مقاله پژوهشی

مروری بر روش‌ها و وسایل ارزیابی مواجهه شغلی با نانوذارت

وحیده ابوالحسن نژاد[۱]، محمد جواد عصاری*[۲]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۲/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۲/۳۰

چکیده

زمینه و هدف: در سال‌های اخیر، میزان استفاده از فناوری نانو در صنایع، و تعداد کارگران درگیر در فرآیندهای مختلف تحقیق، ساخت، تولید و دفع پسماندهای محصولات حاوی نانو مواد، رشد چشم‌گیری داشته، درحالی‌که علی‌رغم این افزایش، هنوز اطلاعات اندکی در رابطه با ریسک مواجهه شغلی با آن‌ها وجود دارد. لذا با توجه به استفاده روزافزون نانو مواد در محیط‌های کار، انتخاب تکنیک و وسایل نمونه‌برداری، ویژگی مناسب و بررسی میزان اثربخشی آن‌ها جهت ارزیابی مواجهه شغلی با این ترکیبات از اهمیت زیادی برخوردار است.

روش بررسی: این مطالعه مروری، با تاکید بر نتایج تحقیقات موجود در زمینه روش‌ها و وسایل ارزیابی مواجهه با نانو ذرات در محیط‌های شغلی و عوامل و شرایط مختلف تاثیرگذار بر آن، با هدف معرفی روش‌ها و وسایل ارزیابی مواجهه شغلی با نانو ذرات، به صورت جستجو در منابع کتابخانه‌ای به انجام رسید.

یافته ها: نتایج تحقیق حاضر بر این واقعیت تأکید دارد، که علی‌رغم کاربردهای فراوان فناوری نانو در محیط‌های کاری، هنوز روش بین‌المللی معتبر و استانداردی جهت ارزیابی مواجهه شغلی با نانو مواد وجود ندارد. نتایج همچنین نشان داد که به‌کارگیری وسایل و تجهیزات نوین، از طریق تعیین ویژگی نانو ذرات از نظر تعداد، غلظت جرمی و مساحت سطح، امکان ارزیابی مواجهه شغلی با نانو مواد را فراهم نموده است. ضمناً از بین وسایل مذکور، دستگاه سنجش روبشی اندازه ذره (SMPS) بیش‌ترین کاربرد را جهت سنجش تعداد و توزیع اندازه ذرات در تحقیقات داشته است.

نتیجه گیری: بررسی صحت و دقت وسایل و تجهیزات ارزیابی مواجهه با نانو ذرات، به عنوان موضوعاتی جهت انجام مطالعات آینده، می‌تواند در رسیدن به یک استاندارد مناسب و معتبر موثر واقع شود.

کلیدواژه ها: نانو ذرات، مواجهه شغلی، وسایل نمونه‌برداری، فناوری نانو

۱. دانشجوی دکترای تخصصی، گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی همدان، همدان، ایران.

۲*. **(نویسنده مسئول)** استادیار، گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی همدان، همدان، ایران. پست الکترونیک: Asari@umsha.ac.ir

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-16]

مقدمه

در سال‌های اخیر، فناوری نانو به سرعت در میان صنایع مختلف از جمله داروسازی، پزشکی، الکترونیک، دفاع و انرژی پیشرفت نموده و با ایجاد مشاغل جدید و رشد اقتصادی، سرمایه‌گذاری‌های زیادی نیز در این زمینه صورت گرفته است [۲-۱]. تا سال ۲۰۱۸، تعداد کارگران در مواجهه شغلی با نانو ذرات (ذرات با اندازه ۱ تا ۱۰۰ نانومتر)، حدوداً ۲ میلیون نفر تخمین زده شده است [۳]. ذرات نانو، بسیار کوچک بوده و در صورت ته‌نشینی، به راحتی به سایر بافت‌های بدن انتقال‌یافته و سمیت بیشتری اعمال می‌کنند [۶-۴]. بسیاری از نانو ذرات به طور طبیعی و یا در اثر فعالیت‌های بشری مانند دود سیگار، موتورهای احتراق داخلی و فرایندهایی نظیر جوشکاری ایجاد، و بدون کنترل در محیط‌زیست پراکنده می‌شوند. دسته دیگری از نانو ذرات نیز در آزمایشگاه سنتز و ساخته می‌شوند که تحت عنوان نانو ذرات مهندسی شده شناخته می‌شوند. بنابراین علاوه بر مواجهه با سطوح بالایی از نانو مواد مهندسی شده در صنعت، و بخش‌های مختلف تحقیق و توسعه و آموزش، امکان مواجهه روزمره با نانو ذرات طبیعی نیز وجود دارد. هرچند تراکم جرمی نانو ذرات پایین است، اما تعداد قابل‌توجهی را در برمی‌گیرد. به طوری که هوای یک اتاق معمولی حاوی ۱۰۰۰۰ تا ۲۰۰۰۰ نانو ذره در هر سانتی‌متر مکعب می‌باشد. درحالی‌که تعداد نانو ذرات در هوای جنگل به ۵۰۰۰۰ و در خیابان‌های شهر به ۱۰۰۰۰۰ ذره در هر سانتی‌متر مکعب نیز می‌رسد. مقادیر فوق حاکی از آن است که میلیون‌ها نانو ذره در ساعت توسط انسان استنشاق می‌گردد. البته نانو ذرات مهندسی شده که تعداد آن‌ها به طور قطعی مشخص نیست را نیز باید به این تعداد اضافه نمود [۴ و۱۰-۷]. نتایج ارزیابی انتشار نانو ذرات در مراکز تولیدی و راکتورها، گویای تأثیر مهم بسته بودن فرایند تولید، در جلوگیری از انتشار نانو ذرات طی مراحل سنتز، جمع‌آوری و بسته‌بندی می‌باشد [۱۲-۱۱]. تحقیقات انجام‌شده در خصوص مواجهه شغلی با نانو ذرات اکسید فلزی نشان می‌دهد که علی‌رغم حضور کارگران در تمامی بخش‌های تولید نانو مواد، بیش‌ترین ریسک مواجهه و بالاترین غلظت جرمی نانو ذره فقط در حین جمع‌آوری، توزین و انتقال مواد صورت پذیرفته است [۱۳]. درحالی‌که مواجهه بالقوه افراد با نانو ذرات در محیط‌های صنعتی و آموزشی، بیش‌تر از طریق استنشاق و یا تماس پوستی صورت گرفته است [۱۷-۱۴]. لذا با عنایت به عدم شناخت کامل معیارهای سمیت نانو ذرات، ارزیابی وسایل پایش مواجهه مبتنی بر نوع و ویژگی‌های نانو ذره، مطالعه بیش‌تر و کامل‌تری را می‌طلبد.

علی‌رغم وجود مکانیزم‌های دفاعی بدن، تفاوت قابل‌ملاحظه بین خواص فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیک منحصربه‌فرد نانو ذرات در مقایسه با ذرات بزرگ‌تر، موجب ورود این ذرات به بافت‌ها و سلول‌ها و اثرات متقابل با ارگانیسم‌های مختلف، و اعمال سمیت بیش‌تر در نتیجه مواجهه استنشاقی می‌گردد [۶ و ۲۴-۱۸]. مطالعات مختلفی در زمینه اثرات نانو ذرات بر جنبه‌های مختلف بهداشتی و سلامت افراد تحت مواجهه انجام‌شده است [۵ و ۳۴-۲۵]. نتایج تحقیقات حاکی از ارتباط مثبت بین بیماری‌های ریوی و تعداد ذرات ریز معلق در هوا می‌باشد [۷و۸ و۳۹-۳۵]. مطالعات اپیدمیولوژیکی نشان می‌دهد که ذرات خیلی ریز با تجمع در کبد، موجب ایجاد بیماری‌های ریوی، آسیب‌های قلبی عروقی و نقص در سیستم ایمنی و تأثیر بر DNA می‌شود [۴۳-۴۰]. نتایج چندین مطالعه، پتانسیل خطر مواجهه با نانولوله‌های کربنی را نشان داده‌اند [۴۸-۴۴]. تأثیر سمیت نانولوله‌های کربنی چند دیواره بر فعالیت میتوزی سلول نیز از جمله این نتایج است [۴۹]. هرچند افزایش سطح نانو لوله‌ها عامل مهمی در افزایش سمیت محسوب می‌شود، ولی تمایل به چسبندگی بالا، سطح واکنش نانو لوله‌ها با سلول‌های بدن را کاهش می‌دهد [۵۰]. حضور فلزاتی مانند کبالت، آهن، نیکل و مولیبیدن با بیش از ۵۰٪ محتوای وزنی، می‌تواند تأثیر زیادی بر سمیت نانولوله‌های کربنی داشته باشد [۵۱-۵۰].

امروزه نانو ذرات فلزی به خاطر خصوصیات جالب‌توجه الکتریکی، اپتیکی، شیمیایی و مغناطیسی، در بسیاری از مطالعات مورد توجه قرارگرفته‌اند [۵۲]. نانو ذرات فلزی کلوئیدی نقش مهمی در فنّاوری خصوصاً در ساخت شیشه و سرامیک ایفا می‌کنند [۵۳]. علاوه بر این، خواص ضد باکتریایی و ضد میکربی نانو ذرات نقره کاربردهای ویژه‌ای را برای آن رقم زده است [۵۴]. دی اکسید تیتانیوم (TiO_2) از دیگر نانو ذراتی است که امروزه به دلیل افزایش میزان تولید و کاربرد و پتانسیل رهاسازی در محیط‌زیست، مورد توجه زیادی قرار گرفته است [۵۶-۵۵]. مطالعات اخیر تأثیر اندازه نانو ذرات TiO_2 را به عنوان فاکتور اولیه موثر در سمیت خاطرنشان می‌سازد [۵۷]. مطالعات اپیدمیولوژیکی در خصوص سرطان‌زایی نانو مواد مهندسی شده کاملاً قطعی نیست [۶۱-۵۸]. شواهد نشان می‌دهد که پتانسیل خطرات بهداشتی نانو ذرات با ویژگی‌های منحصربه‌فرد آن‌ها در ارتباط

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-16]

بوده و آگاهی از خواص فیزیکی و شیمیایی از جمله توزیع اندازه ذره، ریخت‌شناسی، ترکیب اجزاء سازنده، سطح موثر ذره، تراکم تعداد و وضعیت انباشتگی می‌تواند در ارزیابی خطر نانو ذرات، نقش تعیین‌کننده داشته باشد [۶۲].

تغییرات فیزیکی (افزایش نسبت مساحت سطح به حجم و اندازه ذره در ورود به قلمرو اثرات کوانتومی) و شیمیایی (تغییر رنگ و خواص مغناطیسی) که بر اثر کوچک شدن ذرات تا اندازه نانومتری به وجود می‌آید، قابل‌توجه بوده، و مواد در مقیاس نانو رفتار کاملاً متفاوت، نامنظم و کنترل‌نشده‌ای از خود بروز می‌دهند. انتشار ذرات معلق در هوا، تحت تأثیر برخورد ناشی از حرکت براونین، منجر به انباشتگی یا انعقاد و در نتیجه افزایش قطر ذرات و کاهش تراکم تعداد آن‌ها می‌گردد [۶۳].

گسترش فناوری نانو علی‌رغم ساخت و کاربرد نانو ذرات مهندسی شده مختلف با خصوصیات تازه و نوظهور، موجب افزایش پتانسیل اثرات سمی این مواد در بسیاری از موارد ناشناخته گردیده [۱۳و۲۴]. نانو ذرات نقره، نانو ذرات طلا، دی‌اکسید تیتانیوم، اکسید روی، نانو لوله‌ها و نانوفیبرهای کربنی از جمله ریز موادی هستند که امروزه در فناوری‌های نوین کاربرد دارند. در روش‌های سنتی پایش مواجهه، از تکنیک‌های وزن سنجی برای ارزیابی مواجهه با نانو ذرات هوابرد استفاده گردیده، و حدود مجاز شغلی برای این مواجهات نیز اغلب بر پایه تراکم جرمی است. به طور مثال، حدود مجاز مواجهه ۸ ساعته برای نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم بر طبق انستیتو ملی بهداشت و ایمنی صنعتی آمریکا، ۰/۱ میلی‌گرم بر مترمکعب هوا می‌باشد. اما بررسی‌های علمی نشان داده است که تراکم جرمی به تنهایی کافی نبوده و تراکم تعداد و در صورت امکان سطح نانو ذرات می‌تواند شاخص گویاتری باشد [۱۷]. به‌هرحال، داده‌های مواجهه واقعی برای ارزیابی ریسک مواجهه با نانو ذرات در محیط کار کافی نبوده و باید روش‌های نمونه‌برداری مناسب برای سنجش مواجهه در نظر گرفته شود. انستیتو ملی بهداشت و ایمنی صنعتی آمریکا، یک تکنیک جدید ارزیابی انتشار نانو ذرات با استفاده از شمارشگر نوری و شمارشگر چگالشی ذره به همراه نمونه بردار بر پایه فیلتر را پیشنهاد می‌نماید [۴۷].

به طور کلی، ویژگی انتشار انواع مختلف نانو ذرات طبیعی و مهندسی شده در ارزیابی مواجهات انسانی اهمیت بسیاری دارد [۶۴]. روش‌های متعدد و مختلفی جهت سنجش و ارزیابی مواجهه با نانو ذرات وجود دارد. لذا مطالعه حاضر باهدف مرور، و بررسی نقاط قوت و ضعف روش‌ها و وسایل ارزیابی مواجهه شغلی با نانوذارت به صورت جستجو در متون کتابخانه‌ای به انجام رسید.

روش بررسی

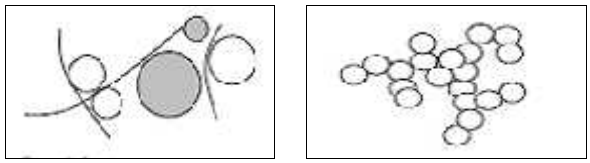
استراتژی و روش

در این مطالعه، برای جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز از منابع و بانک‌های اطلاعاتی الکترونیکی در دسترس، استفاده گردید. مرور بر مطالعات از طریق جستجو در پایگاه‌های اطلاعاتی بین‌المللی مانند Pubmed، Scopus، Science Direct و پایگاه‌های معتبر داخلی شامل SID، Magiran و Iranmedex با استفاده از کلیدواژه‌های نانو ذره و روش ارزیابی مواجهه در بازه زمانی ۱۳۹۴- ۱۳۹۳به دست آمد. بر اساس روش‌های مورد استفاده در این مطالعات، نانو ذرات بر پایه ویژگی‌های ذاتی (اندازه، توزیع، شکل، غلظت، شارژ سطحی و خاصیت آب گریزی) سنجش و توصیف می‌گردند [۶۶-۶۵]. محققان استراتژی‌های مختلفی برای پایش نانو ذرات در هوای محیط کار پیشنهاد نموده‌اند. بروئر(Brouwer) و همکاران (۲۰۰۴) اعلام نمودند که در ارزیابی مواجهه، بهتر است همه خصوصیات نانو ذرات مورد شناسایی و اندازه‌گیری قرار گیرد [۶۷]. در تحقیق انجام‌شده توسط بروئر در ۲۰۱۰، ، بین تراکم تعداد نانو ذرات و سمیت آن‌ها ارتباط معنی‌داری مشاهده شده، و سطح نانو ذرات نیز در ایجاد التهابات ریوی اثرگذار بوده است [۶]. نانو ذرات به واسطه اندازه کوچک، نسبت به سایر ذرات، راحت‌تر در ریه نفوذ نموده و به سلول‌ها می‌رسند. مطالعات حاکی از آن است که ذرات اکسید تیتانیوم با اندازه کم‌تر از ۲۰ نانومتر، نسبت به ذرات بزرگ‌تر با اندازه تقریبی ۲۰۰ نانومتر زمان پاک‌سازی طولانی‌تری داشته [۶۸]، و بین مساحت سطح ذره با پاسخ ریه ارتباط وجود دارد [۷۰-۶۹]. بررسی بروز التهاب، فیبروز و سرطان ریه ناشی از مواجهه با نانو ذرات در رت‌های آزمایشگاهی نشان داد که مواجهه با ذرات با حلالیت پایین، سبب اختلال در کلیرانس ریه شده است. لذا می‌توان نتیجه گرفت که سطح ذره به عنوان یک نشانگر مناسب در ارتباط با کلیرانس ریه مطرح می‌باشد [۱۳]. اندازه، از ویژگی‌های مهم نانو ذرات بوده که برای ذرات کوچک‌تر، با افزایش نسبت سطح به حجم ذره، احتمال دسترسی زیستی افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر در ذرات کوچک‌تر تراکم تعداد، و در ذرات بزرگ‌تر تراکم جرمی بالاتر می‌باشد. از طرفی، ذرات کوچک تمایل به انباشتگی دارند. نتایج مطالعات نشان می‌دهد که با فرض تراکم

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-16]

جرمی یکسان، نانو ذرات با حلالیت کم، در مقایسه با نانو ذرات با حلالیت بالا، پاسخ زیان‌بار قوی‌تری در بدن ایجاد می‌نماید [۲۷و۷۱]. ویژگی‌های تعداد و مساحت سطح ذره، در بررسی اثرات زیستی نانو ذرات از اهمیت زیادی برخوردار است [۶۱]. لیمبچ (Limbach) و همکاران (۲۰۰۵)، جذب نانو ذرات اکسید سریوم را در ریه مورد بررسی قراردادند. در این مطالعه، نانو ذرات به هم چسبیده در درون سیتوپلاسم سلول مشاهده گردید. نتایج نشان داد که ذرات نانو اکسید در تماس با محیط‌های کشت به سرعت به هم می‌چسبند مگر این‌که در سطح تماس خود دچار تغییر گردند. با توجه به این‌که ذرات بزرگ‌تر (ناشی از چسبیدن ذرات کوچک‌تر به یکدیگر) بهتر و راحت‌تر تحت فرآیند جذب واقع می‌شوند، لذا اندازه ذره در مقایسه با غلظت ذرات و سطح آن‌ها، در تعیین میزان جذب فاکتور مهم‌تری به شمار می‌رود [۷۲]. مراحل مختلف فرآیندهای صنعتی و حمل‌ونقل مواد می‌تواند خصوصیات نانو مواد را به طور معنی‌داری تغییر دهد. وقتی نانو ذرات پودری شکل در محیط آبی حل شود، توزیع اندازه ذرات مشابه حالت پودری نخواهد بود. همچنین وقتی پودر نانو مواد در هوا رها شود، خاصیت انباشتگی (Agglomeration) موجب تولید ذرات بزرگ‌تر می‌گردد [۷۳]. تمایل به انباشتگی در ذرات ریز، به عنوان یک چالش در ارزیابی مواجهه مورد توجه است. به طوری که با دور شدن از منبع انتشار، احتمال چسبندگی ذرات به یک دیگر افزایش می‌یابد. لذا برای اندازه‌گیری و سنجش ذرات در مقیاس نانو، نقطه اندازه‌گیری تا حد امکان بایستی به منبع انتشار ذره نزدیک باشد [۹]. نتایج مطالعات سیپنباخ (Seipenbusch) و کاسپر (Kasper) (۲۰۰۸)، مبتنی بر انعقاد و انباشتگی سریع ذرات نانو بعد از رها شدن از یک مخزن اختلاط بود. در این مطالعه، انعقاد طی مراحل اول (حاصل اتصال نانو ذرات به ذرات بزرگ‌تر) و دوم (ناشی از انباشتگی آئروسل‌های نانو) صورت پذیرفت. که در غلظت‌های بالاتر، سرعت انعقاد ذرات نیز بیش‌تر بود [۷۴]. انباشتگی نانو ذرات در نتیجه اتصال به یک دیگر و یا با ذرات موجود در زمینه، علاوه بر ایجاد تغییر در خواص سطح نانو ذره، گاهاً سبب افزایش اندازه ذرات محدوده بین ۵۰۰-۴۰۰ نانومتر می‌گردد. لذا نوع انباشتگی (شکل ۱)، می‌تواند تأثیر زیادی در انتخاب استراتژی ارزیابی در فرآیندها و فعالیت‌های مختلف داشته باشد [۷۶-۷۵].

ثبت تغییرات در حین انجام فرآیندها و فعالیت‌های شغلی، به‌عنوان یکی از عوامل کلیدی استراتژی مواجهه حائز اهمیت بوده که ابزار مناسب جهت مشاهده آن، تکنیک پایش مواجهه ویدئویی است [۷۹-۷۷]. در مطالعه بورزکنز (Beurskens) و همکاران (۲۰۱۱) از این تکنیک، به عنوان بخشی از فرآیند ارزیابی مواجهه استفاده شده است [۷۸]. این روش به شناسایی وقایع اتفاق افتاده در حین سنجش نیز کمک می‌نماید [۷۱]. نتایج مطالعه اسچالت (Schulte) و همکاران (۲۰۰۸)، بر اهمیت شناسایی فرآیندها و فعالیت‌های منجر به افزایش مواجهه با نانو ذرات در محیط‌های کار، و ارزیابی تراکم ذرات هوابرد به منظور مبنایی در کنترل‌های مهندسی و مدیریتی نانو ذرات تاکید دارد [۸۰]. با توجه به اهمیت مواجهات زمینه‌ای با نانو ذرات، توجه به زمان اندازه‌گیری ضروری می‌باشد. تراکم نانو ذرات قبل از انجام یک فرآیند یا فعالیت، به عنوان مواجهه زمینه تلقی شده و اندازه‌گیری مقادیر آن می‌تواند میزان افزایش مواجهه با نانو ذره در طی فرایند مورد نظر را مشخص نماید [۷۷]. لذا در بسیاری از پروتکل‌های ارزیابی در محیط‌های کار، روش مقایسه تراکم نانو ذرات قبل و بعد از انجام فرآیند برای اندازه‌گیری تراکم زمینه پیشنهاد می‌شود [۹و ۸۲-۸۱]. به طور کلی، امکان شناسایی مخاطرات و تأیید روش‌های سنجش و کنترل در ارتباط با ایمن بودن فعالیت‌های محیط‌های کار، از طریق ارزیابی ریسک دوره‌ای مقدور می‌گردد.



شکل ۱: انباشتگی نانو ذرات: الف) انباشتگی همگن، ب) انباشتگی ناهمگن

مطالعات حاکی از آن است که گروه‌های شغلی مختلف به لحاظ تازه یا کهنه بودن نانو ذرات از نظر فرایند تولید، مواجهات متفاوتی را تجربه می‌کنند. زیرا در فرایندهای شغلی نزدیک به منبع انتشار، در مقایسه با نقاط دورتر از منبع (حاوی ذرات کهنه‌تر با توزیع اندازه متفاوت)، غلظت بالاتری از ذرات تازه تولیدشده وجود دارد. نتایج مطالعه راماچانران (Ramachandran) و همکاران (۲۰۰۵)، حاکی از وجود تفاوت در مواجهه با نانو ذرات خروجی دیزلی در ۳ گروه مختلف (رانندگان اتوبوس، مکانیک‌های اتوبوس و سرپرستان پارکینگ وسایل نقلیه) می‌باشد. در این تحقیق، با توجه به انباشتگی و تراکم آئروسل‌های خروجی از دیزل، مکانیک‌ها با

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-16]

مقادیر تازه، و رانندگان و سرپرستان پارکینگ با مقادیر کهنه این نانو ذرات در مواجهه بودند [۸۳]. لذا، قبل از انتخاب روش ارزیابی نانو ذرات، شناسایی ماهیت، منابع، نحوه انتشار آلودگی و فاصله منبع انتشار ذرات نانو از محل فعالیت افراد، اثر معنی‌داری بر انتخاب نوع روش سنجش نانو ذره مورد نظر در مرحله پیش ارزیابی خواهد داشت. طبق تعریف، نانو ذره حداقل دارای یک بعد کمتر از ۱۰۰ نانومتر می‌باشد، درحالی‌که اندازه نانو ذرات ایجادشده در محیط‌های صنعتی و شغلی، ممکن است اختصاصاً زیر ۱۰۰ نانومتر نباشند و همان‌گونه که قبلاً اشاره شد، در فواصل دور از منبع انتشار به دلیل انباشتگی و چسبندگی این ذرات به یک دیگر، ممکن است ذراتی با ابعاد بزرگ‌تر ایجاد گردد [۶۶].

در بسیاری از موارد، نوع فرآیند کار نیز می‌تواند باعث تغییر در خواص نانو ذره گردد [۷۶و۸۴]. در محیط‌هایی که انحراف معیار توزیع اندازه ذرات پایین است (ذرات همگن)، وجود رابطه بین متغیرهای تراکم تعداد، مساحت سطح و تراکم جرمی ذرات قابل انتظار است، اما با توجه به ناهمگن بودن ذرات در اکثر محیط‌های صنعتی، امکان وجود این رابطه ضعیف است. لذا، جهت سنجش و ارزیابی نانو ذرات در محیط‌های کار، بایستی از روش‌های چندگانه استفاده نمود [۶۶]. اندازه‌گیری تراکم جرمی که یک روش قدیمی جهت ارزیابی مواجهه با ذرات هوابرد، و اساس تنظیم آیین‌نامه‌ها و حدود مواجهه مبتنی بر جرم در ایستگاه‌های کاری است، همیشه روش مناسبی در ارتباط با نانو ذرات نمی‌باشد. علی‌رغم زیاد بودن تعداد نانو ذرات، بررسی ریسک بهداشتی مبتنی بر تراکم جرمی، به دلیل جرم اندک ذرات، سبب بی‌اهمیت تلقی شدن سمیت نانو ذرات می‌گردد. نتایج مطالعات انجام‌شده نیز نشان می‌دهد که تراکم تعداد، نشانگر بهداشتی بهتری از تراکم جرمی ذرات است [۸۶-۸۵]. بعضی مطالعات سطح نانو ذرات را با اثرات بهداشتی آن مرتبط می‌دانند [۴و ۸۸-۸۷]. نکته قابل تأمل در خصوص سمیت نانو مواد که در مطالعات مختلف نیز بر آن تاکید شده، این واقعیت است که مواجهه با نانو ذرات حتی در مقادیر اندک، برای سلامت انسان زیان‌آور می‌باشد [۲۹].

وسایل اندازه‌گیری

انتخاب وسایل اندازه‌گیری و ارزیابی مواجهه با نانو ذرات در محدوده‌های گوناگون، با توجه به فاکتورهای مختلفی صورت می‌گیرد (شکل ۲). پژوهش پترز (Peters) و همکاران (۲۰۰۶) نشان داد که نانو ذرات لیتیم تیتانات، توده‌های کروی شکل در ابعاد بین ۲۰۰ نانومتر تا ۱۰ میکرومتر تشکیل داده‌اند [۸۹]. در مطالعه دمو (Demou) و همکاران (۲۰۰۸) در تأسیسات تولیدی نانو ذرات مهندسی شده، بیش‌ترین غلظت مربوط به نانو ذرات بین ۱۶۰ تا ۲۰۰ نانومتر بوده است [۹۰]. پارک (Park) و همکاران (۲۰۰۹) اندازه نانو ذرات نقره در یک تأسیسات صنعتی را بین ۳۰ تا ۴۰ نانومتر به دست آوردند [۹۱].

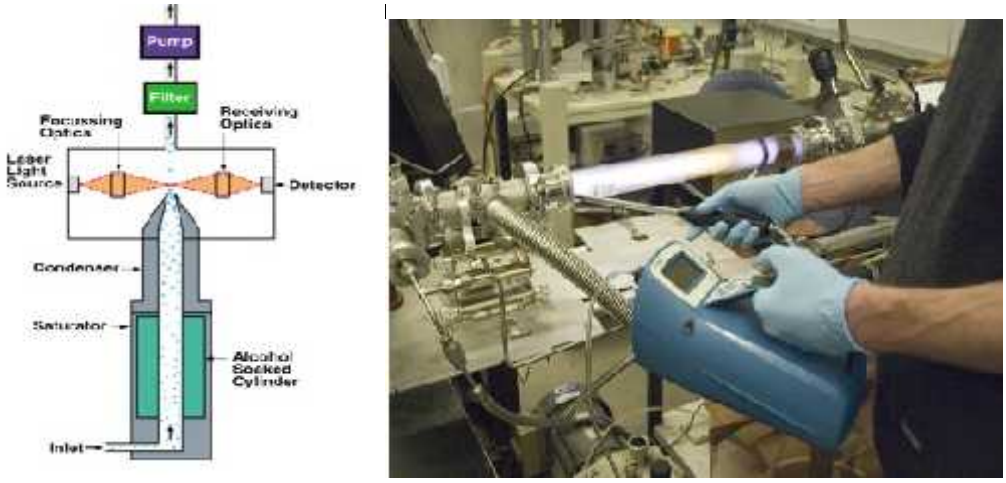


شکل ۱: الف) طیف جذبی UV-VIS-NIRنانوذرات نقره، و ب) تصویر SEM نانوذرات نقره

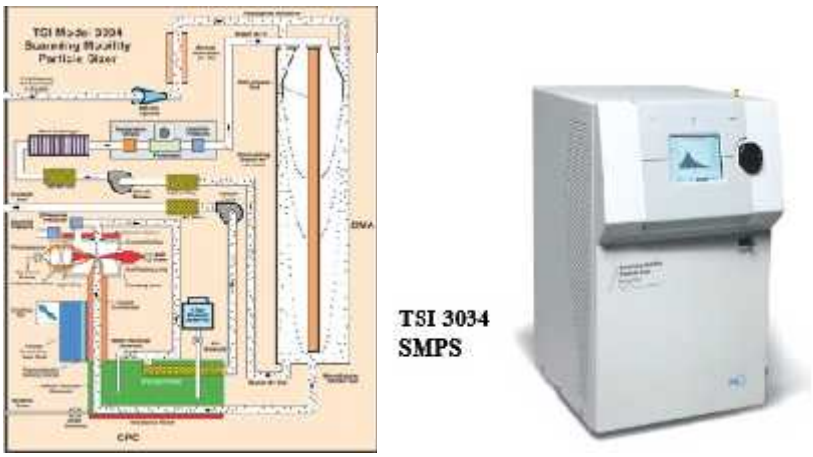
مطالعات نشان می‌دهد که مواجهه با منابع تولید نانو ذره الزاماً محدود به ذرات زیر ۱۰۰ نانومتر نشده، و لذا وسایل اندازه‌گیری باید قادر به ارزیابی دامنه وسیعی از اندازه ذرات باشد چرا که نانو ذرات به هم چسبیده و انباشته ممکن است کماکان خصوصیات نانو ذره را دارا باشند. همچنین با توجه به قابلیت‌های متفاوت وسایل سنجش بر حسب اندازه ذره، در انتخاب نوع پایش بایستی به قابلیت‌های وسیله اندازه‌گیری نیز توجه شود تا بتوان ارزیابی بهینه و کامل‌تری از منابع انتشار نانو ذره و مواجهه افراد ارائه نمود. مقایسه محدوده‌های قابل اندازه‌گیری در ارتباط با وسایل و تجهیزات مورد بررسی در این پژوهش به اختصار در جدول یک

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-16]

آورده شده است. یکی از این وسایل، شمارشگر نوری ذره (Optical Particle Counter) یا OPC بوده که قادر به سنجش اندازه و تراکم تعداد ذرات به ترتیب در محدوده ۲۰-۰/۳ میکرومتر و ۲۰۰۰-۰ ذره در هر سانتی‌متر مکعب می‌باشد. نوع دیگر شمارشگر چگالشی ذره (Condensation Particle Counter) یا CPC (شکل ۳) می‌باشد، که به وسیله آن می‌توان اندازه و تراکم تعداد ذرات را به ترتیب در محدوده ۱۰۰۰-۱۰ نانومتر از ۱۰۰۰۰۰-۰ ذره در هر سانتی‌متر مکعب قرائت نمود. این ۲ وسیله دارای محدودیت‌هایی نیز می‌باشند. شمارشگر نوری به تفکیک اندازه، ذرات را شمارش نموده اما قادر به ارائه پاسخ برای ذرات زیر ۳۰۰ نانومتر نمی‌باشد. درحالی‌که دستگاه شمارشگر چگالشی قادر به تفکیک ذره بر مبنای اندازه نبوده، و لذا در نمونه‌برداری کیفی باهدف تعیین تغییرات نسبی در اندازه و تعداد ذرات و نیز در شناسایی منابع انتشار مورد استفاده قرار می‌گیرد [۹و۸۴]. دستگاه سنجش روبشی اندازه ذره (Scanning Mobility Particle Sizer) یا SMPS (شکل ۴) که از ترکیب ۲ بخش تجزیه‌گر افتراقی (Differential Mobility Analyzing) یا DMA و شمارشگر چگالشی تشکیل شده، نیز برای پایش توزیع اندازه ذرات به کار می‌رود. که نیاز به استفاده از منبع پرتوزا، از جمله محدودیت‌های آن به شمار می‌رود. در تحقیقات انجام‌شده، از این دستگاه جهت تعیین اندازه ذرات کربن و اکسیدهای فلزی استفاده شده است [۹۳-۹۲].



شکل ۳- شمارشگر چگالشی ذره (Condensation Particle Counter) یا CPC



شکل ۴- دستگاه سنجش روبشی اندازه ذره (Scanning Mobility Particle Sizer)

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-16]

دستگاه سنجش سریع اندازه ذره (Fast Mobility Particle size) یا FMPS با پایش بر مبنای توزیع اندازه ذره، نانو ذرات را در زمانی حدود چند ثانیه اندازه‌گیری می‌کند. ولی نسبت به SMPS، توانایی کم‌تری جهت تفکیک ذرات کوچک‌تر دارد. در پایش اندازه نانو ذرات، ایمپکتور الکتریکی با فشار پایین (Electrical Low Pressure Impactor) یا ELPI از جمله دستگاه‌هایی است که ذرات را براساس قطرآئرودینامیکی آن سنجش و تفکیک می‌نماید. در این وسایل، فرآیند تفکیک صرفاً بر مبنای اندازه ذرات انجام می‌گردد و به دلیل حجم بالا، امکان نمونه‌برداری فردی با آن وجود ندارد [۹۴]. توزیع اندازه و غلظت نانو ذرات، پارامترهای مفیدی جهت شناسایی منابع تولید ذرات می‌باشد [۹۲و۹۵]. دستگاه شارژر نفوذی (Diffusion Charger) یا DC که بر مبنای میزان سطح ذره با استفاده از الکترومتر عمل می‌کند اما، از آن جا که اطلاعاتی از قطر ذره ارائه نمی‌کند، قادر به ایجاد تمایز بین انواع نانو ذرات نمی‌باشد [۸۴و ۹۷-۹۶]. پایش گر سطحی آئروسل (Nanoparticle Surface Area Monitor) یا NSAM نیز یک نوع DC بوده که قادر به سنجش مساحت سطح ذرات قابل ته‌نشینی در منطقه آلوئولی سیستم تنفسی انسان می‌باشد [۸۴]. فتومترهای نوری پرتابل که در تخمین تراکم جرمی ذرات از خاصیت پراکندگی نور استفاده می‌کنند، قادر به سنجش نانو ذرات با چسبندگی و انباشتگی بیش‌تر از ۳۰۰ نانومتر می‌باشند. مزیت عمده این نوع وسایل، ارائه پاسخ سریع در برابر تغییرات تراکم ذره می‌باشد. مطالعات حاکی از آن است که این وسیله برای پایش و تعیین تراکم نانوفیبرهای کربنی با توجه به بزرگ‌تر بودن اندازه آن‌ها نسبت به سایر انواع نانو ذرات، مناسب می‌باشد [۴۶]. جهت پایش جرمی، از نمونه‌برداری با استفاده از فیلتر و تجزیه به روش شیمیایی و یا استفاده از میکروسکوپ الکترونی نیز می‌توان استفاده نمود [۹و۸۴]. از میکروسکوپ الکترونی جهت تعیین ترکیبات عنصری و ریخت‌شناسی ذرات و نیز تشخیص ذرات خیلی ریزی که توسط سایر وسایل اندازه‌گیری قابل‌شناسایی نیستند، استفاده می‌شود [۸۴]. محدوده‌های تشخیص دستگاه‌های سنجش نانو ذرات در جدول ۱ نشان داده شده است.

بلو (Bello) و همکاران (۲۰۰۹) از FMPS و CPC به ترتیب برای سنجش تراکم عددی ذرات آئروسل در گستره ۵۶۰-۵/۶ نانومتر و تراکم تعداد ذرات نانو ذرات مهندسی شده رهاشده در محیط آزمایشگاه تحقیقات دانشگاه استفاده نمودند[۴۴]. فوجیتانی (Fujitani) و همکاران (۲۰۰۸) در ارزیابی مواجهه استنشاقی با نانو ذرات کربنی در یک کارخانه تولید فلوران، برای سنجش خواص فیزیکی آئروسل‌ها از SMPS استفاده نمودند [۹۵].

دستگاه اندازه‌گیری	محدوده تشخیص
شمارشگر نوری ذره یا OPC	۰/۳ تا ۲۰ میکرومتر
شمارشگر چگالشی ذره یا CPC	۱۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر
دستگاه سنجش روبشی اندازه ذره یا SMPS	کمتر از یک میکرومتر
دستگاه سنجش سریع اندازه ذره یا FMPS	۵/۶ تا ۵۶۰ نانومتر
ایمپکتور الکتریکی با فشار پایین یا ELPI	۲۸ تا ۴۱۰ نانومتر
دستگاه شارژر نفوذی یا DC	کمتر از ۱۰۰ نانومتر
پایش گر سطحی آئروسل یا NSAM	۱۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر
فتومترهای نوری پرتابل	۰/۳ تا ۲۰ میکرومتر

پترز (Peters) و همکاران (۲۰۰۹) برای پایش نانو ذرات مهندسی شده هوابرد و تشخیص آن‌ها از سایر ذرات هوابرد در یک کارخانه تولید نانو ذرات اکسید فلزی لیتیم تیتانات، از CPC استفاده و تراکم تعداد ذرات را در محدوده ۱۰۰۰-۱۰ نانومتر مورد سنجش قراردادند [۷۳]. در تحقیق دیگری که توسط لی (Lee) و همکاران (۲۰۱۱) به انجام رسید، برای ارزیابی مواجهه محیط‌های کاری تولیدکننده نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم و نقره از SPMS و CPC استفاده، و تراکم تعداد ذرات در مراحل مختلف تولید مورد ارزیابی قرار گرفت [۹۳]. در مطالعه پارک (Park) و همکاران (۲۰۰۹) برای تعیین تراکم تعداد نانو ذرات نقره در یک راکتور صنعتی، از SMPS استفاده شد [۹۱]. میلر (Miller) و همکاران (۲۰۱۰) با استفاده از FMPS، مواجهه با یون‌های فلزی هوابرد و انتشار نانو ذرات را در یک پالایشگاه مورد بررسی قرار داده و تراکم تعداد نانو ذرات در اطراف کوره در زمان قالب ریزی را تا ۱۰۰۰ برابر بیش‌تر به دست آوردند [۹۸]. انتشار نانو ذرات سیلیکون در یک واحد تولیدی با استفاده از دستگاه‌های سنجش تعداد (CPC, FMPS)، مساحت سطح ذره قابل ته‌نشینی در ریه (NSAM) و توزیع اندازه (SPMS)، توسط وانگ (Wang) و همکاران (۲۰۱۲) مورد ارزیابی قرار گرفت. عدم حضور نانو ذرات در طی مراحل سنتز، جمع‌آوری و بسته‌بندی و عدم انتشار نانو ذرات، به بسته فرایند تولید در این واحد تولیدی نسبت داده شد (۱۲). در مطالعه کیم (Kim) و همکاران (۲۰۱۳) در یک صنعت لاستیک سازی، جهت ارزیابی مواجهه با نانو ذراتی مانند کربن

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-16]

بلک و سیلیس که در فرآیند تولید لاستیک استفاده می‌شوند، ابتدا نقشه تراکم تعداد ذرات در مراحل مختلف ساخت لاستیک با استفاده از دستگاه CPC به دست آمده و سپس با روش فیلتراسیون، وضعیت انباشتگی ذرات در اندازه نانو در مراحل انتهایی فرآیند ساخت لاستیک مورد بررسی قرار گرفت. طبقه‌بندی اندازه ذرات با به‌کارگیری ELPI و مساحت سطح با استفاده از NSAM تعیین، و برای ریخت‌شناسی و ترکیب شیمیایی ذرات نیز از میکروسکوپ الکترونی استفاده گردید [۶۵]. مواردی از مطالعات و تحقیقات انجام‌شده در راستای ارزیابی مواجهه با نانو ذرات در محیط‌های شغلی و آزمایشگاهی در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲- مطالعات ارزیابی مواجهه شغلی با نانو ذرات

عرصه مطالعاتی	نانو ذره مورد مطالعه	وسیله اندازه‌گیری	مرجع
آزمایشگاه تحقیقات دانشگاه	نانو لوله‌های کربنی	CPC, FMPS	[۴۴]
تأسیسات صنعتی تولید و جابجایی نانو ذرات کربنی	فلوران کبالت ۶۰	SMPS	[۹۵]
تأسیسات صنعتی	نانو ذرات نقره	SMPS	[۹۱]
کارخانه‌ها تولید نانو ذره	اکسید فلزی تیتانات لیتیم	CPC, OPC	[۷۳]
کارخانه‌ها تولید نانو ذره	اکسید تیتانیوم و نقره	CPC, SPMS	[۹۳]
کارخانه‌ها تولید نانو ذره سیلیکون	نانو ذرات سیلیکون	CPC, FMPS, NSAM, SMPS	[۱۲]
کارخانه‌ها تولید نانو ذره	نانو ذرات مس، آلومینیوم و نقره	CPC, SMPS	[۹۹]
صنایع ساختمانی اروپا	نانو ذرات اکسید سیلیس و تیتانیوم	DC	[۱۰۰]
پالایش فلزات قیمتی	نانو ذرات نقره، روی و سلنیوم	FMPS	[۹۸]
صنعت ذوب‌آهن	ذرات اکسید فلزی	CPC, SMPS	[۱۰۱]
کارخانه‌ها تولید نانو ذره	نانو ذرات اکسید سیلیس، کربنات کلسیم و کربن بلک	Respirable Cyclone, Cascade Impactors (MOUD), SMPS, TEM	[۱۰۲]
تأسیسات کارگاهی تولید نانو ذره	نانو ذره	CPC, SMPS	[۹۰]
کارخانه‌ها تولید نانو ذره	نانو ذرات نقره	Filter, CPC, SMPS	[۱۰۳]
کارخانه لاستیک سازی	نانو ذره (دود لاستیک)	Filter, ELPI, CPC, NSAM, TEM	[۶۵]
سازندگان نانو لوله‌ها و نانوفیبرهای کربنی	نانو لوله‌ها و نانوفیبرهای کربنی	Filter, TEM	[۷۹]
کارخانه سنتی چینی‌سازی	نانو ذره	SMPS, OPC, EDX	[۱۰۴]
کارخانه تولید نانو ذره	نانو سیلیس	SMPS, NSAM, Filter, FTIR, TEM, EDS	[۹۷]
ذوب‌آهن صنعت خودرو	نانو ذره حاصل از فرآیند گرم	OPC, ELPI	[۴۶]
آزمایشگاه	پلی‌استایرن لاتکس، کلرید سدیم، نقره	Nuclepore Filter, SEM	[۱۰۵]
کارخانه سازنده پودر دی‌اکسید تیتانیوم	دی‌اکسید تیتانیوم	CPC, SEM	[۶۳]

بحث

مهم‌ترین نکته مورد تاکید در بسیاری از مطالعات انجام‌شده در زمینه ارزیابی مواجهه شغلی با نانو ذرات، استفاده هم‌زمان از چند روش اندازه‌گیری جهت تمایز معنی‌دار نانو ذرات از سطوح زمینه می‌باشد. فاکتورهای موثر و مناسب در انتخاب روش ارزیابی شامل صحت، حساسیت و ویژگی، هزینه، سهولت کاربرد، کالیبراسیون، غلظت مواجهه و اندازه دستگاه نیز در جایگاه بعدی اهمیت قرار دارند. در مطالعات مربوط به ارزیابی پارامترهای نانو ذرات، ارتباط مناسبی میان تراکم تعداد نانو ذرات و تراکم جرمی آن‌ها به ویژه در اندازه‌های بیش‌تر از ۱ میکرومتر گزارش شده است. همچنین نشان داده‌شده که هیچ‌یک از وسایل سنجش نانو ذرات، قابلیت ارزیابی مواجهه فردی را نداشته و فقط میزان مواجهه محیطی را اندازه‌گیری می‌کنند [۷۶]. بنابراین، روش‌های ارزیابی بر اساس خواص نانو مواد، شرایط مواجهه و ویژگی منابع انتشار متفاوت بوده و استفاده هم‌زمان از چند روش، با توجه به ویژگی‌های منحصربه‌فرد هر روش، می‌تواند به شناسایی منابع انتشاری ذره در محیط، و تخمین مواجهه افراد کمک نماید. نتایج مطالعه‌ای که باهدف تجزیه شیمیایی نانو ذرات قابل استنشاق در نمونه‌های جمع‌آوری شده از کارخانه‌ها تولید نانو ذرات اکسید سیلیس،

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-16]

کربنات کلسیم و کربن بلک با استفاده از میکروسکوپ الکترونی انجام‌شده، حاکی از آن است که اندازه‌گیری ذرات قابل استنشاق نقش زیادی در تعیین هویت و نوع مواجهه با نانو ذرات داشته، و تراکم تعداد و تراکم جرمی نانو ذرات تولیدشده نزدیک به سطوح زمینه می‌باشد. همچنین مشاهده نانو ذرات بزرگ‌تر در نمونه‌های قابل استنشاق، انباشتگی نانو ذرات، یا اتصال آن‌ها به ذرات بزرگ‌تر را تأیید می‌کند [۱۰۲].

دستگاه‌های سنجش تراکم تعداد و توزیع اندازه ذرات بیش‌ترین استفاده را در مطالعات مربوطه داشته است [۸۱و۹۷]. تعداد زیادی از مطالعات، بر ارزیابی تراکم جرمی ذرات با استفاده از فیلتر تاکید دارند [۱۳و۷۹و۱۰۳]. البته محدودیت ناشی از انجام فعالیت‌ها در فاصله دورتر و یا زمان کوتاه‌تر نیز در سنجش نمونه محیطی حائز اهمیت می‌باشد [۹۷]. بنابراین با توجه به گستره وسیع سناریوهای مواجهه و انواع نانو ذرات مهندسی شده، رسیدن به یک مفهوم کلی از پتانسیل مواجهه در فعالیت‌های مرتبط با نانو مواد مشکل می‌باشد. هرچند استفاده از روش‌ها و وسایل موجود در ردیابی منابع انتشار و نشت حاصل از آن‌ها بسیار کمک‌کننده خواهد بود. تحقیق حاضر نشان داد که تعیین اندازه نانو ذرات معیار مناسبی جهت برآورد ریسک مواجهه با نانو ذرات مهندسی شده می‌باشد، اما قادر به تفکیک نانو ذرات مهندسی شده از سطوح زمینه نمی‌باشد. نتایج همچنین نشان داد که دستگاه سنجش روبشی اندازه ذره (SMPS) بیش‌ترین استفاده را جهت سنجش تعداد و توزیع اندازه ذرات در تحقیقات داشته است.

مطالعات نشان می‌دهد که علی‌رغم پیشرفت‌های چشم‌گیر فناوری نانو و تلاش‌های زیادی که در جهت برطرف نمودن مشکلات مختلف ناشی از مواجهه شغلی با نانو مواد در محیط‌های کار حاصل‌شده، کماکان استاندارد بین‌المللی مشخص و تأییدشده‌ای جهت ارزیابی مواجهه با نانو ذرات معرفی نشده است. از آن‌جائی‌که نتایج مطالعات بر امکان‌پذیر بودن ارزیابی مواجهه شغلی با نانو ذرات از طریق شناسایی و تحلیل ویژگی (تراکم تعداد، تراکم جرمی و مساحت سطح) ذرات با استفاده از روش‌ها و وسایل نمونه‌برداری و تجزیه تاکید دارد، لذا جهت رسیدن به یک استاندارد مناسب و معتبر، پیشنهاد می‌گردد که در تحقیقات آینده به بررسی صحت و دقت وسایل ارزیابی مواجهه با نانو ذرات پرداخته شود.

نتیجه‌گیری

با توجه به استفاده روزافزون نانو مواد در محیط‌های کار، انتخاب تکنیک و وسایل نمونه‌برداری و ویژگی مناسب، و بررسی میزان اثربخشی آن‌ها جهت ارزیابی مواجهه شغلی با این ترکیبات از اهمیت زیادی برخوردار است. بررسی صحت و دقت وسایل و تجهیزات ارزیابی مواجهه با نانو ذرات، به عنوان موضوعاتی جهت انجام مطالعات آینده، می تواند در رسیدن به یک استاندارد مناسب و معتبر موثر واقع شود.

منابع

1. Lane N, Kalil, T. The National Nanotechnology Initiative: Present at the Creation. Issues in Science and Technology 2005(4).
2. Roco MC. National Nanotechnology initiative: Past, present, future. In: William A. Goddard III DB, et al, editor. Handbook of Nanoscience, Engineering, and Technology Second Edition ed: Taylor & Francis; 2007. p. 19-44
3. Roco MC. Broader Societal Issues of Nanotechnology. Journal of Nanoparticle Research. 2003;5(3-4):181-9.
4. Oberdürster G. Toxicology of ultrafine particles: in vivo studies 2000-10-15. 2719-40 p.
5. Kreyling WG, Semmler M, Erbe F, Mayer P, Takenaka S, Schulz H, et al. Translocation of ultrafine insoluble iridium particles from lung epithelium to extrapulmonary organs is size dependent but very low. Journal of toxicology and environmental health Part A. 2002;65(20):1513-30.
6. Donaldson K, Stone V, Gilmour PS, Brown DM, MacNee W. Ultrafine particles: mechanisms of lung injury2000 2000-10-15. 2741-9 p.
7. Borm PJ, Robbins D, Haubold S, Kuhlbusch T, Fissan H, Donaldson K, et al. The potential risks of nanomaterials: a review carried out for ECETOC. Particle and Fibre Toxicology. 2006;3(1):11.
8. Stern ST, McNeil SE. Nanotechnology safety concerns revisited. Toxicological sciences : an official journal of the Society of Toxicology. 2008;101(1):4-21.
9. Ramachandran G, Ostraat M, Evans DE, Methner MM, O'Shaughnessy P, D'Arcy J, et al. A strategy for assessing workplace exposures to nanomaterials. Journal of occupational and environmental hygiene. 2011;8(11):673-85.
10. Scientific committee on emerging and newly identified health risk. European commission health & consumer protection directorate general. Adopted by the SCENIHR during the 10th plenary meeting of 10 March 2006 after public consultation. http://ec.europa.eu/health/ph_risk

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-16]

/documents/synth_report.pdf
11. Swihart MT. Vapor-phase synthesis of nanoparticles. Current Opinion in Colloid & Interface Science. 2003;8(1):127-33.
12. Wang J, Asbach C, Fissan H, Hülser T, Kaminski H, Kuhlbusch TJ, et al. Emission measurement and safety assessment for the production process of silicon nanoparticles in a pilot-scale facility. Journal of Nanoparticle Research. 2012;14(4):1-9.
13. Curwin B, Bertke S. Exposure characterization of metal oxide nanoparticles in the workplace. Journal of occupational and environmental hygiene. 2011;8(10):580-7.
14. Donaldson K, Tran L, Jimenez LA, Duffin R, Newby DE, Mills N, et al. Combustion-derived nanoparticles: a review of their toxicology following inhalation exposure. Part Fibre Toxicol. 2005;2:10.
15. Crosera M, Bovenzi M, Maina G, Adami G, Zanette C, Florio C, et al. Nanoparticle dermal absorption and toxicity: a review of the literature. International archives of occupational and environmental health. 2009;82(9):1043-55.
16. Bergamaschi E. Occupational exposure to nanomaterials: Present knowledge and future development. Nanotoxicology. 2009;3(3):194-201.
17. Aitken RJ CK, Tran CL Nanoparticles: an occupational hygiene review. . Suffolk, UK: Health & Safety Executive, 2004.
18. Liu Y, Gao Y, Zhang L, Wang T, Wang J, Jiao F, et al. Potential Health Impact on Mice after Nasal Instillation of Nano-Sized Copper Particles and Their Translocation in Mice. Journal of Nanoscience and Nanotechnology. 2009;9(11):6335-43.
19. Geiser M. Update on macrophage clearance of inhaled micro- and nanoparticles. J Aerosol Med Pulm Drug Deliv. 2010;23(4):207-17.
20. Elder A, Gelein R, Silva V, Feikert T, Opanashuk L, Carter J, et al. Translocation of Inhaled Ultrafine Manganese Oxide Particles to the Central Nervous System. Environmental Health Perspectives. 2006;114(8):1172-8.
21. Donaldson KB, D. Clouter, A. Duffin,R. MacNee, W. Renwick, L. Tran, L. Stone, V. The pulmonary toxicology of ultrafine particles J Aerosol Med. 2002;15(2):213-20.
22. Choi HS, Ashitate Y, Lee JH, Kim SH, Matsui A, Insin N, et al. Rapid translocation of nanoparticles from the lung airspaces to the body. Nat Biotech. 2010;28(12):1300-3.
23. Elsaesser A, Howard CV. Toxicology of nanoparticles. Advanced drug delivery reviews. 2012;64(2):129-37.
24. Bakand S, Farshad AA. A review of nanotechnology and nanotoxicology (Editorial). Iran Occupational Health Journal.
25. Wake D, Mark D, Northage C. Ultrafine Aerosols in the Workplace. Annals of Occupational Hygiene. 2002;46(suppl 1):235-8.
26. Shvedova AA, Kisin ER, Mercer R, Murray AR, Johnson VJ, Potapovich AI, et al. Unusual inflammatory and fibrogenic pulmonary responses to single-walled carbon nanotubes in mice. American journal of physiology Lung cellular and molecular physiology. 2005;289(5):L698-708.
27. Renwick LC, Donaldson K, Clouter A. Impairment of alveolar macrophage phagocytosis by ultrafine particles. Toxicology and applied pharmacology. 2001;172(2):119-27.
28. Li N, Sioutas C, Cho A, Schmitz D, Misra C, Sempf J, et al. Ultrafine particulate pollutants induce oxidative stress and mitochondrial damage. Environmental Health Perspectives. 2003;111(4):455-60.
29. Justino CIL, Rocha-Santos TA, Duarte AC. Sampling and characterization of nanoaerosols in different environments. TrAC Trends in Analytical Chemistry. 2011;30(3):554-67.
30. Heitbrink WA, Evans DE, Ku BK, Maynard AD, Slavin TJ, Peters TM. Relationships among particle number, surface area, and respirable mass concentrations in automotive engine manufacturing. Journal of occupational and environmental hygiene. 2009;6(1):19-31.
31. Geiser M, Rothen-Rutishauser B, Kapp N, Schurch S, Kreyling W, Schulz H, et al. Ultrafine particles cross cellular membranes by nonphagocytic mechanisms in lungs and in cultured cells. Environ Health Perspect. 2005;113(11):1555-60.
32. Elihn K, Ulvestad B, Hetland S, Wallen A, Randem BG. Exposure to ultrafine particles in asphalt work. Journal of occupational and environmental hygiene. 2008;5(12):771-9.
33. Elihn K, Berg P. Ultrafine particle characteristics in seven industrial plants. The Annals of occupational hygiene. 2009;53(5):475-84.
34. Castellano PF, R. Curini, R. Canepari, S. An overview of the characterization of occupational exposure to nanoaerosols in workplaces J Phys: Conf Ser. 2009;170(1).
35. Simkó M, Mattsson M-O. Risks from accidental exposures to engineered nanoparticles and neurological health effects: A critical review. Particle and Fibre Toxicology. 2010;7:42-.
36. Oberdorster G, Oberdorster E, Oberdorster J. Nanotoxicology: an emerging discipline evolving from studies of ultrafine particles. Environ Health Perspect. 2005;113(7):823-39.
37. Oberdorster G. Safety assessment for nanotechnology and nanomedicine: concepts of nanotoxicology. Journal of internal medicine. 2010;267(1):89-105.
38. Hesterberg TW, Long CM, Bunn WB, Sax SN, Lapin CA, Valberg PA. Non-cancer health effects of diesel exhaust: a critical assessment of recent human and animal toxicological literature. Critical reviews in toxicology. 2009;39(3):195-227.
39. Bonner JC. Nanoparticles as a potential cause of pleural and interstitial lung disease. Proceedings of the American Thoracic Society. 2010;7(2):138-41.
40. Zhang X-D, Wu D, Shen X, Liu P-X, Yang N, Zhao B, et al. Size-dependent in vivo toxicity of PEG-coated gold

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-16]

nanoparticles. International Journal of Nanomedicine. 2011;6:2071-81.
41. Zhang QL, Li MQ, Ji JW, Gao FP, Bai R, Chen CY, et al. In vivo toxicity of nano-alumina on mice neurobehavioral profiles and the potential mechanisms. International journal of immunopathology and pharmacology. 2011;24(1 Suppl):23s-9s.
42. Pasupuleti S, Alapati S, Ganapathy S, Anumolu G, Pully NR, Prakhya BM. Toxicity of zinc oxide nanoparticles through oral route. Toxicology and industrial health. 2012;28(8):675-86.
43. Abdelhalim MA, Mady MM. Liver uptake of gold nanoparticles after intraperitoneal administration in vivo: a fluorescence study. Lipids in health and disease. 2011;10:195.
44. Bello. D WBL, Ahn. K. Exposure to nanoscale particles and fibers during fabrication and machining of hybrid CNT advanced composites. Journal of Nanoparticle Research. 2009;11(1):231-49.
45. Tsai SJ HM, Hallock M et al . Characterization and Evaluation of Nanoparticle Release during the Synthesis of Single Walled and Multiwalled Carbon Nanotubes by Chemical Vapor Deposition. Environ Sci Technol. 2009 43(15):6017–23.
46. Evans DE, Ku BK, Birch ME, Dunn KH. Aerosol Monitoring during Carbon Nanofiber Production: Mobile Direct-Reading Sampling. Annals of Occupational Hygiene. 2010;54(5):514-31.
47. Methner M, Hodson L, Geraci C. Nanoparticle emission assessment technique (NEAT) for the identification and measurement of potential inhalation exposure to engineered nanomaterials--part A. Journal of occupational and environmental hygiene. 2010;7(3):127-32.
48. Birch ME, Ku BK, Evans DE, Ruda-Eberenz TA. Exposure and emissions monitoring during carbon nanofiber production--Part I: elemental carbon and iron-soot aerosols. The Annals of occupational hygiene. 2011;55(9):1016-36.
49. Schulte PG, CL. Hodson,L. Zumwalde, R. Castranova, V. Kuempel, E. . Nanotechnologies and Nanomaterials in the Occupational Setting. Ital J Occup Environ Hyg. 2010;1(2):63-8.
50. Lam CW, James JT, McCluskey R, Arepalli S, Hunter RL. A review of carbon nanotube toxicity and assessment of potential occupational and environmental health risks. Critical reviews in toxicology. 2006;36(3):189-217.
51. Donaldson K, Aitken R, Tran L, Stone V, Duffin R, Forrest G, et al. Carbon nanotubes: a review of their properties in relation to pulmonary toxicology and workplace safety. Toxicological sciences : an official journal of the Society of Toxicology. 2006;92(1):5-22.
52. Jana NR, Sau, T.K, Pal, T. Growing Small Silver Particle as Redox Catalyst. J Phys Chem B. 1999;103(1):115–21.
53. Baia L, Baia M, Kiefer W, Popp J, Simon S. Structural and morphological properties of silver nanoparticles–phosphate glass composites. Chemical Physics. 2006;327(1):63-9.
54. Feng QL, Cui FZ, Kim TN, Kim JW. Ag-Substituted Hydroxyapatite Coatings with Both Antimicrobial Effects and Biocompatibility. Journal of Materials Science Letters. 1999;18(7):559-61.
55. Robichaud CO, Uyar AE, Darby MR, Zucker LG, Wiesner MR. Estimates of upper bounds and trends in nano-TiO2 production as a basis for exposure assessment. Environmental science & technology. 2009;43(12):4227-33.
56. Gao Y, Luo Z, He N, Wang M. Metallic nanoparticle production and consumption in China between 2000 and 2010 and associative aquatic environmental risk assessment. Journal of Nanoparticle Research. 2013;15(6):1-9.
57. Weir AW, Paul; Fabricius, Lars; Hristovski, Kiril; von Goetz, Natalie. Titanium Dioxide Nanoparticles in Food and Personal Care Products. Environ Sci Technol. 2012;46(4):2242–50.
58. Dell LD, Mundt KA, Luippold RS, Nunes AP, Cohen L, Burch MT, et al. A cohort mortality study of employees in the U.S. carbon black industry. Journal of occupational and environmental medicine / American College of Occupational and Environmental Medicine. 2006;48(12):1219-29.
59. Morfeld P, Buchte SF, Wellmann J, McCunney RJ, Piekarski C. Lung cancer mortality and carbon black exposure: Cox regression analysis of a cohort from a German carbon black production plant. Journal of occupational and environmental medicine / American College of Occupational and Environmental Medicine. 2006;48(12):1230-41.
60. Ramanakumar AV, Parent ME, Latreille B, Siemiatycki J. Risk of lung cancer following exposure to carbon black, titanium dioxide and talc: results from two case-control studies in Montreal. International journal of cancer Journal international du cancer. 2008;122(1):183-9.
61. Liou S-H, Tsou T-C, Wang S-L, Li L-A, Chiang H-C, Li W-F, et al. Epidemiological study of health hazards among workers handling engineered nanomaterials. Journal of Nanoparticle Research. 2012;14(8):1-15.
62. Maynard A, Kuempel E. Airborne Nanostructured Particles and Occupational Health. Journal of Nanoparticle Research. 2005;7(6):587-614.
63. Yi Yang PM, Zheng-Ping Wang, Jin-Hua Zhang Distribution of Nanoparticle Number Concentrations at a Nano-TiO2 Plant. Aerosol and Air Quality Research. 2012;12(5):934–40.
64. Faghihi EM, Morawska L. Occupational Release of Engineered Nanoparticles: A Review. Part of the series The Handbook of Environmental Chemistry, 2015, pp 1-19
65. Kim B , Lee JS, Choi BS, Park SY, Yoon JH, Kim H. Ultrafine particle characteristics in a rubber manufacturing factory. The Annals of occupational hygiene. 2013;57(6):728-39.

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-16]

66. Luo Z-x, Wang Z-h, Xu B, Sarakiotis I, Laing G, Yan C-z. Measurement and characterization of engineered titanium dioxide nanoparticles in the environment. J Zhejiang Univ Sci A. 2014;15(8):593-605.
67. Brouwer DH, Gijsbers JH, Lurvink MW. Personal exposure to ultrafine particles in the workplace: exploring sampling techniques and strategies. The Annals of occupational hygiene. 2004;48(5):439-53.
68. Oberdörster G, Ferin J, Lehnert BE. Correlation between particle size, in vivo particle persistence, and lung injury. Environmental Health Perspectives. 1994;102(Suppl 5):173-9.
69. Oberdörster G, Ferin J, Gelein R, Soderholm SC, Finkelstein J. Role of the alveolar macrophage in lung injury: studies with ultrafine particles. Environmental Health Perspectives. 1992;97:193-9.
70. Oberdorster G. Lung particle overload: implications for occupational exposures to particles. Regulatory toxicology and pharmacology : RTP. 1995;21(1):123-35.
71. Shepard MN, Brenner S. An occupational exposure assessment for engineered nanoparticles used in semiconductor fabrication. The Annals of occupational hygiene. 2014;58(2):251-65.
72. Limbach LK, Li Y, Grass RN, Brunner TJ, Hintermann MA, Muller M, et al. Oxide nanoparticle uptake in human lung fibroblasts: effects of particle size, agglomeration, and diffusion at low concentrations. Environmental science & technology. 2005;39(23):9370-6.
73. Peters TM, Elzey S, Johnson R, Park H, Grassian VH, Maher T, et al. Airborne monitoring to distinguish engineered nanomaterials from incidental particles for environmental health and safety. Journal of occupational and environmental hygiene. 2009;6(2):73-81.
74. Seipenbusch M, Binder A, Kasper G. Temporal evolution of nanoparticle aerosols in workplace exposure. The Annals of occupational hygiene. 2008;52(8):707-16.
75. Handy RD, von der Kammer F, Lead JR, Hassellov M, Owen R, Crane M. The ecotoxicology and chemistry of manufactured nanoparticles. Ecotoxicology (London, England). 2008;17(4):287-314.
76. Brouwer D. Exposure to manufactured nanoparticles in different workplaces. Toxicology. 2010;269(2-3):120-7.
77. Brouwer D, van Duuren-Stuurman B, Berges M, Jankowska E, Bard D, Mark D. From workplace air measurement results toward estimates of exposure? Development of a strategy to assess exposure to manufactured nano-objects. Journal of Nanoparticle Research. 2009;11(8):1867-81.
78. Beurskens-Comuth PA, Verbist K, Brouwer D. Video exposure monitoring as part of a strategy to assess exposure to nanoparticles. The Annals of occupational hygiene. 2011;55(8):937-45.
79. Dahm MM, Evans DE, Schubauer-Berigan MK, Birch ME, Deddens JA. Occupational exposure assessment in carbon nanotube and nanofiber primary and secondary manufacturers: mobile direct-reading sampling. The Annals of occupational hygiene. 2013;57(3):328-44.
80. Schulte P, Geraci C, Zumwalde R, Hoover M, Kuempel E. Occupational risk management of engineered nanoparticles. Journal of occupational and environmental hygiene. 2008;5(4):239-49.
81. Kuhlbusch TAJ, Asbach C, Fissan H, Göhler D, Stintz M. Nanoparticle exposure at nanotechnology workplaces: A review. Particle and Fibre Toxicology. 2011;8:22-.
82. Brouwer D, Berges M, Virji MA, Fransman W, Bello D, Hodson L, et al. Harmonization of measurement strategies for exposure to manufactured nano-objects; report of a workshop. The Annals of occupational hygiene. 2012;56(1):1-9.
83. Ramachandran G, Paulsen D, Watts W, Kittelson D. Mass, surface area and number metrics in diesel occupational exposure assessment. Journal of environmental monitoring : JEM. 2005;7(7):728-35.
84. Duarte K, Justino CIL, Freitas AC, Duarte AC, Rocha-Santos TAP. Direct-reading methods for analysis of volatile organic compounds and nanoparticles in workplace air. TrAC Trends in Analytical Chemistry. 2014;53(0):21-32.
85. Peters A, Wichmann HE, Tuch T, Heinrich J, Heyder J. Respiratory effects are associated with the number of ultrafine particles. American journal of respiratory and critical care medicine. 1997;155(4):1376-83.
86. McCawley MA, Kent MS, Berakis MT. Ultrafine beryllium number concentration as a possible metric for chronic beryllium disease risk. Applied occupational and environmental hygiene. 2001;16(5):631-8.
87. Brown DM, Wilson MR, MacNee W, Stone V, Donaldson K. Size-dependent proinflammatory effects of ultrafine polystyrene particles: a role for surface area and oxidative stress in the enhanced activity of ultrafines. Toxicology and applied pharmacology. 2001;175(3):191-9.
88. Maynard AD, Maynard RL. A derived association between ambient aerosol surface area and excess mortality using historic time series data. Atmospheric Environment. 2002;36(36–37):5561-7.
89. Peters TM, Heitbrink WA, Evans DE, Slavin TJ, Maynard AD. The mapping of fine and ultrafine particle concentrations in an engine machining and assembly facility. The Annals of occupational hygiene. 2006;50(3):249-57.
90. Demou E, Peter P, Hellweg S. Exposure to manufactured nanostructured particles in an industrial pilot plant. The Annals of occupational hygiene. 2008;52(8):695-706.
91. Park J, Kwak B, Bae E, Lee J, Kim Y, Choi K, et al. Characterization of exposure to silver nanoparticles in a manufacturing facility. Journal of Nanoparticle Research. 2009;11(7):1705-12.
92. Yeganeh B, Kull CM, Hull MS, Marr LC. Characterization of Airborne Particles During Production of Carbonaceous Nanomaterials. Environmental science & technology. 2008;42(12):4600-6.
93. Lee JH, Kwon M, Ji JH, Kang CS, Ahn KH, Han JH, et al. Exposure assessment of workplaces manufacturing

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-16]

nanosized TiO2 and silver. Inhalation toxicology. 2011;23(4):226-36.
94. Heim M, Kasper G, Reischl GP, Gerhart C. Performance of a New Commercial Electrical Mobility Spectrometer. Aerosol Science and Technology. 2004;38(sup2):3-14.
95. Fujitani Y, Kobayashi T, Arashidani K, Kunugita N, Suemura K. Measurement of the physical properties of aerosols in a fullerene factory for inhalation exposure assessment. Journal of occupational and environmental hygiene. 2008;5(6):380-9.
96. Asbach C, Kaminski H, Fissan H, Monz C, Dahmann D, Mülhopt S, et al. Comparison of four mobility particle sizers with different time resolution for stationary exposure measurements. Journal of Nanoparticle Research. 2009;11(7):1593-609.
97. Kim B, Kim H, Yu IJ. Assessment of nanoparticle exposure in nanosilica handling process: including characteristics of nanoparticles leaking from a vacuum cleaner. Industrial health. 2014;52(2):152-62.
98. Miller A, Drake PL, Hintz P, Habjan M. Characterizing exposures to airborne metals and nanoparticle emissions in a refinery. The Annals of occupational hygiene. 2010;54(5):504-13.
99. Ham S, Yoon C, Lee E, Lee K, Park D, Chung E, et al. Task-based exposure assessment of nanoparticles in the workplace. Journal of Nanoparticle Research. 2012;14(9):1-17.
100. van Broekhuizen P, van Broekhuizen F, Cornelissen R, Reijnders L. Use of nanomaterials in the European construction industry and some occupational health aspects thereof. Journal of Nanoparticle Research. 2011;13(2):447-62.
101. Cheng YH, Chao YC, Wu CH, Tsai CJ, Uang SN, Shih TS. Measurements of ultrafine particle concentrations and size distribution in an iron foundry. Journal of hazardous materials. 2008;158(1):124-30.
102. Tsai C-J, Huang C-Y, Chen S-C, Ho C-E, Huang C-H, Chen C-W, et al. Exposure assessment of nano-sized and respirable particles at different workplaces. Journal of Nanoparticle Research. 2011;13(9):4161-72.
103. Lee J, Ahn K, Kim S, Jeon K, Lee J, Yu I. Continuous 3-day exposure assessment of workplace manufacturing silver nanoparticles. Journal of Nanoparticle Research. 2012;14(9):1-10.
104. Voliotis A, Bezantakos S, Giamarelou M, Valenti M, Kumar P, Biskos G. Nanoparticle emissions from traditional pottery manufacturing. Environmental science Processes & impacts. 2014;16(6):1489-94.
105. Chen S-C, Wang J, Fissan H, Pui DYH. Use of Nuclepore filters for ambient and workplace nanoparticle exposure assessment—Spherical particles. Atmospheric Environment. 2013;77(0):385-93.

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-16]

Research Article

An overview of methods and instruments for the assessment of occupational exposure to nanoparticles

Vahide Abolhasannejad[1], Mohammad Javad Assari[2*]

Received: 1 March 2015 Accepted: 20 May 2015

Abstract

Background & objective:: In recent years, there has been a dramatic increase in the application of nanotechnology in industries and the number of workers occupied in different processes of research on and construction, production and residue disposal of products containing nanoparticles. Despite this growth, however, there is still a dearth of information on the risk of occupational exposure to these materials. Due to the growing application of nanoparticles in the workplace, selecting suitable sampling and characterization techniques and instruments as well as investigating their efficiency for the evaluation of occupational exposure is very important.

Methods: The present review study was conducted to introduce the methods and instruments used for evaluating occupational exposure to nanoparticles with an emphasis on the results of the existing literature on methods and instruments of evaluating occupational exposure to nanoparticles and the different contributing factors and conditions through library resources.

Results: The results of this study demonstrate that, in spite of the wide application of nanotechnology in the workplace, a reliable, international and standard method for evaluating occupational exposure to nanoparticles is still lacking. This study also shows that occupational exposure to nanoparticles can be evaluated through modern instruments that identify and characterize nanoparticles in terms of their number, mass concentration and surface area. The Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS) was the most widely-used instrument for measuring the number and size distribution of particles.

Conclusion: The accuracy and precision of the methods and instruments used for evaluating the exposure to nanoparticles can be investigated in future research as a way of establishing a suitable and reliable evaluative standard.

Keywords: Nanoparticles, Occupational Exposure, Sampling Instruments, Nanotechnology

Please cite this article as: Abolhasannejad V[1], Assari M [2*]. An overview of methods and instruments for the assessment of occupational exposure to nanoparticles. *Journal of Occupational Hygiene Engineering. 2015; 2(2):1-14.*

1. Ph.D. student of Occupational Health Engineering, Faculty of Health, Hamadan University of Medical Science.

2*. **(Corresponding author**) Assistance Professor of Occupational Health Engineering, Faculty of Health, Hamadan University of Medical Science. Email: asari@umsha.ac.ir

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-16]