و حیوانات با نانوذرات است. [۲]

فرضیه ۱: تماس با نانوذرات مهندسی‌شده، احتمالاً می‌تواند اثرات منفی مشابه تماس با ذرات اولترافاین با خصوصیات فیزیکی و شیمیایی یکسان داشته باشد.

فرضیه ۲: مساحت سطح، فعالیت و تعداد ذرات، پارامترهای بهتری برای پیش‌بینی خطرات بالقوه نانوذرات در مقایسه با پارامتر جرم هستند.

■ ملاحظات بالقوه ایمنی

به جز اطلاعات مربوط به خصوصیات مواد رایج و خطرهای مرتبط با ایمنی آن‌ها، اطلاعات چندانی درباره این خطرهای نانومواد مهندسی‌شده (با همان خصوصیات) در دست نیست. براساس اطلاعات موجود، در صورتی که نانومواد، رفتاری مشابه با مواد رایج داشته باشند، خطرات بالقوه ایمنی این مواد، شامل اثرات کاتالیستی و یا خطر انفجار و آتش‌سوزی خواهد بود. [۲]

خطر انفجار و آتش‌سوزی

گرچه اطلاعات کافی برای پیش‌بینی خطر آتش‌سوزی و انفجار در پودرهای نانوابعاد وجود ندارد، اما می‌توان گفت مواد قابل اشتعال در ابعاد نانو در مقایسه با مواد سخت‌تر، در مقدار مشابه، می‌توانند خطرهای بیشتری ایجاد کنند[1].

کاهش اندازه مواد قابل اشتعال، موجب افزایش توان اشتعال آن‌ها شده و این احتمال وجود دارد که مواد ذاتاً غیرفعال، در اندازه‌های نانو بسیار واکنش‌پذیر شوند. [۲]

پراکندگی نانومواد قابل اشتعال در هوا در مقایسه با مواد غیر نانو با همان ترکیب، ممکن است خطرهای بیشتری درپی داشته باشد. برخی نانومواد برای ایجاد گرما در زنجیره واکنش‌های شیمیایی در ابعاد نانو، طراحی شده‌اند. چنین موادی می‌تواند خطر آتش‌سوزی درپی داشته باشند. در برخی فلزات، احتمال انفجار با کاهش اندازه ذرات، به طور چشم‌گیری افزایش می‌یابد. [۲]

خطر واکنش‌های کاتالیستی

ذرات نانوابعاد و مواد نفوذپذیر دارای ساختار نانو، کاتالیست‌های مؤثری برای افزایش میزان و سرعت واکنش‌ها یا کاهش دمای لازم برای واکنش در حالت مایع یا گاز به شمار می‌روند. برخی نانومواد بسته به ترکیب و ساختار می‌توانند آغازگر واکنش‌های کاتالیستی باشند. [۲]

◄◄ ارزیابی و تعیین شرایط تماس

در حال حاضر، استاندارد مورد توافق جهانی، در مورد روش‌های اندازه‌گیری نانوذرات در محل کار وجود ندارد. اگر ارزیابی کیفی فرایندی، منجر به شناسایی نقاط یا حدود تماس شده و به تصمیم‌گیری در مورد میزان نانومواد رهنمون شود، در این صورت باید چند نکته را به ذهن سپارد: [۲]

- ترکیب شیمیایی مواد با اندازه بزرگ‌تر، نسبت به سطح و فعالیت شیمیایی مواد با ساختار نانو (با همان ترکیب شیمیایی) از اهمیت کم‌تری برخوردار است[2].
- در حال حاضر پژوهش‌ها درباره اهمیت نسبی معیارهای مختلف و توصیف شرایط تماس با نانومواد ادامه دارد و معیارهای جدیدتری معرفی خواهد شد.

شکل و خصوصیات ویژه برخی نانومواد، چالش‌های بیشتری را ایجاد می‌کند. به طور مثال روش‌هایی که برای اندازه‌گیری غلظت فیبرها در محل کار به کار گرفته می‌شود، نمی‌تواند نانولوله‌های کربن منفرد با قطر کمتر از ۱۰۰ نانومتر یا مجموعه نانولوله‌های کربن با قطر کمتر از ۲۵۰ نانومتر را شناسایی کند[3].

1. HSE 2004
2. Oberdörster et al. 1992, 1994a,b; Duffin et al. 2002
3. Donaldson et al. 2006

■ تماس با نانوذرات در محل کار

درحالی که پژوهش‌ها درباره موضوع سمی بودن نانومواد ادامه دارد، برخی رویکردهای ارزیابی تماس به منظور تعیین تماس با نانومواد معلق در هوا می‌توانند مورد استفاده قرار گیرد. این اندازه‌گیری‌ها را می‌توان با روش‌های سنتی نمونه‌برداری بهداشت صنعتی، شامل نمونه‌برداری محیطی (دستگاه‌های نمونه‌برداری نصب شده در مکان‌های ثابت)، نمونه‌گیری فردی (نمونه‌های گرفته شده از محل تنفس کارگران) و اندازه‌گیری مستقیم (زمان واقعی)[1] با استفاده از ابزارها یا روش‌هایی است که می‌تواند فردی یا ثابت باشد، انجام داد. بسیاری از تکنیک‌های نمونه‌برداری موجود برای اندازه‌گیری نانوذرات معلق در هوا از نظر پیچیدگی متفاوتند، اما می‌توانند بر اساس اندازه، حجم، سطح، غلظت، ترکیب و ساختار شیمیایی سطح ذرات، اطلاعات مهمی درباره میزان تماس مجاز با نانوذرات فراهم آورند. متأسفانه تعداد کمی از این روش‌ها اکنون برای پایش میزان مجاز تماس، کاربرد دارند.

در این بخش، روش‌های اندازه‌گیری موجود به همراه موارد کاربرد آن‌ها برای پایش نانوذرات معلق آورده شده است. برای هرکدام از روش‌های اندازه‌گیری مورد استفاده، پارامترهای کلیدی آن و روش نمونه‌برداری هنگام ارزیابی میزان مجاز تماس با نانوذرات معلق، آورده شده است. این ارزیابی شامل ثبت محدوده واکنش هنگام تنظیم دستگاه‌های کنترل (فردی یا ثابت) و محل بالقوه کلیه منابع ذرات معلق از جمله نانوذرات معلق در محیط می‌شود. مستندسازی جامع، مقایسه نتایج به دست آمده از روش‌های مختلف، اندازه‌گیری میزان تماس را تسهیل کرده که این امر، تفسیر مجدد داده‌های قبلی را در کنار کسب اطلاعات جدید میسر می‌سازد.

صرف نظر از روش و مقیاس پایش تماس، بسیار مهم است که این اندازه‌گیری‌ها، پیش از تولید یا پردازش نانومواد صورت گیرد تا میزان نانوذرات زمینه، تعیین شود. در این صورت براساس اندازه‌گیری‌های انجام شده هنگام تولید یا پردازش نانومواد، می‌توان ارزیابی کرد که آیا تعداد و غلظت ذرات در مقایسه با ذرات زمینه، تغییر کرده است یا نه و آیا این تغییر، نشان‌دهنده میزان تماس کارگران با نانومواد است یا خیر. [۲]

اندازه‌گیری نانوذرات معلق براساس اندازه

پژوهش‌ها نشان می‌دهد اندازه ذرات، به دلایل زیر، نقش مؤثری در تعیین اثرات بالقوه منفی نانومواد بر سیستم تنفسی دارد: [۲]

- تأثیر بر ماهیت فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی ماده
- تأثیر بر سطح منطقه‌ای که ذرات روی آن قرار گرفته‌اند
- توانمندسازی ذرات برای انتقال به سایر اعضا، بدن

نتایج مطالعات انجام شده روی حیوانات، حاکی از آن است که میزان سمی بودن نانوذرات استنشاق شده در مقایسه با ذرات معلق در اندازه‌های مختلف، بیشتر ناشی از سطح و تعداد ذرات است تا با غلظت این مواد. [۲]

اندازه‌گیری مستقیم (زمان واقعی) ذرات معلق

امکان اندازه‌گیری مستقیم (زمان واقعی) غلظت نانوذرات معلق با توجه به حساسیت ابزار مورد استفاده در برابر تشخیص ذرات بسیار کوچک، محدود است. بسیاری از پایشگرهای (ابزارهای مورد استفاده برای پایش) مستقیم، متکی به شکست نور در اثر برخورد با انبوه ذرات (فوتومترها) است. این روش غالباً در برابر ذرات کوچک‌تر از ۱۰۰ نانومتر، غیرحساس است. [۲]

اندازه‌گیری سطح

روش‌های موجود برای پایش میزان تماس با ذرات معلق براساس سطح آن‌ها، بسیار محدود است. سطح هر ذره شامل سطح داخلی متشکل از سوراخ‌ها (حفره‌ها بیشتر گود هستند تا عریض)، سطح خارجی که عامل صیقلی بودن ذره است (حفره‌ها بیشتر عریض‌اند تا گود) و کل سطح (سطح قابل دسترس مشتمل بر تمامی سطوح واقعی یک ذره) می‌شود. [۲]

اندازه‌گیری غلظت ذرات براساس تعداد

نتایج برخی پژوهش‌های انجام شده بر روی انسان‌ها حاکی از آن است که غلظت ذرات با واکنش‌های منفی بدن انسان به آلودگی هوا، ارتباط مستقیم دارد[2] حال آن که در مطالعات سم‌شناسی،

1. Real Time
2. Timonen et al. 2004; Ruckerl et al. 2005

سطح ذرات نسبت به عوامل: تعداد، مقدار جرم یا حجم ذرات، معیار بهتری به شمار می‌روند[1]. در بررسی سرطان ریه در موش‌ها مشخص شد مقیاس دو متغیری شامل اندازه و حجم انواع ذرات، معیار پیش‌بینی‌کننده بهتری به شمار می‌رود[2]. این مسئله تا حدی پیچیدگی تفسیر اطلاعات موجود درباره مقیاس حد مجاز ذرات و واکنش‌های ناشی از آن‌ها را نشان می‌دهد. گرچه سطح ذرات بیشترین تأثیر منفی را بر سلامتی دارد، اما ظاهراً تعداد ذرات رسوخ کرده در سیستم تنفسی یا سایر اعضاء بدن نیز نقش مهمی ایفا می‌کند. [۲]

تخمین سطح

از اطلاعات مربوط به رابطه روش‌های متفاوت اندازه‌گیری، می‌توان برای تخمین سطح ذرات استفاده کرد. اگر گستره‌ی بزرگی اندازه سطح یک ذره معلق ثابت باشد، در این صورت رابطه میان تعداد ذرات، سطح و جرم نیز ثابت خواهد بود. به ویژه می‌توان از اندازه‌گیری غلظت براساس جرم، برای تعیین غلظت براساس سطح استفاده کرد، به شرط آن که ثابت نسبت آن را معلوم فرض کنیم. این مقدار را ثابت ویژه سطح می‌نامند (نسبت سطح به جرم).

نقشه‌برداری غلظت براساس تعداد

بعضی پژوهشگران برای درک بهتر منبع ذرات و انتقال آلودگی آن، از روش نقشه‌برداری ذرات معلق با اندازه‌گیری جرم قابل استنشاق، تعداد ذرات اولترافاین و غلظت براساس سطح فعال آن‌ها، در کارخانه‌های تولید خودرو استفاده کرده‌اند[3]. این فرآیند مبتنی بر نصب ابزارهای متحرک نمونه‌برداری ذرات معلق برای اندازه‌گیری هم زمان در مکان‌های از پیش تعیین‌شده در کارخانه است. در این روش اندازه‌گیری‌های متعددی انجام می‌شود، که می‌تواند در تعیین منبع آلودگی و روند انتقال آن بسیار مفید باشد. این روش مبتنی بر اندازه‌گیری‌های متوالی در مکان‌های متفاوت است و در نتیجه در کارخانه‌هایی با فرآیندهای پیوسته یا مکان‌هایی که در آن‌ها ذرات، با غلظت ثابت بر اساس تعداد، تولید می‌شوند، کاربرد دارد. این رویکرد در کارخانه‌هایی با فرآیندهای بسته یا مکان‌هایی که در آن‌ها، تغییرات سریع غلظت رخ می‌دهد، کارایی کمتری دارد. [۲]

راهبرد نمونه برداری

در حال حاضر هیچ روش نمونه‌برداری وجود ندارد که به تنهایی بتواند تعیین‌کننده میزان تماس با نانو ذرات معلق باشد، لذا هر کوششی که در پی توصیف میزان تماس با نانومواد در محل کار باشد، باید شامل تعدادی از روش‌های نمونه‌برداری تشریح شده در بالا باشد. [۲]

راهنمای کار با نانوذرات مهندسی‌شده

نانوذرات مهندسی‌شده از نظر ماهیت فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی با هم متفاوتند. فرآیندهای مورد استفاده در پژوهش، ایجاد ترکیبات جدید مواد، تولید، استفاده یا معرفی نانومواد به مصرف‌کنندگان، متنوع بوده و هنوز پتانسیل تغییر دارند. تا زمانی که اطلاعات بیشتری درباره ریسک‌های محتمل سلامتی و میزان تماس شغلی با نانومواد فراهم نشده است، باید اقدامات حفاظتی، ایجاد و اجرا شوند. [۲]

پیشنهادهای زیر برای کمک به ارزیابی و کنترل میزان تماس با نانومواد مهندسی‌شده در محل کار ارائه شده است. استفاده از رویکرد خطرآفرین، برای ارزیابی میزان تماس به منظور طراحی اقدامت احتیاطی و بهینه‌سازی اقدامات ایمنی و سلامتی، منطقی به نظر می‌رسد[4]. [۲]

■ امکان تماس شغلی

اطلاعات اندازه‌گیری محدودی درباره تماس با نانومواد که آگاهانه تولید شده و حاصل تصادفی فرآیندهای صنعتی نیستند،

1. Oberdörster and Yu 1990; Tran et al.1999; Duffin et al.2002
2. Borm et al.2004; Pott and Roller 2005
3. Peters et al. 2006; Heitbrink et al. 2007, 2008; Evans et al. 2008
4. The Royal Society and the Royal Academy of Engineering 2004; Schulte et al. 2008

موجود است. به طور کلی این احتمال وجود دارد که احتمال نشست نانومواد در فرآیندهای تولید نانومواد به شکل گاز (پس از خارج کردن نانومواد از سیستم‌های بسته تولید) یا سیستم‌های استفاده‌کننده یا تولیدکننده نانومواد به شکل پودر/مایع/یا محلول، بیشتر از سایر موارد باشد. به علاوه تعمیر و نگه‌داری سیستم‌های تولید (شامل تمیز کردن و دفع مواد از سیستم‌های جمع‌آوری غبار) هم می‌تواند به تماس با نانومواد منجر شود. هم‌چنین امکان تماس با پسماندهای حاوی نانومواد وجود دارد. میزان تماس با نانومواد هنگام کار با نانوپودرها به احتمال انتشار این ذرات از پودرها بستگی دارد. [۲]

■ عوامل مؤثر بر تماس با نانومواد

عوامل مؤثر بر تماس با نانومواد مهندسی‌شده، شامل مقدار ماده مورد استفاده، احتمال انتشار آن (در مورد پودرها)، شکل آن‌ها مانند اسپری و یا قطرات معلق در هوا (در مورد محلول‌ها) می‌شود. میزان آلودگی و مدت استفاده نیز می‌توانند مؤثر باشند. درباره مواد معلق در هوا، اندازه ذرات یا قطرات، تعیین کننده احتمال ورود به سیستم تنفسی است. ذرات قابل استنشاق، ذراتی با ابعاد کمتر از ۱۰ میکرومتر هستند که می‌توانند وارد ریه‌ها شده و مستقر شوند[1]. براساس عواملی مانند میزان تنفس و اندازه ذرات، احتمال استقرار ذرات استنشاق شده در مجاری تنفسی بین ۳۰ تا ۹۰ درصد است. [۲]

حدود ۵۰ درصد نانوذرات با ابعاد ۱۰ تا ۱۰۰ نانومتر در حفره‌های ریه‌ها مستقر می‌شوند، در حالی که ذرات کوچک‌تر از ۱۰ نانومتر در بالای قفسه سینه جای می‌گیرند[2]. [۲]

در حال حاضر اطلاعات کافی برای پیش‌بینی تمام حالات و سناریوهای تماس با نانومواد در محل کار وجود ندارد. البته برخی عوامل در محیط کار (به شرح زیر)، احتمال تماس با نانومواد را افزایش می‌دهد: [۵]

- کار با نانومواد مایع بدون استفاده از تجهیزات حفاظتی فردی مناسب (مانند دست‌کش)؛
- تولید نانومواد در حالت گازی و در سیستم‌های باز؛
- کار با نانومواد مایع هنگام ریختن، ترکیب کردن و حالت‌هایی که تلاطم مایع زیاد است؛
- کار با پودر مواد دارای ساختار نانو (مانند توزین، پاشیدن، مخلوط کردن، اسپری زدن)؛
- نگه‌داری تجهیزات و فرایندهایی که برای تولید یا ترکیب نانومواد به کار می‌روند؛
- تمیز کردن نشتی‌ها یا پسماند نانومواد؛
- تمیز کردن سیستم‌های جمع‌آوری غبار نانومواد؛
- تراش‌کاری یا سنگ‌زنی نانومواد یا تجزیه مکانیکی نانومواد که می‌تواند به معلق شدن نانوذرات در هوا منجر شود.

■ عناصر برنامه مدیریت ریسک

با توجه به کمبود اطلاعات درباره ریسک‌های سلامتی تماس شغلی با نانومواد مهندسی شده، باید اقدامات مناسب برای به حداقل رساندن ریسک تماس کارگران با نانومواد با استفاده از یک برنامه مدیریت ریسک انجام شود[3]. برنامه‌های مدیریت ریسک نانومواد باید بخشی از سیستم یکپارچه سلامت، ایمنی و محیط زیست شرکت‌هایی باشد که به تولید یا استفاده از نانومواد یا محصولات حاصل از فناوری نانو می‌پردازند. یکی از عناصر اصلی این برنامه باید توانایی پیش‌بینی خطرهای جدید (تعیین خطرات) و احتمال ارتباط آن‌ها با تغییر در فرآیندهای تولید، تجهیزات یا استفاده از مواد جدید باشد. این مسئله نیازمند ارزیابی مستمر خطرهای بالقوه متوجه کارگران (ارزیابی ریسک‌ها) براساس جمع‌آوری سیستماتیک اطلاعات مربوط به کار، مواد مورد استفاده و محصولات، به منظور تعیین سناریوهای مختلف تماس با نانومواد است. این ارزیابی‌ها باید یک فرآیند مستمر باشد تا اطلاعاتی از منابع بالقوه تماس و شیوه‌های کاهش آن به دست آید. [۲] عناصر برنامه مدیریت ریسک باید به ارائه راهنمایی‌هایی در مواردی که معرفی می‌شوند بپردازند: [۲]

1. Lippmann 1977; ICRP 1994; ISO 1995
2. ICRP 1994
3. Schulte et al. 2008

- نصب سیستم‌های کنترل مهندسی (مانند تهویه و سیستم‌های جمع‌آوری غبار) و ارزیابی آن‌ها؛
- آموزش کارگران برای کار ایمن با نانومواد (مانند روش‌ها و سیستم‌های کاری مناسب)؛
- انتخاب و استفاده از تجهیزات حفاظتی فردی (مانند لباس، دستکش و ماسک تنفسی)

مؤسسه ملی سلامت و ایمنی شغلی امریکا روش سلسله مراتبی کنترل ریسک برای کاهش میزان تماس با نانومواد درمحل کار را به شرح زیر پیشنهاد کرده است. بنیان فلسفی استفاده از سلسله مراتب کنترل ریسک، تلاش برای حذف خطرات (مانند استفاده از موادی با خطرات کمتر) و در صورتی که امکان حذف وجود ندارد، کنترل خطرات در همان محل منبع و یا در نزدیک‌ترین مکان به منبع است. [۲]

روش‌های کنترل معمولاً با همین ترتیب و با هدف محدود کردن میزان تماس تا حد قابل قبول (مانند حد مجاز تماس شغلی یا از پیش تعیین شده اجرا می‌شوند)[1]. [۲]

کنترل‌های مهندسی

اگر امکان حذف یا جایگزینی خطرات بالقوه مواد با موادی دارای خطرات کمتر یا بی‌خطر وجود نداشته باشد، باید نسبت به اجرای کنترل‌های مهندسی در باره فرآیندها یا فعالیت‌ها اقدام کرد. در انتخاب نوع کنترل‌های مهندسی مورد استفاده، باید خصوصیات بالقوه خطرناک مواد اولیه، مواد میانی و نانومواد نهایی مورد توجه قرار گیرد. براساس دانش موجود درباره تماس هنگام تولید، حمل و نقل و جمع‌آوری نانوذرات معلق و نانومواد، می‌توان از انواع تکنیک‌های کنترلی مشابه برای کنترل تماس با ذرات معلق در هوا استفاده کرد[2]. [۲]

براساس اطلاعات موجود درباره رفتار و انتقال نانومواد در هوا، می‌توان از کنترل‌های مهندسی مانند محصورسازی منبع (جداسازی منبع تولید از محل حضور کارگران) و سیستم‌های تهویه به منظور جمع‌آوری نانومواد معلق در هوا استفاده کرد. کمیت مجموعه نانومواد‌ی که در تولید محصولات به کار می‌رود، تا حد زیادی می‌تواند بر انتخاب کنترل‌های مورد استفاده برای کاهش تماس، تأثیر بگذارد. [۲]

شکل فیزیکی نانومواد، مدت زمان انجام فعالیت و دفعات انجام کار از دیگر عوامل مؤثر بر انتخاب کنترل‌های مهندسی هستند. برای مثال کار با نانومواد مایع و در مقدار کم نیازمند اقدامات کنترلی کمتری در مقایسه با کار با مقدار زیاد نانومواد در حالت آزاد یا معلق در هوا است. اقدام‌های کنترلی برای نانومواد‌ی که در حالت آزاد نیستند (نانوکامپوزیت‌ها و یا نانومواد‌ی که دارای پوشش هستند) به جز در موارد جوش‌کاری و برش‌کاری، ضرورت ندارد. [۲] کارهای پژوهشی با نانومواد معمولاً در مقادیر کم و در آزمایشگاه‌های مجهز به سیستم‌های تهویه انجام می‌شوند. در صورت افزایش مقدار مواد باید از اقدامات کنترلی بیشتری برای جلوگیری از نشت نانومواد و انتقال آن‌ها به اتاق‌های مجاور استفاده کرد. [۲]

▼ سلسله مراتب کنترل ریسک تماس، روش کنترل فرایند، تجهیزات یا فعالیت‌ها

روش کنترل	فرآیندها، تجهیزات یا وظایف کاری
حذف	تغییر طراحی برای حذف خطرات
جایگزینی	جایگزین کردن خطرات زیاد با خطرات کمتر
کنترل‌های مهندسی	جداسازی / محصورسازی، تهویه (محلی، کلی)
کنترل‌های مدیریتی	خط مشی‌ها، روش‌های اجرایی، دستورالعمل‌ها، طراحی شیفت‌های کاری
تجهیزات حفاظتی فردی	ماسک تنفسی، لباس، دستکش، عینک، محافظ گوش

1. Sources: Plog et al. 2002; NIOSH 1990

2. Rutherman 1996; Burton 1997

کاهش میزان محصول تولید شده مسئله‌ای مهم در کنترل انتشار نانومواد است. با توجه به خصوصیات نانومواد و روش‌های منحصر به فرد تولید آن‌ها، به نظر می‌رسد سیستم‌های تهویه قدرتمند رایج در مراکز تولید نانومواد، قوی‌تر از سیستم‌های مورد نیاز برای جمع‌آوری موادی است که به صورت تصادفی در هوا آزاد می‌شوند. به همین دلیل باید به گونه ای از کنترل‌های مهندسی استفاده کرد که بدون آسیب رساندن به میزان تولید، از کارگران در برابر تماس حفاظت شود. [۲]

اثربخشی فیلترهای جمع‌آوری غبار

دانش موجود نشان می‌دهد سیستم تهویه مجهز به فیلتر HEPA می‌تواند به صورت مؤثر نانوذرات را جمع‌آوری کند[۴].

پژوهش‌های محدودی نیز به اثربخشی فیلترهای مورد استفاده در سیستم‌های کنترلی (از جمله ماسک‌های تنفسی) برای جمع‌آوری نانوذرات پرداخته‌اند. محدودیت اطلاعات درباره عملکرد فیلترها برای جمع‌آوری نانوذرات (به ویژه نانوذرات کوچک‌تر از ۲۰ نانومتر) ناشی از شواری تولید و اندازه‌گیری کمی این ذرات است. [۲]

شیوه‌ی کار

یکی از اقدامات مهم در ایجاد شیوه‌های کاری مناسب، اطلاع از خطرات بالقوه در محل کار و تدوین روش‌های اجرایی برای تشریح اقدامات لازم به منظور حصول اطمینان از حفاظت کارگران است. در این روش‌های اجرایی باید راهنمایی‌هایی برای شیوه‌های کاری مناسب، با هدف به حداقل رساندن تماس کارگران با نانومواد و سایر مواد شیمیایی خطرناک لحاظ شده باشد.

مدیریت باید تمهیداتی برای بازنگری و به روزرسانی سیستماتیک این روش‌های اجرایی در نظر گرفته و از سوی دیگر اقدامات صورت گرفته برای بهبود شرایط محل کار را به صورت مستمر به اطلاع کارگران برساند. [۲]

بهترین اقدامات مدیریت

- آموزش کارگران برای کار ایمن با نانواشیاء یا مواد حاوی نانواشیاء به منظور کاهش احتمال استنشاق و یا تماس با پوست؛
- تأمین اطلاعات مورد نیاز درباره ویژگی‌های خطرناک مواد اولیه و نیز نانومواد نهایی و نیز پیشنهاد اقدام‌هایی برای پیش‌گیری از تماس با آن‌ها؛
- ترغیب کارگران به شستن دست‌ها پیش از خوردن غذا، آشامیدن، سیگار کشیدن یا ترک محل کار؛
- اجرای اقدامات کنترلی مضاعف (مانند استفاده از یک محل پاک و تسهیلات رفع آلودگی برای کارگران در صورتی که در معرض خطر قرار دارند) به منظور حصول اطمینان از خارج نشدن نانومواد مهندسی‌شده از محل کار؛
- تأمین تسهیلات لازم برای استحمام و تعویض لباس به منظور پیش‌گیری از انتقال آلودگی به مکان‌های دیگر (مانند خانه) از طریق آلوده شدن لباس یا پوست با نانومواد. [۲]

بهترین اقدامات کارگران

- اجتناب از کار با نانومواد در فضای آزاد و در وضعیت "ذرات آزاد"؛
- عدم انبارش نانومواد در ظروف کاملاً بسته چه در حالت محلول، مایع و یا جامد، در صورت امکان؛
- تمیزکردن محل کار، حداقل در پایان هر شیفت کاری با استفاده از جاروبرقی‌های مجهز به فیلترهای HEPA یا از طریق پاک کردن با دستمال مرطوب. برای تمیز کردن محل کار نباید از روش‌های خشک یا جاروکردن استفاده شود. نظافت باید به صورتی باشد که از تماس کارگران با پسماندها جلوگیری شود. دفع تمامی پسماندها بایستی مطابق کلیه قوانین، ضوابط و مقررات ملی و محلی انجام شود.
- اجتناب از ذخیره‌سازی یا مصرف موادغذایی در جایی که محل کار با نانومواد است. [۲]

1. Hinds 1999

تجهیزات حفاظتی فردی

در حال حاضر، راهنمای قابل قبول و مبتنی بر اطلاعات علمی برای انتخاب تجهیزات حفاظتی فردی هنگام کار با نانومواد وجود ندارد. بخشی از این مسئله به دلیل محدودیت اطلاعات درباره اثربخشی این تجهیزات مانند لباس یا دستکش در مقابل نانوذرات است. به هر حال اگرچه ممکن است نانوذرات به پوست نفوذ کنند، اما شواهدی مبنی بر بیماری ناشی از آن وجود ندارد و از سوی دیگر استانداردی برای حدمجاز یا خطرناک نفوذ نانومواد به پوست ارائه نشده است. البته براساس سرشماری اخیر در امریکا، ۸۴ درصد از کارفرمایان برای کارگرانی که با نانومواد سر و کار دارند، تجهیزات حفاظتی فردی، تهیه می‌کنند[1]. انتخاب این تجهیزات، غالباً براساس شیوه‌های رایج در بهداشت صنعتی صورت گرفته، اما نوع آن‌ها بسته به حجم و توان تجاری شرکت و اندازه نانومواد مورد استفاده، متغیر است. [۲]

به دلیل قطعی نبودن اثرات سلامتی تماس نانومواد با پوست، بهتر است از تجهیزات حفاظتی فردی مانند دستکش، لباس و ماسک تنفسی به منظور جلوگیری از تماس پوست با نانومواد استفاده شده و خصوصاً از تماس نانومواد با پوست ملتهب جلوگیری شود. تا زمانی که اطلاعات لازم درباره اثربخشی تجهیزات حفاظتی فردی در برابر نانومواد تأمین نشده، بهتر است از شیوه‌های سنتی بهداشت صنعتی استفاده شود. [۲]

ماسک‌های تنفسی

استفاده از ماسک‌های تنفسی معمولاً زمانی ضرورت می‌یابد که کنترل‌های مهندسی و مدیریتی در رساندن میزان تماس کارگران با مواد آلوده معلق در هوا به کمتر از حد مجاز تعیین شده و یا اهداف کنترلی داخلی و در نتیجه حفاظت از سلامت کارگران ناتوان باشند. در حال حاضر حدود مجاز تماس با نانوذرات مهندسی شده مشخص نشده است. اگرچه حدود مجاز تماس شغلی با موادی با همین ترکیب شیمیایی اما بدون توجه به اندازه آن‌ها مشخص شده و موجود است. شواهد علمی موجود نشان می‌دهد نانوذرات به لحاظ بیولوژیکی از ذرات بزرگ‌تر با همان ترکیب شیمیایی فعال‌تر هستند، لذا ممکن است برای سلامتی خطر بیشتری داشته باشند. بنابراین در تصمیم‌گیری برای استفاده از ماسک‌های تنفسی، علاوه بر راهنماها و استانداردها و حدود مجاز تماس با ذرات بزرگ‌تر با همان ترکیب شیمیایی، اطلاعات سم‌شناسی موجود درباره نانوذرات خاص و احتمال تماس شغلی (غلظت مواد معلق در هوا، مدت زمان تماس و وظایف کاری) را مدنظر قرار داد. [۲]

در صورت تصمیم به استفاده از ماسک‌های تنفسی، براساس استاندارد[2]، باید برنامه‌ای برای مدیریت ماسک‌های تنفسی که موارد زیر را پوشش دهد، ایجاد و برقرار شود: [۲]

- ارزیابی توانایی کارگر برای انجام وظایف محوله در حالی که ماسک تنفسی پوشیده است؛
- آموزش منظم پرسنل؛
- پایش ادواری محیط کار؛
- آزمون تناسب ماسک تنفسی؛
- نگه‌داری، بازرسی، نظافت و انبارش ماسک‌های تنفسی.

براساس این استاندارد، انتخاب ماسک‌ها نیز باید توسط فردی انجام شود که با محل کار و محدودیت‌های هرکدام از ماسک‌های تنفسی آشنایی داشته باشد. [۲]

تمیز کردن و دفع نانومواد

در حال حاضر هیچ راهنمایی برای تمیزکردن سطوح آلوده و دفع آلودگی‌های ناشی از انتشار نانومواد وجود ندارد. اگرچه ممکن است بتوان پیشنهادها و توصیه‌های کارخانه‌های داروسازی (هنگام کار و تمیزکردن ترکیبات دارویی) را برای سایر مکان‌هایی که در آن‌ها نانومواد مهندسی شده، تولید و یا استفاده می‌شود، به کار برد[3]. تا زمان دست‌یابی به اطلاعات بیشتر، بهتر است از

1. ICON 2006
2. Occupational Safety and Health Administration (OSHA) respiratory protection standard [29 CFR 1910.134]
3. Wood 2001

راهبردهای کنونی برای پاک کردن مواد شیمیایی شناخته شده و شیوه‌های ایمن دفع آن‌ها، در کنار اطلاعات موجود درباره خطرهایی که برای سلامتی دارند و راه‌های تماس استفاده کرد.

رویکردهای استاندارد برای پاک کردن پودرهای نانو موارد زیر را شامل می‌شود: استفاده از جاروبرقی‌های مجهز به فیلتر HEPA، پاک کردن با پارچه خیس و یا مرطوب کردن پودرها پیش از پاک کردن با استفاده از روش‌های خشک. [۲]

نشتی مواد مایع نیز معمولاً با استفاده از محلول‌ها یا مواد جاذب تمیز می‌شوند. بهتر است از روش‌های مرطوب مانند صابون یا روغن‌های پاک‌کننده برای تمیز کردن استفاده شود. دفع پارچه‌هایی که نظافت با آن‌ها صورت گرفته نیز باید به روش مناسب انجام شود. استفاده از پارچه‌های دارای میکروفیبرهای الکترواستاتیک نیز می‌تواند در پاک کردن لکه‌های سطحی با حداقل امکان معلق ساختن نانوذرات در هوا کمک کند. خشک کردن و استفاده مجدد از این پارچه‌ها می‌تواند به معلق شدن مجدد ذرات در هوا منجر شود. [۲]

استفاده از روش‌های نظافت خودکار مانند استفاده از جاروهای خشک و یا هوای فشرده توصیه نمی‌شود و یا در صورت استفاده باید با احتیاط‌های لازم به منظور پیش‌گیری از معلق شدن ذرات در هوا و جمع‌آوری آن‌ها در فیلترهای HEPA همراه باشد. در صورت استفاده از جاروبرقی باید مراقب بود تا فیلترهای HEPA به طرز مناسب نصب شده و فیلتر و کیسه جارو براساس دستورالعمل سازنده تعویض شود. [۲] در حالی که استفاده از جاروبرقی در بسیاری از موارد می‌تواند مؤثر باشد، اما موارد زیر نیز باید همواره مورد توجه قرار گیرد: [۲]

- ممکن است نیروی کشش، مانع مکیده شدن ذرات توسط جاروبرقی از روی سطوح شود.
- ذرات دارای بار الکترواستاتیک ممکن است جذب بار متضاد شده و یا بارهای همنام را دفع کنند. به همین ترتیب اگر دهانه جاروبرقی هم دارای بار باشد می‌تواند ذرات هم بار را دفع کند، در نتیجه جمع‌آوری این ذرات سخت می‌شود یا آن که باعث می‌شود بیشتر در هوا پخش شوند.
- حرکت‌های سریع دهانه جارو یا حتی تماس و اصطکاک آن با ذرات معلق در هوا نیز می‌تواند باعث ایجاد بار الکتریکی روی جارو شود. جاروهای ساخته شده برای تمیز کردن دستگاه‌های کپی و چاپگرها دارای توان خنثی سازی بار الکترواستاتیک هستند.

هنگام تدوین روش‌های اجرایی برای تمیزکردن سطوح آلوده و دفع آلودگی‌های ناشی از انتشار نانومواد، باید احتمال تماس حین نظافت، مدنظر قرار گیرد. شاید بتوان گفت تماس پوستی و استنشاق، خطرهای بیشتری در بر دارند، بنابراین باید تجهیزات حفاظتی مناسب برای کارگران تدارک دیده شود.

موضوع معلق شدن دوباره ذرات در هوا می‌تواند خطر تماس از طریق استنشاق را افزایش دهد. بر این اساس می‌توان گفت در سلسله مراتب احتمال تماس، استنشاق ذرات معلق در هوا بیشترین خطر و تماس با نانوذرات در حالت مایع پس از استنشاق و تماس با نانوذرات دارای ساختارهای غیرمتحرک، خطر کمتری در بردارند. اصولاً تمیزکردن سطوح آلوده و دفع آلودگی‌های ناشی از انتشار مواد بایستی براساس قوانین، ضوابط و مقررات موجود کار و دفع پسماندها صورت گیرد. [۲]

نظارت بر سلامت شغلی

نظارت بر سلامت شغلی، یکی از ارکان مهم هر برنامه اثربخش سلامت و ایمنی است. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی منحصر به فرد نانومواد، رشد فزاینده نانوفناوری در محل کار و اطلاعات مربوط به اثرات منفی سلامتی تماس با نانومواد مهندسی‌شده در حیوانات آزمایشگاهی، ایجاد یک برنامه نظارت بر کارگرانی که بالقوه با نانومواد مهندسی‌شده در تماس‌اند را ضروری می‌سازد[1].

شناسایی عناصر مناسب و موثر در برنامه‌های نظارت بر سلامت شغلی کارگران شاغل در بخش نانوفناوری، منوط به ارزیابی مستمر مطالعات سم‌شناسی و کارگرانی است که بالقوه با نانومواد تماس دارند. غربال‌گری پزشکی تنها یکی از عناصر برنامه مدیریت ایمنی و سلامت شغلی است که از سلسله مراتب

1. Schulte et al.2008 a

اقدامات کنترلی و نظارتی پیروی می‌کند. از آن جا که بحث غربال‌گری پزشکی کارگرانی که با نانومواد تماس داشته‌اند، به صورت علمی مورد بررسی قرار نگرفته است، متن حاضر در پی پر کردن این شکاف اطلاعاتی براساس ارائه پیشنهادات موقت است. شواهد زیادی حاکی از اثرات منفی سلامتی تماس با انواع نانوذرات مهندسی‌شده در حیوانات آزمایشگاهی موجود است، اما تا کنون اطلاعاتی در باره تماس کارگران با همان نوع نانوذرات مهندسی شده، منتشر نشده است.

اطلاعات علمی کنونی درباره خطرهای که تماس با نانوذرات مهندسی شده برای سلامت انسان دارند، بسیار محدود است. اطلاعات علمی و پزشکی چندانی برای غربال‌گری پزشکی کارگرانی که با نانوذرات مهندسی‌شده تماس داشته‌اند، وجود ندارد. اما فقدان این اطلاعات موجب نشده است تا کارفرمایان علاقه‌مند به حفاظت از سلامت کارگران، از انجام اقدامات احتیاطی سر باز زنند[1]. اگر پیشنهادات غربال‌گری پزشکی درباره مواد شیمیایی که نانومواد از آن‌ها مشتق می‌شوند، وجود داشته باشد، در این صورت همین پیشنهادها باید درباره نانومواد نیز به کار گرفته شود.

پژوهش‌های مداوم درخصوص خطرات نانومواد مهندسی‌شده و ارزیابی مستمر اطلاعات موجود، ایجاد روش‌های علمی غربال‌گری برای نظارت پزشکی کارگرانی که با نانوذرات مهندسی‌شده تماس داشته‌اند را میسر می‌سازد. در عین حال پیشنهادهای زیر به منظور مدیریت محیط های کاری که ممکن است کارگران با نانومواد مهندسی‌شده، تماس داشته باشند، ارائه شده است: [۲]

- انجام اقدامات کنترلی مناسب به منظور پیش‌گیری از تماس کارگران با نانوذرات؛
- شناسایی خطرات به عنوان مبنایی برای اجرای اقدامات کنترلی؛
- ادامه استفاده از رویکردهای موجود نظارت پزشکی.

1. Schulte et al. 2008 b

خلاء های اطلاعاتی و نیازهای پژوهش‌های آینده

کوشش‌های پژوهشی باید متمرکز بر عناوین زیر و با هدف پر کردن خلاءهای اطلاعاتی در زمینه این موضوع‌ها و تدوین راهبردها و ارائه پیشنهادهایی در این باره باشد: [۲]

■ ارزیابی میزان تماس

- تعیین عوامل کلیدی مؤثر بر تولید، انتشار، جمع‌آوری و بازگشت مجدد نانومواد در محل کار؛
- تعیین تفاوت چگونگی تأثیر تماس احتمالی با نانومواد در فرآیندهای مختلف کاری؛
- ارزیابی میزان تماس با نانومواد در صورت استنشاق یا تماس پوستی

■ سمی بودن و مقدار ورود به بدن

- بررسی و تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی نانومواد (مانند اندازه، شکل، حلالیت‌پذیری، سطح تماس، توان اکسیداسیون، فعالیت‌پذیری سطح، بار سطح، ترکیب شیمیایی) که می تواند بر پتانسیل سمی بودن نانومواد، تأثیرگذار باشد؛
- بررسی و تعیین الگوی انتشار نانوذرات در ریه‌ها و انتقال آن‌ها به سیستم عصبی؛
- ارزیابی اثرات تماس ریه‌ها با نانوذرات در کوتاه‌مدت و بلند مدت و تاثیر آن بر سایر بافت‌ها و اعضاء مختلف (مانند ریه‌ها، مغز، سیستم قلبی- عروقی)؛
- بررسی شباهت اثرات زیستی ورود نانوذرات به نای و گلو در مقایسه با استنشاق؛
- تعیین اثرات تماس پوستی با نانو اشیاء، احتمال ورود به پوست و ایجاد التهاب؛
- بررسی سمی و یا سرطانزا بودن نانواشیاء؛
- تعیین مکانیزم زیستی اثرات بالقوه مسمومیت؛
- بررسی قابلیت پیش‌بینی و تعمیم نتایج آزمایشگاهی به آثار آن در درون موجود زنده؛
- ایجاد مدل های یکپارچه برای کمک به ارزیابی خطرات بالقوه؛

■ همه‌گیرشناسی و مراقبت

- ارزیابی اطلاعات موجود درباره تماس و سلامتی کارکنان واحدهای تولیدی و استفاده‌کننده از نانومواد، با تأکید بر بهبود درک ارزش و کاربرد ایجاد سوابق تماس در مورد کارکنانی که بالقوه در معرض نانوذراتی مهندسی شده قرار داشته‌اند؛
- انجام مطالعات فنی - اقتصادی در صنایع مختلف و نیز انجام مطالعات همه‌گیرشناسی درباره تماس کارگران با نانومواد مهندسیشده، با تأکید بر کارگرانی که بالقوه با نانومواد مهندسی‌شده کربنی، تماس داشته‌اند؛
- تلفیق موضوعات سلامت، ایمنی و محیط‌زیست با مکانیزم‌های مراقبتی خطرات موجود و ارزیابی مجدد راهنماهای مربوط به مراقبت‌های سلامتی کارگرانی که بالقوه در معرض نانومواد مهندسی‌شده، قرار داشته‌اند.
- ایجاد سیستم‌هایی براساس اطلاعات جغرافیایی موجود در زمینه سلامت عمومی به منظور توسعه اثربخش و مقرون به صرفه روش‌های تبادل داده‌های مربوط به سلامت، ایمنی و محیط‌زیست در نانوفناوری.

■ ارزیابی ریسک‌ها

- تعیین چگونگی استفاده از داده‌های موجود درباره تماس انسان یا حیوانات و نیز محیط‌زیست با ذرات اولترافاین و واکنش در برابر آن‌ها برای شناسایی خطرات بالقوه و برآورد ریسک‌های تماس شغلی با نانومواد؛
- ایجاد چارچوبی برای ارزیابی خطرهای بالقوه تماس شغلی با نانومواد با استفاده از اطلاعات سم‌شناسی نانومواد مهندسی‌شده و مدل‌ها و روش‌های استاندارد ارزیابی ریسک.

■ روش‌های اندازه‌گیری

- ارزیابی روش‌های اندازه‌گیری جرم ذرات قابل استنشاق در هوا و قابلیت به کارگیری این روش‌ها در اندازه‌گیری نانومواد؛
- توسعه روش‌های عملی برای اندازه‌گیری نانومواد معلق در هوای محیط کار؛
- تعیین معیار مناسب (به جز اندازه‌گیری مقدار جرم) برای تعیین میزان سمی بودن نانوذرات.
- ایجاد، آزمون و ارزیابی سیستم‌ها برای مقایسه نمونه‌گیری‌ها و تأیید آن‌ها.

■ کنترل‌های مهندسی و تجهیزات حفاظتی فردی

- ارزیابی اثربخشی کنترل‌های مهندسی در کاهش تماس شغلی با نانوذرات معلق در هوا و توسعه کنترل‌های جدید؛
- ارزیابی اثربخشی روش‌های دسته‌بندی کنترل‌ها، زمانی که اطلاعات بیشتری مورد نیاز است و ارزیابی مواد جایگزین؛
- ارزیابی و بهینه‌سازی تجهیزات حفاظت فردی موجود؛
- ارائه پیشنهادهایی (مانند استفاده از ماسک تنفسی) برای پیش‌گیری یا به حداقل رساندن تماس شغلی با نانومواد.

■ ایمنی در برابر آتش سوزی و انفجار

- شناسایی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی که می‌تواند در سختی، قابلیت اشتعال، انفجار یا رسانایی نانومواد تأثیرگذار باشد؛
- ارائه توصیه‌هایی در مورد فعالیت‌های کاری جایگزین که تماس شغلی با نانومواد در محل را کاهش داده و یا به حداقل برساند.

■ پیشنهادها و راهنمایی‌ها

- استفاده از بهترین اطلاعات علمی موجود برای ارائه پیشنهادات اولیه درخصوص سلامت و ایمنی محل کار در حین تولید، استفاده و یا کار با نانومواد؛
- ارزیابی و به روز رسانی ضوابط و حدود تماس شغلی با ذرات معلق در هوا برحسب جرم به منظور حصول اطمینان از تداوم اقدامات احتیاطی.

■ اطلاعات و ارتباطات

- ایجاد ارتباط و تبادل اطلاعات به منظور شناسایی و تبادل نیازهای پژوهشی، رویکردها و نتایج؛
- توسعه و ترویج مواد آموزشی برای کارگران، کارفرمایان و متخصصان سلامت، ایمنی و محیط‌زیست.

■ کاربردها

- شناسایی کاربردهای نانوفناوری در ایمنی و سلامت شغلی؛

فهرست منابع مورد استفاده و نشریات منتشر شده

منابع مورد استفاده و استناد در این بررسی

1. National Institute for Occupational Safety and Health, Department of Health and Human Services, Center for Disease Control and Prevention, ***Safe Nanotechnology in the Workplace, An Introduction for Employers, Managers, and Safety and Health Professionals***, DHHS (NIOSH) Publication No. 2008-112.

2. National Institute for Occupational Safety and Health, Department of Health and Human Services, Center for Disease Control and Prevention, ***Approaches to Safe Nanotechnology, Managing Health and Safety Concerns Associated with Engineered Nanomaterials***, DHHS (NIOSH) Publication No. 2009-125.

3. http://en.wikipedia.org

4. John F. Sargent, ***Nanotechnology and Environmental, Health, and Safety: Issues for Consideration***, CRS Report for Congress, August 6, 2008.

5. Flinders Consulting Pty Ltd, ***A Review of the Potential Occupational Health & Safety Implications of Nanotechnology***, for the Australian Safety and Compensation Counsil (ASCC), July 2006.

6. Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks (Scenihr), ***The Appropriateness of Existing Methodologies to Assess the Potential Risks Associated with Engineered and Adventitious Products of Nanotechnologies***, March 2006.

7. Mohammed Al Omar, ***Nanotechnology and Medicine***, College of Pharmacy, King Saud University, year unknown.

8. Kody Varahramyan, ***Nanotechnology - Science, Medical Applications***, Indiana University- Purdue University Indianapolis, April 15, 2009.

9. Michael T. Kleinman, **Nanoparticles and Health**, Department of Community and Environmental Medicine University of California, Irvine, year unknown.

گروه بین المللی ره شهر از تابستان ۱۳۷۱ تاکنون ۱۰۸ نشریه منتشر کرده است؛ در زیر عناوینی که از پاییز ۱۳۸۴ تاکنون منتشر شده ملاحظه می کنید:

۱. فن آوری اطلاعات - بخش هفدهم: مدیریت ارتباط با مشتریان (پاییز ۱۳۸۴)
۲. مدیریت پروژه - استانداردهای مدیریت پروژه (بخش دوم ، زمستان ۱۳۸۴)
۳. مهندسی ارزش - بخش اول : اصول، مبانی و فرآیند (زمستان ۱۳۸۴)
۴. مدیریت پروژه - استانداردهای مدیریت پروژه (بخش سوم - فروردین ۱۳۸۵)
۵. فن آوری اطلاعات - بخش هجدهم: پایتخت الکترونیکی - تجلی عدالت اجتماعی (تابستان ۱۳۸۵)
۶. مدیریت پروژه - دفتر مدیریت پروژه (بخش اول - تابستان ۱۳۸۵)
۷. مندولوژی های مدیریت پروژه (تابستان ۱۳۸۵)
۸. صنایع انرژی بر، نظریه ها و دیدگاه ها (تابستان ۱۳۸۵)
۹. آشنایی مقدماتی با ارزیابی محیط زیست (پاییز ۱۳۸۵)
۱۰. آشنایی با فرآوری های گازی CNG ، LPG ، LNG (زمستان ۱۳۸۵)
۱۱. رهنمون هایی برای توسعه (زمستان ۱۳۸۵)
۱۲. خبرنامه تحولات توسعه در حوزه خلیج فارس (بهار ۱۳۸۶)
۱۳. مندولوژی مکان یابی صنایع (تابستان ۱۳۸۶)
۱۴. خبرنامه تحولات توسعه در حوزه خلیج فارس (جلد دوم) (تابستان ۱۳۸۶)
۱۵. خبرنامه تحولات توسعه در حوزه خلیج فارس (جلد سوم) (تابستان ۱۳۸۶)
۱۶. معماری سبز، (انرژی آفتاب در معماری) (پاییز ۱۳۸۶)
۱۷. معماری سبز، (انرژی زمین گرمایی) (پاییز ۱۳۸۶)
۱۸. خبرنامه تحولات توسعه در حوزه خلیج فارس (نسخه چهارم) (پاییز ۱۳۸۶)
۱۹. ایران ترانزیت (بهار ۱۳۸۷)
۲۰. سوپر جاذب ها (راهی برای گسترش فضای سبز و مقابله با کمبود آب) (تابستان ۱۳۸۷)
۲۱. روند توسعه در خلیج فارس و دریای عمان (بخش پنجم) (تابستان ۱۳۸۷)
۲۲. روند توسعه در خلیج فارس و دریای عمان (بخش ششم) (پاییز ۱۳۸۷)
۲۳. بام سبز (پاییز ۱۳۸۷)
۲۴. سامانه های گرمایش شهری (بهار ۱۳۸۸)
۲۵. روند توسعه در خلیج فارس و دریای عمان (بخش هفتم) (بهار ۱۳۸۸)
۲۶. بحران جهانی و چشم انداز آینده (تابستان ۱۳۸۸)
۲۷. حمل و نقل همگانی (تابستان ۱۳۸۸)

ضمناً کتب زیر نیز توسط گروه مهندسین مشاور ره شهر منتشر گردیده است:

۱. سازه پارکینگ های طبقاتی (PARKING STRUCTURES) (۱۳۷۲)
۲. سازه های آبی (HYDRAULIC STRUCTURES) (۱۳۷۳)
۳. خودآموز اتوکد ۱۲ (AUTOCAD-V.۱۲ USER'S GUIDE) (۱۳۷۳)
۴. برنامه ریزی و طراحی هتل (دفتر تحقیقات و معیارهای فنی سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور - ۱۳۷۵)
۵. بیست وپنج جلد استانداردهای صنعت آب کشور (دفتر امور فنی و تدوین معیارهای سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور - ۱۳۷۵)
۶. راهنمای برنامه نویسی سه بعدی OPENGL (۱۳۸۳)
۷. معماری سبز - هوای پاکیزه بکاریم (۱۳۸۴)
۸. HSE در سفر (۱۳۸۵)
۹. معماری سبز - با گیاهان آب را تصفیه کنیم (۱۳۸۶)
۱۰. نانوفناوری برای همه (زمستان ۱۳۸۷)