



Providing a risk management tool for handling with nanomaterials based on Control Banding approach

Seyed Husein Naziri¹ , Mostafa Pouyakian¹, Sedigheh Sadegh Hassani², Somayeh Farhang Dehghan^{1,3*} 

1. School of Public Health and Safety, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran.
2. R & D manager of Sanat Afarin Mahan co., Tehran, Iran
3. Environmental and Occupational Hazards Control Research Center, Research Institute for Health Sciences and Environment, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran

Received: 2024/01/03

Accepted: 2024/05/19

Abstract

Background and Aim: With the increase in the use of nanomaterials, there is a greater risk of exposure to harmful substances in occupational settings, especially in those with limited information on the impact on human health. As a result, the assessment of risks associated with these materials is often challenging, as traditional methods are not sufficient. The development and implementation of tools for classifying risk levels can be seen as an essential step in protecting the well-being of individuals engaged in work related to nanomaterials. Among the various approaches, Control Banding (CB) classification emerges as an effective and practicable qualitative technique for evaluating the potential health hazards linked to engineered nanomaterials. The primary objective of this study revolves around employing the Control Banding approach to evaluate and mitigate occupational risks stemming from the manipulation of nanomaterials.

Methods: The resources were examined in order to identify the factors that impact health hazards in workplaces that handle nanomaterials. This examination considered the potential risks associated with nanomaterials found in the Web of Science and Scopus databases, as well as citations from authoritative sources such as the World Health Organization (WHO) and the International Organization for Standardization (ISO). After conducting a thorough analysis of the available literature, the hazards associated with chemical substances and exposure methods when working with nanomaterials were identified. This analysis further resulted in the determination of the risk and exposure score using the CB approach. Furthermore, an investigation was conducted on control measures related to the identified level of risk.

Results: The categorization of risk scores, determined by the approach of classifying control measures, yielded five distinct categories. These categories, ranging from HB1 as the lowest to HB5 as the highest level of risk, were established based on information pertaining to indicators such as acute toxicity, sensitization, stimulation, and organ damage. Similarly, the categorization of exposure scores, determined by the approach of classifying control measures, resulted in four distinct categories. These categories, ranging from EB1 as the lowest to EB4 as the highest level of exposure, were derived from information concerning the manufacturing methods and release power of various types of nanomaterials, taking into account the probability of exposure. Subsequently, by merging the categories corresponding to the risk score and exposure, the risk level was determined across five categories, with R1 representing the lowest and R5 representing the highest level of risk. In accordance with the classification approach, control measures were proposed based on each level of occupational risk when working with nanomaterials.

Conclusion: The nanomaterials risk management tool based on the approach of CB is an easy and qualitative method to evaluate and make decisions in order to reduce the risk of handling nanomaterials. In this approach, it is easy to achieve risk assessment results by identifying the inherent risks of a substance and predicting the probability of exposure. Using such tools in work environments can help professionals identify and remove obstacles and provide the possibility to communicate with managers.

Keywords: *Engineered Nanomaterials, Risk Management, Tool, Control Banding.*

Please cite this article as:

Naziri S.H, Pouyakian M, Sadegh Hassani S, Farhang Dehghan S. Providing a risk management tool for handling with nanomaterials based on Control Banding approach. *Irtiqa Imini Pishgiri Masdumiyat*.2023;11(3):206-218. <https://doi.org/10.22037/iipm.v11i3.44325>

Corresponding Author: somayeh.farhang@sbmu.ac.ir

*This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)





ارائه ابزار مدیریت ریسک کار با نانومواد مبتنی بر رویکرد دسته‌بندی اقدامات کنترلی

سید حسین نظیری^۱، مصطفی پویاکیان^۱، صدیقه صادق حسینی^۲، سمیه فرهنگ دهقان^{۱،۳*}

۱- گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای و ایمنی کار، دانشکده بهداشت و ایمنی، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران.

۲- مدیر تحقیق و توسعه شرکت صنعت آفرین ماهان، تهران، ایران

۳- مرکز تحقیقات کنترل عوامل زیان آور محیط و کار، پژوهشکده علوم بهداشتی و محیط زیست، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران.

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۳۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۱۳

چکیده

سابقه و هدف: با گسترش کاربردهای نانومواد، ریسک مواجهه در محیط‌های شغلی با مواد خطرناکی که اطلاعات کاملی از آن‌ها برای سلامت انسان وجود ندارد، افزایش می‌یابد. به همین دلیل، ارزیابی ریسک این مواد معمولاً با مشکل مواجه شده و نمی‌توان از روش‌های معمول برای آن‌ها استفاده کرد. ارائه ابزارهایی که بر پایه طبقه‌بندی سطح ریسک توسعه یافته‌اند می‌تواند گام مهمی در راستای حفظ سلامت افراد در کار با نانومواد به حساب آید. رویکرد دسته‌بندی اقدامات کنترلی (CB)، یک روش کیفی اثربخش و قابل‌اجرا برای ارزیابی مخاطرات بالقوه سلامتی مرتبط با نانومواد ساخته شده به شمار می‌رود. مطالعه حاضر باهدف به‌کارگیری رویکرد دسته‌بندی اقدامات کنترلی برای ارزیابی مخاطرات به‌منظور مدیریت و کاهش ریسک شغلی ناشی از کار با نانومواد انجام شد.

روش کار: جستجوی منابع جستجو باهدف شناسایی مؤلفه‌های مؤثر بر ریسک بهداشتی در محیط‌های کار با نانومواد، با در نظر گرفتن مخاطرات بالقوه نانومواد ساخته در پایگاه‌های داده Scopus، Web of Science، و مراجعی نظیر سازمان بهداشت جهانی (WHO) و سازمان بین‌المللی استاندارد (ISO) انجام شد. پس از بررسی متون، شناسایی مخاطرات مواد شیمیایی و روش‌های مواجهه به‌هنگام کار با نانومواد به تعیین امتیاز مخاطره و مواجهه بر اساس رویکرد دسته‌بندی اقدامات کنترلی انجامید. همچنین در ادامه، اقدامات کنترلی مرتبط با سطح ریسک شناسایی شده، بررسی شدند.

یافته‌ها: امتیاز (دسته) مخاطره بر مبنای رویکرد دسته‌بندی اقدامات کنترلی، به ۵ دسته HB1 به عنوان پایین‌ترین تا HB5 به عنوان بالاترین سطح مخاطره انجامید. این طبقه‌بندی براساس اطلاعاتی در رابطه با شاخصه‌هایی همچون سمیت حاد، حساسیت‌زایی، محرک بودن و آسیب به اندام‌های بدن بدست آمد. همچنین، امتیاز (دسته) مواجهه بر مبنای رویکرد دسته‌بندی اقدامات کنترلی به ۴ دسته EB1 به عنوان پایین‌ترین تا EB4 به عنوان بالاترین سطح مواجهه انجامید. این طبقه‌بندی براساس اطلاعاتی در رابطه با روش‌های ساخت و توان انتشار انواع مختلف نانومواد با توجه به احتمال وقوع مواجهه بدست آمد. پس از ادغام دسته‌های متناظر با امتیاز مخاطره و مواجهه براساس رویکرد دسته‌بندی اقدامات کنترلی، سطح ریسک به ۵ دسته R1 به عنوان کمترین تا R5 به عنوان بالاترین سطح ریسک بدست آمد. بر مبنای رویکرد دسته‌بندی، اقدامات کنترلی متناسب با هر سطح از ریسک شغلی در هنگام کار با نانومواد پیشنهاد شد.

نتیجه‌گیری: ابزار مدیریت ریسک نانومواد بر مبنای رویکرد دسته‌بندی اقدامات کنترلی، روشی آسان و کیفی برای ارزیابی و تصمیم‌گیری در جهت کاهش ریسک کار با نانومواد به شمار می‌رود. در این رویکرد به‌سادگی می‌توان از طریق شناسایی مخاطرات ذاتی یک ماده و پیش‌بینی احتمال مواجهه با آن، به نتایج ارزیابی ریسک دست‌یافت. به‌کارگیری چنین ابزارهایی در محیط‌های کار می‌تواند به متخصصان در شناسایی و رفع موانع کمک نموده و امکان برقراری ارتباط با مدیران فراهم نماید.

واژگان کلیدی: نانومواد مهندسی‌شده؛ مدیریت ریسک؛ ابزار؛ دسته‌بندی اقدامات کنترلی.

به این مقاله، به صورت زیر استناد کنید:

Naziri S.H, Pouyakian M, Sadegh Hassani S, Farhang Dehghan S. Providing a risk management tool for handling with nanomaterials based on Control Banding approach. Irtiqa Imini Pishgiri Masdumiyat.2023;11(3):206-218. <https://doi.org/10.22037/iipm.v11i3.44325>



مقدمه

فناوری نانو در حال پیشرفت بوده و انتظار می‌رود جنبه‌های اجتماعی و صنعتی در سراسر جهان تحت تأثیر قرار بگیرند. همانطور که مواد جدید توسعه یافته و تجاری می‌شوند، اطلاعات مربوط به مخاطرات آن‌ها در محیط کار بایستی ارائه شود تا تولیدکنندگان، کارگران و مصرف‌کنندگان مطمئن شوند که می‌توانند به طرز ایمن از این مواد استفاده کنند (۲، ۱).

نانومواد در حال حاضر در صنایع الکترونیکی، مغناطیسی، الکترونیک نوری، زیست پزشکی، پزشکی، دارویی، آرایشی و انرژی استفاده می‌شوند (۳-۵). در سال ۲۰۰۸ تعداد افراد فعال فناوری نانو در حدود ۴۰۰,۰۰۰ برآورد گردید (۶، ۵). همچنین این جمعیت در سال ۲۰۲۰ در دنیا حدود ۶ میلیون نفر تخمین زده شد (۷، ۸). بازار جهانی نانومواد در سال ۲۰۲۰ رقم ۱/۷۶ میلیارد دلار تخمین زده شد (۹). با آغاز فعالیت و پشتیبانی دستگاه‌های اجرایی، از سال ۱۳۹۱ تا ۱۳۹۶ به طور متوسط سالانه بیش از ۵۰۰ میلیارد ریال بودجه به توسعه فناوری نانو در ایران اختصاص یافته است. در مجموع می‌توان گفت دولت ایران تاکنون بیش از ۵۰۰۰ میلیارد ریال بودجه به توسعه نانو اختصاص داده است که با توجه به چشم‌انداز سال ۲۰۳۳ این رقم شاهد افزایش خواهد بود (۱۰). در ایران تاکنون در ۳۵۰ شرکت تولیدکننده‌ی فعال در حوزه‌ی فناوری نانو در خدمت عرصه‌ها و فناوری‌های مختلف وجود دارد (۱۱). این موضوع، اهمیت توجه و رسیدگی به وضعیت سلامت افرادی را که ممکن است در داخل کشور با نانومواد سر و کار داشته باشند، دو چندان می‌کند. (۱۱، ۱۰).

نانومواد مهندسی‌شده یا ساخته‌شده (Engineered Nanomaterials: ENM/Manufactured Nanomaterials: MNM) به دست انسان تولید می‌شوند (۱۲، ۴). بر خلاف نانومواد بسیار ریز تصادفی در فرایندهای صنعتی، نانومواد ساخته‌شده با هدف ارائه عملکرد خاص تولید شده و عمدتاً از نظر شکل و اندازه همگن هستند (۱۳). به دلیل خصوصیات تجمع‌پذیری، هنگام کار احتمال مواجهه با نانوذرات، انبوهه‌ها و کلوخه‌های آن‌ها (Nano-objects and their agglomerates and aggregates: NOAAs) به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد. به دلیل اندازه بسیار کوچک، مساحت سطح زیاد، شکل، ماهیت شیمیایی و عملکرد سطحی ویژه، نانومواد دارای سمیت بالقوه هستند و برای بسیاری از نانومواد ساخته‌شده جدید اطلاعات در

این زمینه بسیار محدود می‌باشد (۱۴، ۱۳) محیط‌های شغلی بیشترین احتمال مواجهه را با نانومواد مهندسی‌شده برای انسان به وجود می‌آورند. (۱۵، ۱۲). با کاهش اندازه ذرات، نسبت سطح به جرم نانومواد افزایش می‌یابد. اندازه، شکل، نسبت مساحت سطحی، واکنش‌پذیری، حلالیت و بار الکتریکی بر سمیت نانومواد تأثیر می‌گذارد (۱۶، ۴).

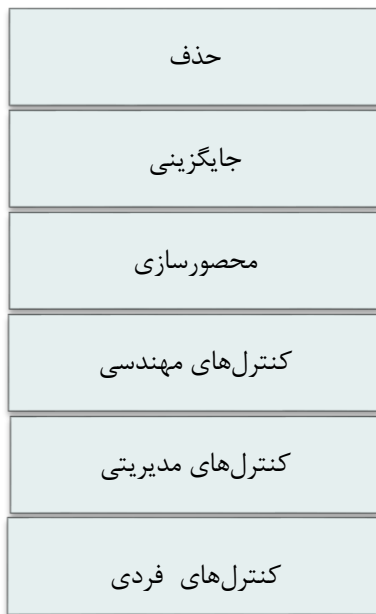
ورود نانومواد از طریق استنشاق، بلع یا پوست می‌تواند با جذب، توزیع و متابولیسم در داخل بدن همراه گردد. انواع مختلف ممکن است با هوای تنفسی وارد ریه‌ها و سپس گردش خون در بدن شوند و از این طریق به اندام‌های هدف مختلف از جمله مغز، کبد، کلیه، سیستم ایمنی، قلب، کلیه‌ها، اندام‌های اسکلتی و تناسلی، طحال، جنین، سایر بافت‌های نرم و دیواره‌های عروق توزیع شوند (۱۷). سمیت نانومواد به شکل اثرات سیتوتوکسیک، ژنوتوکسیک، التهاب و حتی سرطان‌زایی، سلامت انسان را به خطر می‌اندازد (۱۸، ۱۹).

در محیط‌های کار با نانومواد، احتمال نشت و رهایش نانومواد از رآکتورها و دستگاه‌های پردازش حین کار، تمیزکاری تجهیزات و تعویض قطعات وجود دارد. تمیزکاری فیلترهای جمع‌آوری گردوغبار، جابه‌جایی و تخلیه دستی، بارگیری، توزین، حمل‌ونقل، بسته‌بندی، ذخیره‌سازی و پردازش نهایی محصولات نانو سبب ایجاد مواجهه با این مواد برای کارگران و اپراتورها می‌شود (۸). بنابراین، با افزایش جمعیت کارگرانی که در معرض مخاطرات این مواد هستند، مدیریت ریسک مخاطرات نانومواد از دیدگاه بهداشت حرفه‌ای اهمیت پیدا می‌کند (۲۰). به دلیل فقدان اطلاعات، ارزیابی ریسک کمی تا به امروز به صورت محدود بر روی نانومواد انجام شده است (۲۱، ۲۲). با عدم قطعیت حدود آستانه مجاز مواجهه شغلی (Occupational Exposure Limits: OEL) برای بسیاری از نانومواد، در ارزیابی ریسک و تعیین سطوح مناسب کنترل مواجهه، باید یک استراتژی مطلوب مدیریت ریسک نانومواد تهیه شود. همچنین به علت محدود بودن داده‌های سم‌شناسی در حوزه نانومواد، چارچوب استاندارد جهت ارزیابی و مدیریت این داده‌ها وجود ندارد (۲۳).

در حال حاضر، با توجه به محدودیت داده‌های سم‌شناسی و عدم دسترسی به دستگاه‌هایی که قادر باشند به طور دقیق به اندازه‌گیری کمی مواجهه با نانومواد بپردازند، به ناچار از روش‌های کیفی ارزیابی ریسک استفاده می‌شود (۲۴). روش طیف‌بندی مواجهه شغلی (Occupational exposure banding: OEB) به نوعی روش کیفی

ارزیابی ریسک مواد مخاطره آمیز همواره نمی‌توان رویکردهای سنتی را برای نانومواد به کار گرفت، از رویکرد دسته‌بندی اقدامات کنترلی (Control Banding: CB) استفاده می‌شود. این رویکرد به عنوان روشی آسان و قابل اطمینان در مدیریت ریسک کار با نانومواد معرفی می‌شود. روند انتخاب اقدامات کنترلی مناسب را تسهیل می‌کند و باعث افزایش سطح آگاهی از مخاطرات به هنگام استفاده یا کار با نانومواد می‌شود (۳۰، ۲).

در روش دسته‌بندی اقدامات کنترلی (CB) از اطلاعات ساخت، تولید و خصوصیات فیزیکوشیمیایی ماده (شکل ۱) برای تعیین سطح ریسک و سلسله مراتب کنترل خطر (شکل ۲) استفاده می‌شود. بدین ترتیب به جای داده‌های کمی اندازه‌گیری و حدود آستانه مجاز مواد شیمیایی، از اطلاعات کیفی برای ارزشیابی ریسک در محیط‌های کار با نانومواد استفاده می‌شود.



شکل ۲. سلسله‌مراتب کنترل ریسک (اقدامات کنترلی دسته‌بندی شده)

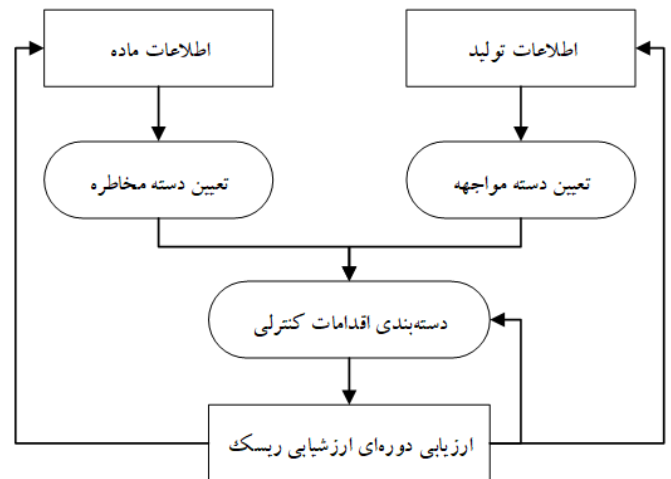
روش کار

مطالعه حاضر به منظور تهیه ابزار مدیریت ریسک در محیط‌های شغلی که با نانومواد کار می‌شود، انجام گردید. جستجو باهدف شناسایی مؤلفه‌های مؤثر بر ریسک بهداشتی در محیط‌های کار با نانومواد، با در نظر گرفتن مخاطرات بالقوه نانومواد ساخته در پایگاه‌های جستجوی داده مانند Web of Science، PubMed، Scopus و مراجعی نظیر NIOSH، سازمان توسعه و همکاری اقتصادی (Organisation of Economic Co-operation and Development: OECD)، آژانس

ارزیابی ریسک از طریق تبدیل داده‌های سم‌شناسی به حساب می‌آید. البته باید خاطر نشان کرد که OEB جایگزین OEL نخواهد بود، بلکه تحت ابزارهای مدیریت ریسک برای کنترل مواجهه با نانومواد بکار می‌رود (۲۵).

مدیریت ریسک در راستای کاهش خسارات و صدمات، به تحلیل، پیش‌بینی و کنترل مخاطرات می‌پردازد که شامل شناسایی خطر، ارزیابی مواجهه، ارزیابی ریسک و تصمیم‌گیری برای اقدامات کنترلی می‌شود. اگر سطح ریسک فراتر از میزان قابل قبول سیستم باشد، باید به کمک اقدامات کنترلی ریسک را تا سطح قابل قبول کاهش داد. مدیران باید قادر باشند باتوجه به اطلاعاتی که از وضعیت و محدودیت‌های موجود در اختیار دارند، بهترین تصمیم‌ها را اتخاذ نمایند و از اعتبار انتخاب‌های خود دفاع کنند (۲۶).

اغلب اوقات، اقدامات کنترلی مبتنی بر تفکر غالب سلسله‌مراتب کنترل خطر انتخاب می‌شوند (شکل ۱) که بسیار متکی بر سطح دانش و تجربه افراد است. مدل‌سازی کنترل ریسک به متخصصان کمک می‌کند تا در تصمیم‌گیری‌هایشان به‌درستی عمل کنند. در مدیریت ریسک، ارزیابی یک موقعیت یا تصمیم‌گیری نیاز به نظر متخصصین دارد که اطلاعات دقیق یا کمی در مورد آن‌ها وجود ندارد. از این رو، نظرات متخصصین به‌صورت غیرکمی و زبانی بیان می‌شود (۲۶، ۲۷).



شکل ۱. رویکرد دسته‌بندی اقدامات کنترلی (۲۸، ۲۹)

ارزیابی ریسک‌های بهداشتی در محیط‌های کار با نانومواد با هدف کاهش سطح ریسک موجود تا پایین‌تر از حد قابل قبول سازمان انجام می‌شود تا در خصوص لزوم تقویت رویکردهای مدیریت ریسک اطلاعات کافی در اختیار تصمیم‌گیرندگان قرار بگیرد. به دلیل عدم قطعیت‌ها و اطلاعات ناقص از مخاطرات خاص نانوشیاء، فرایند ارزیابی ریسک این مواد دشوارتر است (۱۲، ۴، ۲۰). از آنجایی که به هنگام

در نهایت، ادغام طبقه‌بندی مخاطره و مواجهه به ۵ سطح ریسک CB1 (کمترین سطح ریسک) تا CB5 (بیشترین سطح ریسک) منتج شد. با روش‌ها و تکنیک‌های موجود به‌کارگیری ارزیابی کمی ریسک در بررسی ریسک‌های بهداشتی در محیط‌های کار با نانومواد، بسیار دشوار است. ارائه ابزاری برای شناسایی و ارزیابی ریسک کار با نانومواد این امکان را فراهم می‌سازد تا به هنگام تولید، جابه‌جایی، استفاده و دفع نانومواد از بروز پیامدهای نامطلوب جلوگیری و اقدامات کنترلی مناسب برای مدیریت ریسک به کار گرفته شود (۲۳، ۸).

یافته‌ها

پس از بررسی متون و جمع‌بندی بر اساس نظرات گروه خبرگان، مؤلفه‌هایی که در سطح ریسک کار با نانومواد نقش دارند شناسایی شدند. حدود مجاز مواجهه شغلی (OEL) در صورت وجود می‌تواند برای طبقه‌بندی مخاطره بکار گرفته شود که نتایج آن در جدول ۱ ارائه شد. هر طیف از OEL متناظر با شکل نانوماده (به صورت بخار، گاز یا ذره) یا ماده اولیه (Bulk Material) براساس واحد اندازه‌گیری، به یک دسته از مخاطره نسبت داده شد.

اگر هیچ داده مرتبطی برای حدود مجاز هنگام طبقه‌بندی مخاطره نانومواد در دسترس نباشد، می‌توان بر اساس مشخصات در دسترس از نانومواد مهندسی شده و با توجه به مؤلفه‌های شیمی سطح، شکل ذره، قطر ذره، حلالیت در آب و معیارهای سم‌شناسی مانند سرطان‌زایی، سمیت تولیدمثلی، سمیت ژنتیکی یا سمیت پوستی برای نانوماده یا ماده اولیه آن، دسته مخاطره مواد تعیین خواهد شد (۳۲، ۱۷). بدین ترتیب، یافته‌های طبقه‌بندی مخاطره (HB) در جدول ۲ ارائه گردید. در این طبقه‌بندی HB₁ کمترین و HB₅ بالاترین سطح خطر را نشان می‌دهد.

مطابق با دسته‌بندی اقدامات کنترلی، طبقه‌بندی مواجهه بر اساس نوع روشی که در فرایند ساخت یا فرآوری نانومواد استفاده می‌شود به دست آمد. پس از بررسی و مرور منابع، انواع روش‌های ساخت نانومواد در جدول ۳ ارائه گردید که اساس طبقه‌بندی در مرحله بعد است.

مواد شیمیایی اروپا (European Chemicals Agency: ECHA)، سازمان بهداشت جهانی (WHO)، سازمان بین‌المللی استانداردسازی (ISO)، سازمان استاندارد ایران (ISIRI) و پایگاه‌های فارسی مگیران (Magiran) و مرکز اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی (SID) با ترکیب کلیدواژه‌ها شامل «Engineered/Manufactured nanomaterials»، «Control Banding»، «Nanotoxicity»، «Assessment tool»، «Health and safety risk»، «Occupational exposure»، «Risk management»، «Multi-criteria decision making»، «Workplace»، «Nanotechnology» و معادل‌های فارسی با به‌کارگیری عملگرهای بولی مناسب در پایگاه‌های جستجوی «Google» و «Google scholar» انجام شد. بررسی متون مقالات و اسناد منتشر شده بدون محدودیت سال شروع، برای مطالعات تا سال ۲۰۲۳ به زبان انگلیسی یا فارسی صورت گرفت.

پس از بررسی متون، دسته مخاطره و مواجهه مطابق با طبقه‌بندی ارائه شده در رویکرد دسته‌بندی اقدامات کنترلی توسط گروه خبرگان شد. گروه خبرگان در این مطالعه شامل متخصصانی از حوزه مدیریت ریسک و سنتز و تولید نانومواد بودند. در روش‌های کیفی ارزیابی ریسک، برای اعلام سطح خطر ماده شیمیایی در صورت عدم دسترسی به اطلاعات دقیق و کمی از مخاطرات، از روش طبقه‌بندی استفاده می‌شود. روش‌های مختلف نظیر طبقه‌بندی سیستم هماهنگ جهانی (Globally Harmonized System: GHS) و حدود مجاز مواجهه شغلی موجود (OEL) مطابق با رویکرد دسته‌بندی اقدامات کنترلی برای طبقه‌بندی مخاطره استفاده شد. همچنین، روش مؤسسه ملی ایمنی و بهداشت شغلی آمریکا (National Institute for Occupational Safety and Health: NIOSH) برای طبقه‌بندی حدود مواجهه شغلی (OEB) بکار می‌رود.

امتیاز یا دسته مواجهه مطابق رویکرد دسته‌بندی اقدامات کنترلی با توجه به سناریوی مواجهه در یک ایستگاه کاری با در نظر گرفتن ملاحظات هم‌چون فرایند ساخت، حالت فیزیکی و توان فرایندها در ایجاد گردوغبار نانومواد انجام شد. در واقع، طبقه‌بندی مواجهه به توان هوا برد شدن نانومواد تحت شرایط عادی در فرایند مشخصی بدون در نظر گرفتن کنترل‌های موجود، می‌پردازد (۲۸).

نانومواد به شکل‌های مختلف فیزیکی نظیر پودر یا امولسیون مایع، ساخته یا فرآوری می‌شوند. حالت فیزیکی پارامتری مهم است که با توجه به فرایند ساخت نانوماده بیانگر احتمال وقوع مواجهه می‌باشد.

جدول ۱. طبقه‌بندی حدود مجاز مواجهه شغلی (در صورت وجود OEL) برای دسته مخاطره براساس توصیه NIOSH (۳۱)

ردیف	حدود مجاز موجود برای ماده	واحد اندازه‌گیری	طبقه‌بندی خطر (HB)				
			HB1	HB2	HB3	HB4	HB5
۱	نانوماده به شکل ذره	میکروگرم بر مترمکعب (۸ساعته)	بیشتر از ۱۰	۱ تا ۱۰	۰/۱ تا ۱	۰/۰۱ تا ۰/۱	کمتر از ۰/۰۱
۲	نانوماده به شکل بخار	بخش در میلیون (ppm)	بیشتر از ۱۰	۱ تا ۱۰	۰/۱ تا ۱	۰/۰۱ تا ۰/۱	کمتر از ۰/۰۱
۳	ماده اولیه به شکل ذره	میکروگرم بر مترمکعب (۸ساعته)	بیشتر از ۱۰۰۰	۱۰۰ تا ۱۰۰۰	تا ۱۰	۱۰۰ تا ۱۰۰۰	۱ تا ۱۰

جدول ۲. طبقه‌بندی مخاطره مطابق با رویکرد دسته‌بندی اقدامات کنترلی (۳۱)

ردیف	مؤلفه طبقه‌بندی	واحد سنجش	طبقه‌بندی مخاطره (HB)				
			HB1	HB2	HB3	HB4	HB5
۱	شیمی سطح	قضاوت کارشناس	-	کم	متوسط	نامشخص	زیاد
۲	شکل ذره	مشخصه‌یابی	کروی	فشرده	ناهمسان‌گرد	نامشخص	الیاف، لوله
۳	قطر ذره	اندازه نانومتر	-	بزرگتر از ۴۰	۱۱ تا ۴۰	نامشخص	۱ تا ۱۰
۴	حلالیت در آب	قضاوت کارشناس	محلول	-	-	نامشخص	نامحلول
۵	سرطان‌زایی	شواهد موجود	-	ندارد	نامشخص	احتمالاً باشد	امکان دارد
۶	سمیت تولیدمثلی	قضاوت کارشناس	-	ندارد	نامشخص	احتمالاً باشد	بله
۷	سمیت ژنتیکی	قضاوت کارشناس	-	ندارد	نامشخص	احتمالاً باشد	بله
۸	سمیت پوستی	قضاوت کارشناس	-	ندارد	نامشخص	احتمالاً باشد	بله

جدول ۳. انواع روش ساخت یا فرآوری نانومواد (۳۵)

ردیف	نوع فرایند یا روش کار	توصیف فرایند
۱	شیمی تر (همراه محلول)	سل‌ژل برای ساخت نانومواد بر پایه اکسید فلزی با شکل معین استفاده می‌شود.

۲	قطع لیزر در تفجوشی مایع	با تابش پرتو لیزر بر روی هدف جامد غوطه‌ور در مایع، نانوذره تشکیل می‌شود.
۳	عملیات مکانیکی (آسیاب)	روش مقرون‌به‌صرفه تولید مواد با مقیاس نانو از مواد اولیه بالک به شمار می‌رود.
۴	عملیات مکانیکی (برش)	اره چرخشی مواد را جابه‌جا می‌کند تا برش موردنظر در اندازه دلخواه انجام شود.
۵	سنتز فاز گازی	این روش‌ها برای تولید نانومواد در فاز گازی استفاده می‌شوند.
۶	تجزیه گرمایی	این روش برای تولید نانومواد در فاز گازی با شعله در دمای زیاد بکار می‌رود.
۷	برسایش لیزری	با تابش پرتو لیزر قدرتمند به مواد هدف در تولید نانومواد بکار می‌رود.
۸	الکترو اسپری	برای تولید نانومواد به شکل ذرات معلق در هوا استفاده می‌شود.
۹	نهشت بخار شیمیایی	روش‌های نهشت شیمیایی بخار در تولید نانومواد مبتنی بر کرین بکار می‌روند.
۱۰	الکتروروسی	برای تولید نانوالیاف از محلول مواد اولیه بالک به‌خصوص پلیمرها استفاده می‌شود.

یک مرتبه اجرای فرایند انجام شد. در این طبقه‌بندی، دسته EB₁ کمترین و EB₄ بیشترین سطح مواجهه یا احتمال آن را نشان می‌دهد.

درنهایت مطابق جدول ۴، طبقه‌بندی مواجهه بر مبنای مطالعه آقای پایک و همکاران (۳۵،۳۳) در ۴ دسته مواجهه (EB) با توجه به فرایند ساخت، مؤلفه‌های مقدار نانوماده مصرف‌شده، تعداد افراد در معرض مواجهه، تکرار دفعات مواجهه و زمان استفاده از نانوماده طی

جدول ۴. طبقه‌بندی مواجهه مبتنی بر رویکرد دسته‌بندی اقدامات کنترلی (۲۹،۲۸)

ردیف	معیار	واحد سنجش	طبقه	طبقه‌بندی مواجهه (EB)
۱			کمتر از ۱۰	EB1
۲	تعداد افراد در مواجهه با نانومواد	نفر	۱۰ تا ۱۵	EB2
۳			نامشخص	EB3
۴			بیشتر از ۱۵	EB4
۵	مقدار نانوماده ماده مصرفی	میلی گرم	کمتر از ۱۰	EB1
۶			۱۰ تا ۱۰۰	EB2
۷			نامشخص	EB3
۸			بیشتر از ۱۰۰	EB4
۹	تکرار دفعات مواجهه	دفعه	۱ بار در ماه	EB1
۱۰			۱ بار در هفته	EB2
۱۱			نامشخص	EB3

EB4	روزانه		۱۲
EB1	کمتر از ۱ ساعت		۱۳
EB2	۱ الی ۴ ساعت	ساعت	۱۴
EB3	نامشخص		۱۵
EB4	بیشتر از ۴ ساعت		۱۶

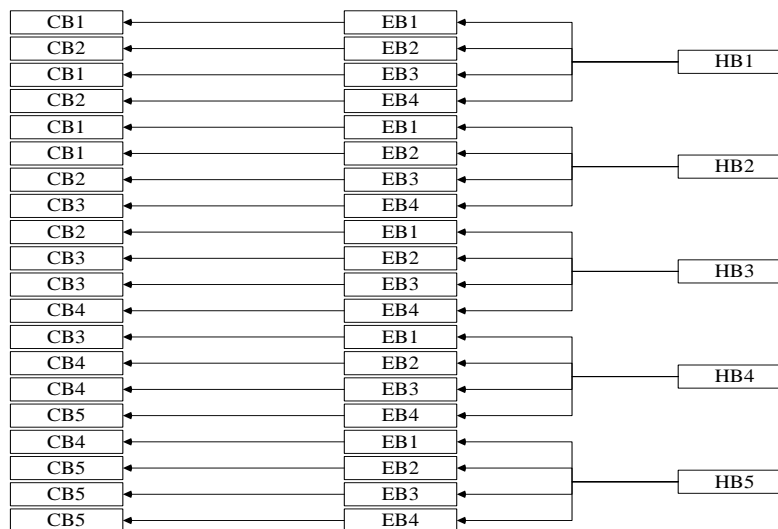
(۲) مطابق با جدول ۳ برای مواجهه تنفسی بدست آمد که متناظر با طبقه‌بندی ریسک در شکل ۳ می‌باشد. سطح ریسک مرتبط با فعالیت‌های محیط کار مشخص شود و در حالت ایده‌آل، راهبرد کنترل باید با ریسک شناخته شده هم‌سو باشد (۲۸،۴).

سپس مطابق دسته‌بندی اقدامات کنترلی، ریسک در محیط‌های کار با نانومواد به ۵ طیف از CB1 تا CB5 به ترتیب به عنوان کمترین و بیشترین سطح ریسک، طبقه‌بندی شد. HB و EB به ترتیب دسته مخاطره و مواجهه را در درخت سطح ریسک شکل ۲ نشان می‌دهند. دستورالعمل‌های منتشر شده برای کار ایمن با نانومواد مبتنی بر دسته‌بندی اقدامات کنترلی در کار با نانومواد در سلسله‌مراتب (شکل

جدول ۵. دسته‌بندی اقدام کنترلی (۲۹،۲۸)

دسته اقدام کنترلی	اقدام کنترلی برای مواجهه تنفسی
دسته CB1	تهویه عمومی مکانیکی یا طبیعی
دسته CB2	تهویه موضعی: هود مکنده، هود شکافدار، هود بازویی، هود میزی
دسته CB3	تهویه محصور: اتافک تهویه شده، هود فیوم، رآکتور بسته با دهانه قابل تنظیم
دسته CB4	مهار کامل: کیسه یا جعبه دست‌کش دار، سامانه‌های مداوم بسته
دسته CB5	مهار کامل و مراجعه به مشاوره متخصص

جدول ۵) دسته‌بندی اقدام کنترلی (۲۹،۲۸)



شکل ۳. تعیین سطح ریسک کار با نانومواد براساس رویکرد دسته‌بندی اقدامات کنترلی (۲۹،۲۸)

بحث

برای مشخصه‌یابی نانومواد و به‌کارگیری رویکرد دسته‌بندی اقدامات کنترلی شناسایی و درک خصوصیات نانومواد حائز اهمیت است (۳۹،۳۳). هر چه قطر یک ذره کوچکتر شود (زیر ۱۰۰ نانومتر)، سمیت بالقوه نانومواد به دلیل افزایش مساحت سطحی ویژه بیشتر خواهد بود. برای اشکال خاصی از نانومواد مانند الیاف یا میله‌ای، به دلیل توانایی نفوذ بالا از موانع بیولوژیکی وخامت پاسخ زیستی یا التهابی بیشتر خواهد بود. هر چقدر نسبت ابعاد بیشتر باشد نانو ذره به شکل الیاف بوده و برهمکنش‌های سلولی آن در نتیجه افزایش نرخ جذب و دریافت در بدن، بیشتر خواهد بود (۳۶). خصوصیات سطحی ذره با تأثیر بر تعامل مواد با سیستم‌های بیولوژیکی منجر به اثراتی نظیر استرس اکسیداتیو، اختلالات متابولیک و آسیب ژنتیکی می‌شود (۳۷). برخی نانومواد به دلیل شکل سوزنی و امکان جذب آلاینده بیشتر روی سطح، ممکن است باعث پاسخ‌های التهابی بلند مدت و اثرات بالقوه دیگر شوند (۳۴). شیمی سطح به عنوان یک عامل کلیدی موثر بر سمیت ذرات استنشاقی شناخته شده است. بالاترین دسته به نانومواد لیفی یا لوله‌ای شکل داده می‌شود. ذرات با اشکال نامنظم (ناهمسانگرد) دارای مساحت سطح بالاتری نسبت به ذرات با اشکال منظم (همسانگرد) یا کروی هستند. نانوذرات استنشاقی محلول ضعیف می‌توانند باعث استرس اکسیداتیو، التهاب، فیبروز یا سرطان شوند. همچنین، نانومواد محلول از طریق انحلال در خون اثرات نامطلوبی ایجاد می‌کنند (۳۳). با افزایش زمان کار با نانومواد، احتمال وقوع مواجهه بالاتر خواهد بود (۳۸). با افزایش تکرار مواجهه با نانوماده، احتمال وقوع مواجهه بالاتر خواهد بود (۳۹). کاهش طول زمان کاری ممکن است به طور سودمندی برای کمک به محافظت از سلامت کارگران، اعمال شود. روش‌ها و دستورالعمل‌های تمیزکاری، در پیشگیری از آلودگی فردی مفید است (۴۰).

دسته‌بندی اقدامات کنترلی، سطحی از کنترل مانند تهویه، لوازم حفاظت فردی و غیره را بر اساس میزان خطر و پتانسیل مواجهه تعیین می‌کند (۴۲،۴۱). ابزارهای مختلفی برای دسته‌بندی اقدامات کنترلی در خصوص ارزیابی ریسک شغلی نانومواد وجود دارد که به عنوان مثال می‌توان به روش توسعه یافته پایک و همکاران اشاره کرد. آن‌ها روشی براساس امتیازدهی مؤلفه‌های مختلف از جمله شیمی سطح، شکل نانوماده، قطر ذره، حلالیت در آب و میزان سمیت برای طبقه‌بندی

مخاطره ارائه نمودند که می‌تواند به شکل طبقه‌بندی نیز بکار گرفته شود (۳۵،۳۳).

در مطالعه ایسیگونیس و همکاران باشند (۴۴،۴۳) اشاره شده است که ابزارهای ریسک نانو مواد ساخته شده جهت تسهیل و اجرای ارکان مدیریت ریسک، برقراری ارتباط، شناسایی، ارزیابی و کاهش آن مورد استفاده قرار می‌گیرند. ابزارهای ریسک می‌توانند با استفاده از روش‌های علم تصمیم‌گیری و فناوری‌های اطلاعاتی، ریسک موجود را شناسایی کرده و بهبود می‌بخشند یا ممکن است دارای بستری برای گردآوری و ارائه داده‌های مربوط به نانو مواد نظیر پایگاه‌های داده باشند.

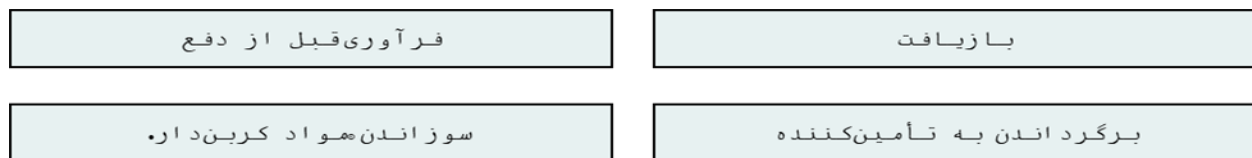
همچنین یابیکولی و همکاران (۴۵،۴۴) مدعی شدند که توسعه و پیاده‌سازی ابزارها و چارچوب‌های مناسب مدیریت ریسک که بتواند به شرکت‌ها کمک کند تا با الزامات نظارتی مطابقت داشته باشند، ایمنی محصولات و فرآیندهای خود را تضمین کنند و پتانسیل نوآوری و رقابت پذیری خود را در بازار افزایش دهند، بسیار جالب توجه می‌باشد.

اقدامات پیشگیرانه باید با توجه به ارزیابی پیامدهای بالقوه نانومواد مورد استفاده، از جمله در نظر گرفتن اطلاعات مخاطره موجود و عدم قطعیت‌های همراه استفاده شود (۳۸،۳۴). اقدامات پیشگیرانه به صورت روش‌های کار ایمن برای تولید و استفاده از نانومواد ضروری به شمار می‌رود. تدوین و اجرای برنامه پیشگیری از مواجهه باید گامی مؤثر در حفاظت از بهداشت و ایمنی کارکنان و سایر افراد در محیط کار باشد (۴۰). طراحی مؤثر فرایند می‌تواند سهم عمده‌ای در پیشگیری از مواجهه در محیط کار داشته باشد. طراحی دقیق می‌تواند به جلوگیری از تولید گردوغبارها و هواسل‌ها کمک کند (۴۶).

جایگزینی، به طور کلی یک روش بسیار مؤثر برای کاهش ریسک‌های مرتبط با بهداشت و ایمنی در محیط کار است. ربایش انتشارات ناشی از فرایندها، استفاده از کنترل‌های مهندسی مانند هودهای جعبه‌ای دستکش‌دار، محفظه‌هایی با جریان روبه پایین و تهویه مکنده موضعی است (۴۶). در صورتی که امکان استفاده از فضای محصور وجود نداشته باشد، پرهیز از تشکیل گردوغبار یا هواسل از اهمیت بیشتری برخوردار می‌شود. ربایش آلاینده‌ها در منبع (مانند مکنده موضعی) برای جلوگیری از انتشار ذرات هوابرد، آلوده کردن سایر مناطق و مواجهه تنفسی کارگران بکار می‌رود (۴۷).

کل فرایند را انجام دهند (۴۹). هودهای دستکش‌دار درجه بالایی از محافظت را فراهم می‌کنند. اما، ممکن است باعث ایجاد محدودیت در تحرک و انجام عملیات شوند. به‌طور کلی، جعبه‌های دستکش‌دار دارای یک دریچه عبور هستند که به کاربر اجازه می‌دهد تجهیزات یا لوازم را به داخل و خارج از محفظه منتقل کند (۵۰).

روش‌های مدیریتی، یک رویکرد تکمیلی در کنار رویکردهای مهندسی هستند، اما جایگزینی برای آن‌ها محسوب نمی‌شود (شکل ۴). کنترل-های اجرائی می‌توانند به رعایت اصولی بهداشتی در محیط کار کمک کنند و در صورت لزوم، شرکت‌ها و مراکز تحقیقاتی باید از متخصصان بهداشت حرفه‌ای مشاوره بگیرند. در کار با نانومواد، روش‌های اجرائی مورد استفاده به نوع نانومواد، سایر مواد درگیر و ماهیت کار بستگی دارد. استفاده از اقدامات مهندسی ممکن است بنا به دلایلی از جمله زمان زیاد یا هزینه بالا قابل اجرا نباشند.



شکل ۴. روش‌های دفع نانومواد در رده اقدامات مدیریتی (۴۶)

به پتانسیل بالای نوآوری و دانش آفرینی در زمینه فناوری نانو بویژه در کشور در ایران به دلیل طرح‌ها و برنامه‌های حمایتی ملی، به‌کارگیری ابزارهای ریسک با استفاده از منابع و ظرفیت‌ها، می‌تواند چالش‌های موجود را در این زمینه برطرف نماید.

از نقاط قوت مطالعه می‌توان به این مطلب اشاره نمود که با توجه به محدودیت یا عدم دسترسی به اطلاعات کافی در این زمینه به خصوص در داخل کشور، سعی بر آن شد تا با توجه به روش‌های موجود در زمینه ارزیابی ریسک نانومواد، برای انجام مطالعات بیشتر در این زمینه که بتواند منجر به بهبود وضعیت در حوزه مدیریت ریسک‌های شغلی و بهداشتی در محیط‌های کار با نانومواد ساخته‌شده یا مهندسی‌شده، چشم‌انداز مناسبی ایجاد گردد. در این زمینه، انجام مطالعات بیشتر جهت توسعه چارچوب‌ها، ابزارها و روش‌های ارزیابی و مدیریت ریسک نانومواد در محیط‌های شغلی توصیه می‌گردد.

هودهای فیوم شیمیایی بیشترین استفاده را به عنوان کنترل مهندسی برای نانومواد مختلف مانند نانوپودرها، نانولوله‌های کربنی، فولرن‌ها، نقاط کوانتومی، بسپاره‌ها، نانوسیم‌ها، نانوبلورها و کربن سیاه دارند (۴۸). اغلب از سامانه‌های فیلتراسیون هوای خروجی مانند فیلتر تصفیه ذرات هوا با کارایی بالا (High Efficiency Particulate Air: HEPA) یا غیر HEPA، اسکرانر تر همراه استفاده می‌شود.

محصور سازی می‌تواند احتمال رهایش ذرات هوا برد در محیط کار را در حین تولید یا استفاده نانومواد به حداقل برساند. در رویکرد محتاطانه، مطلوب است که از مواجهه با نانومواد اجتناب شود و ممکن است تعدادی از روش‌های مهار در نظر گرفته شود (۴۰). از دیگر روش‌های جداسازی می‌توان به استفاده از فرایندهای مدار بسته، استفاده از خطوط فرایند روباتیک و تجهیزات محفظه بسته اشاره نمود. در شرایط خاص که فرایند بسیار آلوده است، کارگران می‌توانند در یک ایستگاه کاری با جو کنترل‌شده، ایزوله شوند تا با کنترل از راه دور

روش‌های اجرائی برای دفع وسایل حفاظت فردی باید در محل وجود داشته شود. همچنین باید روش اجرائی در محل وجود داشته باشد که تعداد دفعات مورد نیاز تعویض یا شست و شوی لوازم حفاظت فردی را نشان دهد. اغلب بیش از یک روش پاک‌سازی (به‌عنوان مثال، پاک‌سازی به روش تر یا جاروبرقی)، بسته به نوع نانومواد و مرحله انجام کار مورد استفاده قرار می‌گیرند. تمیز کردن محیط کار، از جمله از بین بردن گردوغبار نهشت‌یافته بر روی کف، دیوارها و سطوح کار، باید به طور منظم انجام شود تا از هرگونه تجمع، ریسک تعلیق مجدد جوی یا انفجار جلوگیری شود (۵۰).

بررسی مطالعات نشان می‌دهد که دلیل کمبود اطلاعات در رابطه با ریسک‌های ایمنی، بهداشت و محیط‌زیست در فرایند ساخت، تولید، بهره‌برداری، بررسی مواجهه و اثرات نانومواد ساخته شده، محدودیت ظرفیت و تخصص در زمینه ارزیابی و مدیریت ریسک وجود دارد. به دلیل عدم وجود قوانین یا مقررات کافی در رابطه با این ریسک‌ها، و علاوه بر این عدم هماهنگی و همکاری بین بخش‌های ذیربط مختلف، در بررسی خطرات سلامت انسان و محیط زیست نانومواد ساخته شده، چالش‌های بسیاری در مدیریت ریسک فناوری نانو وجود دارد. با توجه

نتیجه گیری

دسته بندی اقدامات کنترلی یک رویکرد کیفی ارزیابی ریسک است که با طبقه بندی اثرات بالقوه نانومواد به عنوان مؤلفه های مؤثر، ریسک موجود را شناسایی و ارزیابی می کند. ابزارها امکان ارزیابی و کنترل مخاطرات را بر اساس یک رویکرد کیفی قابل اطمینان فراهم می کنند. ابزار مدیریت ریسک نانومواد بر مبنای رویکرد دسته بندی اقدامات کنترلی، روشی آسان و کیفی برای ارزیابی و تصمیم گیری در جهت کاهش ریسک کار با نانومواد به شمار می رود.

در این رویکرد به سادگی می توان از طریق شناسایی مخاطرات ذاتی یک ماده و پیش بینی احتمال مواجهه با آن، به نتایج ارزیابی ریسک دست یافت. به کارگیری چنین ابزارهایی در محیط های کار می تواند به متخصصان در شناسایی و رفع موانع کمک نموده و امکان برقراری ارتباط با مدیران فراهم نماید.

اطلاعات مختلفی که در ارزیابی مخاطرات سایر مواد شیمیایی ضروری به شمار می رود، در این زمینه محدود بوده و بهبود وضعیت سلامت افراد در محیط های درگیر با نانومواد نیاز فوری به کشف اطلاعات جدید دارد. در این رابطه، مطابق با طبقه بندی ارائه شده در رویکرد دسته بندی اقدامات کنترلی به طبقه بندی سطح ریسک کار با نانومواد در محیط های شغلی مورد نظر پرداخته شد.

تشکر و قدردانی

این مقاله مستخرج از بخشی از پایان نامه مقطع کارشناسی ارشد و طرح تحقیقاتی مصوب دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی است و نویسندگان از معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی برای حمایت مالی از این مطالعه قدردانی می نمایند.

ملاحظات اخلاقی

تأییدیه اخلاقی این مطالعه از کمیته اخلاق دانشکده بهداشت و مرکز تحقیقات علوم اعصاب دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی با کد IR.SBMU.PHNS.REC.1402.070 اخذ شده است.

تضاد منافع

نویسندگان این مقاله، اعلان می دارند که در طول فرایند تهیه و نگارش این مقاله، هیچ تضاد منافع مالی، شخصی یا سازمانی وجود نداشته است که ممکن است تأثیری بر نتایج و استنباطات ارائه شده در این مقاله داشته باشد.

منابع مالی

این مطالعه با حمایت مالی دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی (شماره گرنت ۴۳۰۰۷۳۵۰) انجام شده است.

نقش نویسندگان

سید حسین نظیری و سمیه فرهنگ دهقان، نویسندگان اصلی مقاله هستند که مسئولیت اصلی تهیه و نگارش مقاله را برعهده داشته اند. سمیه فرهنگ دهقان مسئولیت کلی پروژه و هماهنگی بین اعضای تیم را برعهده داشته است. سید حسین نظیری نقش هایی مثل تحقیق، تجزیه و تحلیل داده ها، تدوین استنباطات و مرور نهایی مقاله را برعهده داشته است. مصطفی پویاکیان و صدیقه صادق حسینی در فرایند انجام طرح و تهیه مقاله مشاوره های لازم را ارائه نمودند و به تدوین محتوا و روند کلی کمک کرده اند. همه نویسندگان تأکید می کنند که اعضای تیم به اخلاق و قوانین صنعت علمی پایبند بوده و به صداقت و شفافیت در ارائه نتایج و استنباطات پژوهشی متعهد هستند.

References

1. Boverhof DR, David RM. Nanomaterial characterization: considerations and needs for hazard assessment and safety evaluation. *Analytical and bioanalytical chemistry*. 2010;396:953-61.
2. Europa O. E-fact 72: Tools for the management of nanomaterials in the workplace and prevention measures [E-Fact]. 2013 [19/06/2013]. Available from: [https://osha.europa.eu/en/publications/e-fact-72-tools-management-nanomaterials-workplace-and-prevention-measures].
3. Parveen S, Misra R, Sahoo SK. Nanoparticles: a boon to drug delivery, therapeutics, diagnostics and imaging. *Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine*. 2012;8(2):147-66.
4. Fan AM, Alexeeff G. Nanotechnology and nanomaterials: toxicology, risk assessment, and regulations. *Journal of nanoscience and nanotechnology*. 2010;10(12):8646-57.
5. Roco MC, Mirkin CA, Hersam MC. Nanotechnology research directions for societal needs in 2020: summary of international study. *Journal of nanoparticle research*. 2011;13:897-919.
6. Lidén G. The European commission tries to define nanomaterials. *Annals of Occupational Hygiene*. 2011;55(1):1-5.
7. Beaucham C, Hodson L. General safe practices for working with engineered nanomaterials in research laboratories. 2012.
8. Hristozov DR, Gottardo S, Critto A, Marcomini A. Risk assessment of engineered nanomaterials: a review of available data and approaches from a regulatory perspective. *Nanotoxicology*. 2012;6(8):880-98.
9. T D. Nanotechnology Market By Type (Nanosensor and Nanodevice) and Application (Electronics, Energy, Chemical Manufacturing, Aerospace & Defense, Healthcare, and Others): Global Opportunity Analysis and Industry Forecast, 2021-2030 Allied Market Research2021 [
10. Maryam Saniejlal MHM. The Role and Place of Internationalization in Shaping Future of Nano Technology in Iran. *Journal of Iran Futures Studies*. 2020;5(1):25-48.
11. Product IN. Iran's total nanotechnology statistics, https://nanoproduct.ir/page/2995 2023 [Available from: https://nanoproduct.ir/page/2995].
12. Kuhlbusch T, Fissan H, Asbach C, editors. Nanotechnologies and environmental risks: measurement technologies and strategies. *Nanomaterials: risks and benefits*; 2009: Springer.
13. Oberdörster G, Maynard A, Donaldson K, Castranova V, Fitzpatrick J, Ausman K, et al. Principles for characterizing the potential human health effects from exposure to nanomaterials: elements of a screening strategy. *Particle and fibre toxicology*. 2005;2(1):1-35.
14. Schulte PA, Trout DB. Nanomaterials and worker health: medical surveillance, exposure registries, and epidemiologic research. *Journal of Occupational and Environmental Medicine*. 2011:S3-S7.
15. Maynard AD, Aitken RJ. Assessing exposure to airborne nanomaterials: current abilities and future requirements. *Nanotoxicology*. 2007;1(1):26-41.
16. Organization WH. Reference methods for measuring airborne man-made mineral fibres (MMMF). *Environmental Health (WHO-EURO): World Health Organization. Regional Office for Europe*; 1985.
17. Monteiro-Riviere NA, Tran CL. *Nanotoxicology: characterization, dosing and health effects*: CRC Press; 2007.
18. 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;3:1-35.
19. 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. *Particle and fibre toxicology*. 2005;2(1):1-14.
20. Schulte PA, Leso V, Niang M, Iavicoli I. Current state of knowledge on the health effects of engineered nanomaterials in workers: a systematic review of human studies and epidemiological investigations. *Scandinavian journal of work, environment & health*. 2019;45(3):217.
21. Manna P, Ghosh M, Ghosh J, Das J, Sil PC. Contribution of nano-copper particles to in vivo liver dysfunction and cellular damage: Role of IκBα/NF-κB, MAPKs and mitochondrial signal. *Nanotoxicology*. 2012;6(1):1-21.
22. Schulte P, Kuempel E, Drew N. Characterizing risk assessments for the development of occupational exposure limits for engineered nanomaterials. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*. 2018;95:207-19.
23. Kuempel ED, Geraci CL, Schulte PA. Risk assessment and risk management of nanomaterials in the workplace: translating research to practice. *Annals of occupational hygiene*. 2012;56(5):491-505.
24. Iavicoli I, Fontana L, Pingue P, Todea AM, Asbach C. Assessment of occupational exposure to engineered nanomaterials in research laboratories using personal monitors. *Science of The Total Environment*. 2018;627:689-702.
25. Kuempel E, Castranova V, Geraci C, Schulte P. Development of risk-based nanomaterial groups for occupational exposure control. *Journal of Nanoparticle Research*. 2012;14:1-15.
26. Pouyakian M, Khatabakhsh A, Yazdi M, Zarei E. Optimizing the Allocation of Risk Control Measures Using Fuzzy MCDM Approach: Review and Application. *Linguistic Methods Under Fuzzy Information in System Safety and Reliability Analysis*. 2022:53-89.
27. Belton V, Stewart T. *Multiple criteria decision analysis: an integrated approach*: Springer Science & Business Media; 2002.

28. OECD. Important issues on risk assessment of manufactured nanomaterials. Series on the Safety of Manufactured Nanomaterials. 2012;33:1-57.
29. Savolainen K, Alenius H, Norppa H, Pylkkänen L, Tuomi T, Kasper G. Risk assessment of engineered nanomaterials and nanotechnologies—a review. *Toxicology*. 2010;269(2-3):92-104.
30. Council NR. Risk assessment in the federal government: managing the process. 1983.
31. ISO/TS 12901-2:2014. Nanotechnologies - Occupational risk management applied to engineered nanomaterials - Part 2: Use of the control banding approach. International Organization for Standardization. Geneva (Switzerland).
32. Demir E. A review on nanotoxicity and nanogenotoxicity of different shapes of nanomaterials. *Journal of Applied Toxicology*. 2021;41(1):118-47.
33. Zalk DM, Paik SY, Swuste P. Evaluating the control banding nanotool: a qualitative risk assessment method for controlling nanoparticle exposures. *Journal of nanoparticle research*. 2009;11:1685-704.
34. Baig N, Kammakakam I, Falath W. Nanomaterials: A review of synthesis methods, properties, recent progress, and challenges. *Materials Advances*. 2021;2(6):1821-71.
35. Paik SY, Zalk DM, Swuste P. Application of a pilot control banding tool for risk level assessment and control of nanoparticle exposures. *Annals of Occupational Hygiene*. 2008;52(6):419-28.
36. Gatoo MA, Naseem S, Arfat MY, Mahmood Dar A, Qasim K, Zubair S. Physicochemical properties of nanomaterials: implication in associated toxic manifestations. *BioMed research international*. 2014;2014.
37. Fubini B, Fenoglio I, Tomatis M, Turci F. Effect of chemical composition and state of the surface on the toxic response to high aspect ratio nanomaterials. *Nanomedicine*. 2011;6(5):899-920.
38. Schneider T, Brouwer DH, Koponen IK, Jensen KA, Fransman W, Duuren-Stuurman V, et al. Conceptual model for assessment of inhalation exposure to manufactured nanoparticles. *Journal of exposure science & environmental epidemiology*. 2011;21(5):450-63.
39. Woskie SR, Bello D, Virji MA, Stefaniak AB. Understanding workplace processes and factors that influence exposures to engineered nanomaterials. *International journal of occupational and environmental health*. 2010;16(4):365-77.
40. Ostiguy C, Lapointe G, Ménard L, Cloutier Y, Trottier M, Boutin M, et al. Nanoparticles: actual knowledge about occupational health and safety risks and prevention measures. Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST). 2006.
41. Hristozov D, Zabeo A, Alstrup Jensen K, Gottardo S, Isigonis P, Maccalman L, et al. Demonstration of a modelling-based multi-criteria decision analysis procedure for prioritisation of occupational risks from manufactured nanomaterials. *Nanotoxicology*. 2016;10(9):1215-28.
42. Oomen AG, Steinhäuser KG, Bleeker EA, van Broekhuizen F, Sips A, Dekkers S, et al. Risk assessment frameworks for nanomaterials: Scope, link to regulations, applicability, and outline for future directions in view of needed increase in efficiency. *NanoImpact*. 2018;9:1-13.
43. Isigonis P, Hristozov D, Benighaus C, Giubilato E, Grieger K, Pizzol L, et al. Risk governance of nanomaterials: review of criteria and tools for risk communication, evaluation, and mitigation. *Nanomaterials*. 2019;9(5):696.
44. Hristozov D, Gottardo S, Semenzin E, Oomen A, Bos P, Peijnenburg W, et al. Frameworks and tools for risk assessment of manufactured nanomaterials. *Environment international*. 2016;95:36-53.
45. Brown RC. Air filtration: an integrated approach to the theory and applications of fibrous filters. (No Title). 1993.
46. Yokel RA, MacPhail RC. Engineered nanomaterials: exposures, hazards, and risk prevention. *Journal of occupational medicine and toxicology*. 2011;6(1):1-27.
47. Hirst N, Brocklebank M, Ryder M. Containment systems: a design guide: IChemE; 2002.
48. INSO 19816-1:2015. Nanotechnologies - Occupational risk management applied to engineered nanomaterials Part 1: Principles and approaches. Institute of Standards and Industrial Research of Iran.
49. Fonseca AS, Kuijpers E, Kling KI, Levin M, Koivisto AJ, Nielsen SH, et al. Particle release and control of worker exposure during laboratory-scale synthesis, handling and simulated spills of manufactured nanomaterials in fume hoods. *Journal of Nanoparticle Research*. 2018;20:1-15.
50. European Environmental Agency. Late lessons of early warning II. EEA Report No 1/2013. ISSN 1725-9177. doi: 10.2800/73322.