

ORIGINAL RESEARCH PAPER

A General Framework for Developing a Comprehensive Health Risk Assessment Method for Nanomaterials-Related Activities: A Critical Analysis

Soqrat Omari Shekaftik^{1,2}, Abbas Sheikhtaheri^{3,4,5}, Esmail Zarei^{6,7}, Somayeh Farhang Dehghan^{8,9}, Neda Mehrparvar¹, Farideh Golbabaie^{1,*}

¹Department of Occupational Health Engineering, School of Public Health, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran

²Students' Scientific Research Center, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran

³Health Management and Economics Research Center, Health Management Research Institute, Iran University of Medical Sciences, Tehran, Iran

⁴Department of Health Information Management, School of Health Management and Information Sciences, Iran University of Medical Sciences, Tehran, Iran

⁵Digital Health and Artificial Intelligence in Medicine Research Unit, Iran University of Medical Sciences, Tehran, Iran

⁶Department of Safety Science, College of Aviation, Embry-Riddle Aeronautical University, Prescott, AZ, 86301, USA

⁷Robertson Safety Institute (RSI), Embry-Riddle Aeronautical University, Prescott, AZ, 86301, USA

⁸Environmental and Occupational Hazards Control Research Center, Research Institute for Health Sciences and Environment, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran

⁹School of Public Health and Safety, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran

Received: 10 - 3 - 2025

Accepted: 2 - 6 - 2025

ABSTRACT

Introduction: Nanomaterials are widely applied across diverse scientific and industrial sectors; however, their emergence has introduced a new generation of occupational hazards for workers. Concurrent with discussions on the adverse effects of nanomaterials on human health, researchers have sought to develop methods for assessing occupational risks associated with these materials. Accordingly, this study aims to propose a general framework for the development of such methods.

Material and Methods: This is a critical analysis study designed to evaluate existing methods for assessing occupational risks related to nanomaterials and ultimately propose a modified framework for refining these methods. By examining current approaches and identifying their strengths and weaknesses, the authors have proposed an improved framework for occupational risk assessment of nanomaterials.

Results: The proposed framework is based on two key dimensions: "Severity/Hazard" and "Probability/Exposure." The first dimension determines the potential risk level arising from exposure to nanomaterials, with the most critical factors being the intrinsic properties and toxicology of the nanomaterial itself, parent materials, and similar substances. The second dimension describes the likelihood and nature of exposure to nanomaterials during work activities, with the most influential factors being worker, job tasks, and workplace environment characteristics.

Conclusion: The lack of sufficient data and numerous uncertainties regarding bio-nano interactions make quantitative risk assessment (the traditional occupational health approach) difficult, less reliable, and in some cases unfeasible for nanomaterials—given current knowledge. Qualitative and semi-quantitative approaches, such as Control Banding, despite demonstrating positive aspects, have faced significant criticism. The framework-based method proposed herein appears capable of partially overcoming these challenges.

Keywords: Risk assessment, Nanomaterials, Method Development, New Framework

HOW TO CITE THIS ARTICLE

Omari Shekaftik S., Sheikhtaheri A., Zarei E., Farhang Dehghan S., Mehrparvar N., Golbabaie F. A General Framework for Developing a Comprehensive Health Risk Assessment Method for Nanomaterials-Related Activities: A Critical Analysis. *J Health Saf Work*. 2025; 15(2): 352-368.

* Corresponding Author Email: fgolbabaie@tums.ac.ir

Copyright © 2025 The Authors.

Published by Tehran University of Medical Sciences

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.

1. INTRODUCTION

Over recent decades, the advancement of nanotechnology has led to the development of materials with unique physical and chemical properties. These materials have found widespread applications across various scientific and industrial domains, including structural engineering, electronics, optics, consumer goods, energy production and storage, soil and water conservation, as well as medicine for therapeutic and diagnostic purposes. However, the rise of nanotechnology has also led to increased exposure of workers, consumers, and the environment to new airborne hazards from nanomaterials in industries and laboratories. Studies indicate that engineered nanomaterials are being introduced into workspaces, research facilities, and natural surroundings through various means. Exposure to nanomaterials in work settings can result from nanomaterials being released from powders, liquids, or a solid matrix during their production, use, or recycling. Limited awareness among nanotechnology workers regarding the potential harmful effects of these materials has led to widespread perception that these materials are safe. Ventilation systems that transport air from laboratories and workplaces where nanomaterials are handled, along with residues from nanomaterial-related activities and nanotechnology-based products are primary pathways for the release of these materials into the environment. This underscores the importance of risk management in nanotechnology, starting with risk assessment and necessitating the availability of appropriate tools.

2. MATERIAL AND METHODS

This study provides a critical analysis that examines and evaluates current risk assessment methodologies applied to activities involving nanomaterials, with the ultimate goal of proposing a revised framework to guide the development of these methodologies. To achieve this, the authors performed a non-systematic search in databases and scientific search engines, including PubMed, Scopus, and Google Scholar, using keywords such as “risk assessment,” “nanomaterials,” “nanotechnology,” and “risk management” to identify the most significant approaches in the risk assessment of these activities. In the next step, the authors reviewed these approaches, reporting their characteristics and their suitability or lack thereof for risk assessment in nanomaterial-related

activities. Finally, by synthesizing these discussions, the authors proposed a modified framework that can be utilized for developing new risk assessment methodologies.

3. RESULTS AND DISCUSSION

Quantitative Approach

The traditional approach of occupational health to evaluating exposure to harmful substances at work involves measuring their concentration in the worker's breathing zone and comparing these levels with the threshold limit values (TLVs) set by reputable organizations. Implementing this method requires that 1) there are standard and agreed upon sampling methods for the substances, 2) the concentrations sampled accurately reflect the working environment's atmosphere, 3) appropriate TLVs are available, 4) suitable analytical techniques are available for determining exposure levels, 5) appropriate equipment for sampling and analysis exists and are available, and 6) exposure levels that have the potential to cause adverse effects are also known. The lack of any of these conditions reduces the value of exposure assessment and the subsequent risk assessment, raising uncertainties about the suggested control measures that result from this risk assessment.

Qualitative and semi-quantitative Approaches (Control Banding (CB))

Methods based on Control Banding (CB) provide a useful semi-quantitative/qualitative framework for assessing the potential health risks associated with the handling and manipulation of nanomaterials. To determine the ideal control levels, CB combines exposure scenarios or possible exposures with groupings or “bands” of health hazards. While these methods demonstrate good validity and, in some cases, efficiency in assessing the risk associated with nanomaterial applications, they are not without their limitations. A primary limitation of the aforementioned methods is their imbalanced focus on ‘exposure’ and ‘hazard’. Current methodologies often overlook the biological impacts of nanoparticles and the associated toxicological data. Some risk assessment methods now consider the properties of the parent materials (Nanotool) or characteristics of similar materials (ANSES) when evaluating nanomaterials. This appears to be a serious flaw in the definition, as studies have shown that nanomaterials differ from bulk materials in at least 28 features, despite

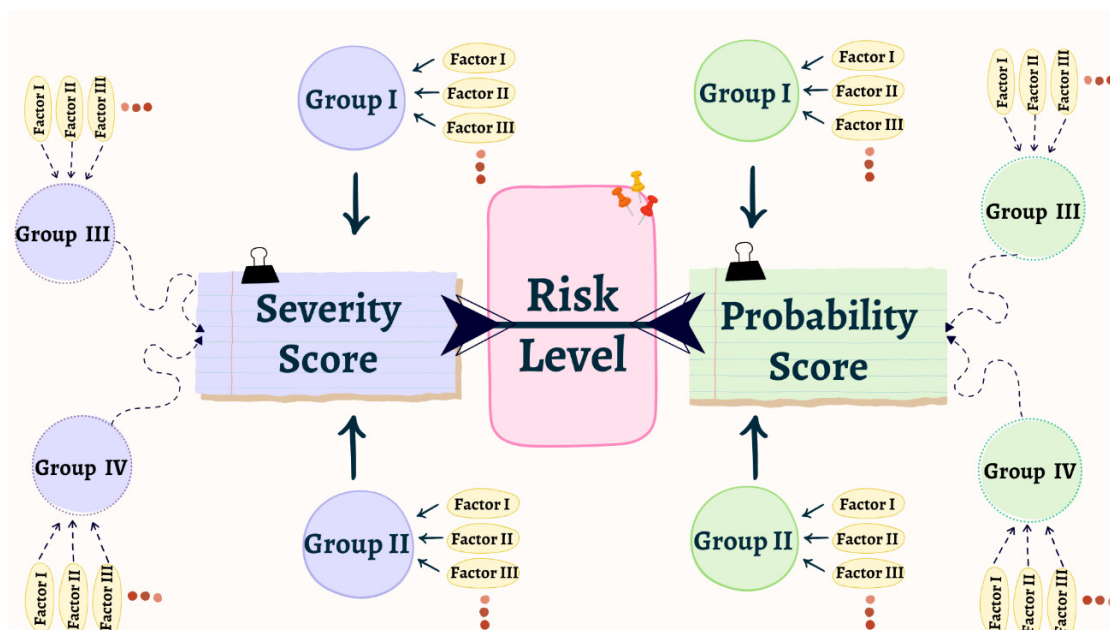


Fig. 1: Proposed risk assessment framework for activities involving nanomaterials (Dashed line means that these groups/factors can exist or not exist.)

having the same chemical composition. Another limitation of these methods is their reliance on subjective judgment. Another issue with some of these methods (CB Nanotool and IN Nanotool) is that, because they have a “unknown” option, high scoring and, ultimately, a high risk level are determined based on a lack of knowledge about the nanomaterials under investigation, which might not be entirely accurate. Therefore, a more thorough framework for risk assessment of activities involving nanomaterials needs to be proposed, based on what was stated.

The proposed framework has two main axes (figure 1):

The first axis, the Severity/Hazard: This axis specifies the potential danger (hazard) that exposure to nanomaterials may cause. The determination/estimation of the hazard caused by exposure to nanomaterials will be based mostly on the properties of the nanomaterial itself, as well as the proven effects and existing toxicological information about the nanomaterial. To identify these characteristics, according to CB-based methods, it is recommended to consult safety data sheets (SDSs) and other relevant sources. In the absence of such data, the characteristics of parent materials and similar substances can be used as a reference. Alternatively, expert judgment may be

applied when other sources of information are not available. It is also advised to use appropriate tools for characterization of nanomaterials to ascertain these properties (the semi-quantitative methods). The main challenge of this axis is to determine the appropriate method (and/or device) to determine these characteristics.

This section also addresses the interaction between nanomaterials and living tissues, known as bio-nano interaction. To investigate these interactions, a range of laboratory assays is employed, including viability essays to assess cellular health, oxidative stress tests to measure reactive oxygen species production, and disease-specific assays to evaluate potential pathological effects, among others. These methodologies provide critical insights into the biological impacts of nanomaterials, facilitating a deeper understanding of their safety and functionality in biomedical applications.

The second axis, Probability/Exposure: This axis seeks to describe the possibility and how to encounter nanomaterials during activity. Determining this axis will be possible by describing the work environment and task under review and other factors. Characteristics of the task (activity), such as the repetition of the task, the duration of each task, the amount of nanomaterial used are

examined as follows.

Characteristics and features of the work environment—including existing control measures, management plans, and the availability and use of personal protective equipment (PPE)— will also be examined. This involves a detailed assessment of the workplace controls, focusing particularly on engineering controls such as general and local exhaust ventilation systems, glove boxes, safety cabinets, and other containment devices, alongside administrative controls and PPE usage.

By finding out the effective factors and groups in each of the axes, the output resulting from the combination of the “Severity/Hazard” and “Probability/Exposure” will be the Risk Level of the activity (Figure 1).

4. CONCLUSIONS

Considering the existing quantitative and qualitative methods for assessing the risks associated with activities involving nanomaterials, a comprehensive approach to risk assessment necessitates identifying all relevant parameters and concepts. Equally important is understanding their interrelationships and organizing these parameters into a structured framework. Developing such

a framework represents a crucial step toward achieving more complete and robust methodologies for evaluating the risks linked to nanomaterials. This approach not only enhances the accuracy of risk assessments but also supports the development of standardized practices in managing the potential hazards of nanomaterial-related activities. A significant limitation in developing such methods is the challenge of accessing all factors involved in risk assessment and understanding the complex relationships between them. However, this obstacle can be substantially mitigated by employing approaches such as developing ontologies and creating minimum data sets, which provide structured frameworks and essential baseline information for more comprehensive analysis.

5. ETHICAL CODE

This research was approved by Tehran University of Medical Sciences (ethics code: IR.TUMS.SPH.REC.1403.228).

6. FUNDING

This work was supported by the Tehran University of Medical Sciences under Grant number 76112

چارچوبی کلی برای توسعه روشی جامع برای ارزیابی ریسک بهداشتی فعالیت های مرتبط با نانومواد: یک تحلیل انتقادی

سقراط عمری شکفتیک^{۱،۲}، عباس شیخ طاهری^{۳،۴،۵}، اسماعیل زارعی^{۶،۷}، سمیه فرهنگ دهقان^۸، ندا مهرپور^۱،
فریده گلبابایی^{۹*}

^۱گروه مهندسی بهداشت حرفه ای و ایمنی کار، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران
^۲مرکز تحقیقات علمی دانشجویان، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران
^۳مرکز تحقیقات مدیریت و اقتصاد سلامت، پژوهشکده مدیریت سلامت، دانشگاه علوم پزشکی ایران، تهران، ایران
^۴گروه مدیریت اطلاعات سلامت، دانشکده مدیریت و اطلاع رسانی پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی ایران، تهران، ایران.
^۵هسته پژوهشی هوش مصنوعی و سلامت دیجیتال، دانشکده مدیریت و اطلاع رسانی پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی ایران، تهران، ایران.
^۶گروه علم ایمنی، دانشکده هوانوردی، دانشگاه علوم هوانوردی Embry-Riddle، پرسکات، آریزونا، ۸۶۳۰۱، ایالات متحده آمریکا
^۷مؤسسه ایمنی رابرتسون (RSI)، دانشگاه علوم هوانوردی Embry-Riddle، پرسکات، آریزونا، ۸۶۳۰۱، ایالات متحده آمریکا
^۸مرکز تحقیقات کنترل عوامل زیان آور محیط و کار، پژوهشکده علوم بهداشتی و محیط زیست، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران
^۹دانشکده بهداشت و ایمنی، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۲۰، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۳/۱۲

== چکیده ==

مقدمه: علیرغم کاربردهای فراوان نانومواد در بخش های مختلف علمی و صنعتی، ظهور این مواد، کارکنان را در معرض نسل جدیدی از مخاطرات قرار داده است. همزمان با مطرح شدن بحث اثرات سوء نانومواد بر انسان، محققان درصدد بر آمدن تاروش هایی را برای ارزیابی ریسک های شغلی ناشی از این مواد ارائه دهند. لذا، این مطالعه به دنبال پیشنهاد چارچوبی کلی برای توسعه چنین روش هایی است.

روش کار: این یک مطالعه تحلیل انتقادی است که با هدف نقد و بررسی روش های موجود برای ارزیابی ریسک فعالیت های شغلی مرتبط با نانومواد و در نهایت پیشنهاد یک چارچوب اصلاح شده برای توسعه این روش ها انجام گرفته است. نویسندگان با بررسی رویکردهای موجود و استخراج نقاط قوت و ضعف آن ها، چارچوبی اصلاح شده را برای ارزیابی ریسک فعالیت های شغلی درگیر با نانومواد پیشنهاد کرده اند.

یافته ها: چارچوب پیشنهادی، مبتنی بر دو محور «شدت/خطر» و «احتمال/مواجهه» است. محور اول میزان خطر بالقوه ای را که در اثر مواجهه با نانومواد ممکن است ایجاد شود، مشخص می کند. ویژگی ها و سم شناسی خود نانوماده و یا مواد والد و مواد مشابه مهمترین فاکتورهای این محور هستند. محور دوم به توصیف احتمال و نحوه مواجهه با نانومواد در حین فعالیت می پردازد. ویژگی های افراد، فعالیت و محیط کار، تاثیرگذارترین فاکتورهای این محور هستند.

نتیجه گیری: نبود اطلاعات کافی و وجود عدم قطعیت های فراوان در زمینه تعامل زیست-نانو، انجام ارزیابی ریسک کمی (روش سنتی بهداشت حرفه ای) را برای نانومواد -با دانش کنونی- مشکل، با قابلیت استناد پایین و در مواردی غیرقابل انجام کرده است. رویکردهای کیفی و نیمه کمی، از جمله Control Banding، باوجود برخی ویژگی های مثبت، بسیار مورد نقد قرار گرفته اند. به نظر می رسد روش مبتنی بر چارچوب پیشنهادی بتواند تا حدودی این نقص ها را برطرف کند.

== کلمات کلیدی: ارزیابی ریسک، نانومواد، توسعه روش، چارچوب جدید

مقدمه

فعالیت‌های درگیر با نانومواد پیشنهاد شده و مورد استفاده قرار گرفته اند (۹). اما با توجه به ویژگی‌های منحصر به فرد نانومواد و عدم قطعیت‌های فراوانی که در رابطه با تعامل این مواد با مدیای زیستی و نیز رفتار آن‌ها در محیط‌های کاری وجود دارد، هنوز روش جامعی که بتواند ارزیابی کاملی از ریسک شغلی این مواد به دست بدهد، پیشنهاد نشده است. به نظر می‌رسد گام اول برای رسیدن به چنین روشی، پیشنهاد و ایجاد چارچوبی است که شالوده روش را تشکیل دهد. چارچوبی که براساس نقد و بررسی روش‌های موجود و به دنبال برطرف کردن نقص‌های آن‌ها باشد. لذا این مطالعه به دنبال توسعه چنین چارچوبی است.

روش کار

این یک مطالعه تحلیل انتقادی است که به منظور بررسی و نقد روش‌های ارزیابی ریسک فعالیت‌های مرتبط با نانومواد و در نهایت پیشنهاد یک چارچوب اصلاح‌شده برای توسعه این روش‌ها انجام گرفته است. به منظور شناسایی و بررسی این روش‌ها، نویسندگان با انجام جستجو در پایگاه‌های داده و موتورهای های جستجوی علمی، از جمله PubMed، Scopus و Google Scholar، با استفاده از کلیدواژه‌های "ارزیابی ریسک"، "نانومواد"، "نانوفناوری" و "مدیریت ریسک"، مهمترین رویکردها در ارزیابی ریسک این فعالیت‌ها را شناسایی کردند. تمرکز این مطالعه بر شناسایی و بررسی روش‌ها بود و به شکل‌های مختلف و بررسی انواع مقالات و اسناد این شناسایی‌ها به شکل مناسبی صورت گرفت. بازه زمانی برای این جستجوها از ابتدای سال ۲۰۰۷ (زمان معرفی اولین روش ارزیابی ریسک مبتنی بر Control Banding برای نانومواد) تا پایان سال ۲۰۲۴ تعیین شد. در مرحله بعد، نویسندگان مقالات و اسناد حاوی رویکردهای ارزیابی ریسک نانومواد را گزینش کردند و ویژگی‌های آن‌ها و تناسب/عدم تناسب آن‌ها را با ارزیابی ریسک فعالیت‌های مرتبط با نانومواد گزارش کردند. در نهایت، با کنار هم قراردادن این مباحث، نویسندگان چارچوبی تعدیل‌شده را

طی دهه‌های اخیر، توسعه نانوفناوری به تولید موادی با خصوصیات فیزیکی و شیمیایی ویژه منجر شده است که کاربردهای گسترده‌ای در حوزه‌های علمی و صنعتی، از جمله در مهندسی ساختار^۱، الکترونیک، اپتیک، کالاهای مصرفی، تولید و ذخیره انرژی، حفظ خاک و آب و همچنین در پزشکی به منظور اهداف درمانی و تشخیصی، دارند (۱). از طرف دیگر، با ظهور نانوفناوری، نانومواد که در صنایع یا آزمایشگاه‌ها تولید یا مصرف می‌شوند، کارکنان، مصرف‌کنندگان و محیط زیست را در معرض نسل جدیدی از مخاطرات ذرات هواپرد قرار داده اند (۲). تحقیقات نشان می‌دهند که نانومواد مهندسی شده، به شکل‌های گوناگون در حال ورود به محیط‌های کاری، تحقیقاتی و محیط زیست هستند (۳، ۴). مواجهه با نانومواد در محیط‌های کاری، ممکن است ناشی از رهاشدن نانومواد از پودرها، مایعات و یا یک ماتریس جامد باشد، که در حین تولید، مصرف و یا بازیافت آن‌ها اتفاق می‌افتد (۵). آشنایی کم کارکنان حوزه نانوفناوری با اثرات نامطلوب احتمالی این مواد، موجب شده که این مواد عموماً بی‌خطر در نظر گرفته شوند (۶). هودهایی که هوای آزمایشگاه‌ها و محیط‌های کاری نانومواد را به محیط زیست انتقال می‌دهند، پسماندهای فعالیت‌های مرتبط با نانومواد و محصولات مبتنی بر نانوفناوری، عمده راه‌های ورود این مواد به محیط زیست هستند (۷). براساس آنچه بیان شد، لزوم مدیریت ریسک در حوزه نانوفناوری مشخص می‌گردد. گام اولیه برای مدیریت ریسک محیط‌های کاری مرتبط با نانومواد، ارزیابی ریسک است و لازمه انجام آن، داشتن ابزار مناسب است. همزمان با مطرح شدن بحث اثرات سوء نانومواد بر انسان و محیط زیست، محققان درصدد برآمدن تا روش‌هایی را برای ارزیابی ریسک‌های بهداشتی ناشی از این مواد ارائه دهند (۸).

تاکنون روش‌های متعددی براساس رویکردهای کمی، کیفی و نیمه‌کمی برای ارزیابی ریسک بهداشتی

1. Structural Engineering

برای این منظور پیشنهاد کردند که می تواند برای ایجاد روش های ارزیابی ریسک جدید مورد استفاده قرار گیرد.

== یافته ها

رویکرد کمی

روش سنتی بهداشت حرفه ای برای ارزیابی مواجهه با مواد مضر در محیط کار، عبارت است از اندازه گیری غلظت این مواد در ناحیه تنفسی کارگر و سپس مقایسه این مقادیر با حدود مواجهه مجاز (TLV) آن مواد، که بوسیله سازمان های معتبر ارائه شده اند (۱۰، ۱۱). انجام چنین روشی به این معنا است که (۱) روش های استاندارد و مورد اجماع نمونه برداری برای آن مواد وجود دارند (۲) غلظت های نمونه برداری شده نشان دهنده اتمسفری هستند که کارگر در آن تنفس می کند، (۳) TLV های مناسب مشخص هستند، (۴) روش های آنالیز مناسب برای سنجش سطح مواجهه وجود دارند، (۵) تجهیزات مناسب برای اندازه گیری و آنالیز وجود دارند و در دسترس هستند و (۶) سطوح مواجهه ای که می توانند باعث ایجاد اثرات نامطلوب شوند نیز مشخص هستند (۱۱، ۱۲). فقدان هر کدام از شرایط فوق، ارزش استنادی ارزیابی مواجهه و ارزیابی ریسک انجام گرفته براساس آن را پایین می آورد و اقدامات کنترلی پیشنهاد شده بر مبنای این ارزیابی ریسک را نیز زیر سوال می برد؛ چنین کمبودی هم اکنون در زمینه ارزیابی ریسک فعالیت های درگیر با نانومواد وجود دارد (۱۱، ۱۳).

- نمونه برداری

بررسی ها نشان می دهد که روش های استاندارد و مورد اجماعی برای نمونه برداری و آنالیز نانومواد وجود ندارد (۱۴)؛ اگرچه در مطالعاتی، با استفاده از روش های معمول برای نمونه برداری و آنالیز مواد شیمیایی، این کار انجام شده است. رفتار نانومواد در هوا با رفتار مواد شیمیایی بالک تفاوت های زیادی دارد که ناشی از تفاوت در اندازه، سطح ویژه و خواص فیزیکی و شیمیایی آنها است (۱۵). این مواد به علت اندازه بسیار کوچکشان، به

راحتی و به مدت بسیار بیشتری (نسبت به مواد بالک) در هوا معلق می مانند و به علت سطح زیادی که دارند، تعامل بیشتری با محیط اطراف انجام می دهند. توزیع آن ها در هوا نیز، برخلاف مواد شیمیایی بالک که عموماً یکنواخت در نظر گرفته می شود، پراکنده و خوشه ای است و از یکنواختی برخوردار نیست (۱۶). با توجه به رفتار متفاوت و بعضاً ناشناخته نانومواد در هوای محیط کار، حتی در صورت امکان نمونه برداری از آن ها، نمی توان غلظت های نمونه برداری شده را نماینده اتمسفری دانست که کارگر در آن تنفس می کند.

- حدود مجاز مواجهه شغلی

ایجاد یک حد آستانه مجاز (TLV)، شامل یک فرآیند جامع است که نتایج تحقیقات علمی، نظرات متخصصان و ملاحظات عملی را برای ایجاد حدود ایمن مواجهه با مواد شیمیایی مختلف و عوامل فیزیکی در محل کار، ادغام می کند. شاید بتوان گفت که مهمترین گام در این فرآیند، بررسی و مرور یافته های علمی منتشر شده درباره عامل مورد نظر، در رشته های علمی مختلف مانند بهداشت صنعتی، سم شناسی، طب کار و اپیدمیولوژی است (۱۷). این گام اساسی تضمین می کند که TLV براساس دانش علمی فعلی استوار است. بررسی ها نشان می دهد که در ارتباط با نانومواد، مطالعات در این زمینه ها به حد کفایت نرسیده است و لذا، جز در موارد محدود و بوسیله چند سازمان و محقق، TLV مورد اجماعی برای نانومواد وجود ندارد (۱۸).

- مقیاس اندازه گیری

از دیگر چالش های مربوط به این حوزه، می توان به عدم اجماع بر سر مقیاس^۱ مناسب برای اندازه گیری کمی نانومواد اشاره کرد. مطالعات مختلفی که تاکنون سعی در کمی کردن مواجهه با نانومواد داشته اند، در مجموع به دنبال اندازه گیری و گزارش سه مقیاس غلظت جرمی، غلظت عددی و غلظت سطحی بوده اند (۱۹). تقریباً تمام

1. Metric

اندازه ذرات موردنظر) سطح هندسی را محاسبه کرد، اما برای ساختارهای نامنظم و پیچیده‌ای مانند کلوخه‌ها و انبوهه‌ها، امکان محاسبه دقیق سطح هندسی وجود ندارد (۲۵). همچنین معلوم نیست که آیا فقط سطح بیرونی نانوذرات باید در نظر گرفته شود یا سطوح منافذ داخلی نیز نقش دارند (۲۶). اما تکنیک‌ها و ابزارهایی وجود دارند که به صورت غیرمستقیم می‌توانند غلظت سطحی ذرات را محاسبه کنند. اندازه‌گیری غلظت جرمی و یا غلظت عددی ذرات و سپس تبدیل آن به غلظت سطحی (با توجه به شکل و توزیع اندازه ذرات)، یکی از این تکنیک‌ها است (۲۷). همچنین تکنیک‌هایی برای اندازه‌گیری مستقیم مساحت سطح فعال^۶ آئروسول‌ها (معروف به مساحت سطح Fuchs) وجود دارد. سطح فعال، به عنوان کسری از مساحت سطح هندسی ذره که بطورمستقیم برای اجزای (یون‌ها، مولکول‌ها، اتم‌ها) موجود در گاز اطراف قابل دسترسی است، تعریف می‌شود (۲۸، ۲۹). به تازگی مقیاس غلظت سطحی ته نشین شده در ریه^۷ توجه محققان را به خود جلب کرده است. این مقیاس در حقیقت ترکیبی است از غلظت سطحی ذرات، به عنوان یک مقیاس مرتبط با سلامت و کارایی رسوب همان ذرات در ریه. غلظت LDSA نشان‌دهنده کسری از غلظت سطحی هوابرد است که در ریه انسان رسوب می‌کند (۳۰).

در مواردی ممکن است غلظت عددی نشان‌گر خوبی از میزان سمیت نانومواد باشد. برای مثال، برخی محققان ترجیح می‌دهند در مواجهه تنفسی با نانومواد، به جای غلظت‌های جرمی و سطحی، تعداد ذرات ته نشین شده در قسمت‌های مختلف دستگاه تنفس را بدانند. به نظر می‌رسد، این مقیاس همبستگی بهتری با اثرات تنفسی نانومواد داشته باشد (۳۱). غلظت عددی، معمولاً به شکل تعداد ذره در واحد حجم هوا گزارش می‌شود. تجهیزات مورد استفاده برای اندازه‌گیری غلظت عددی نانوذرات، نسبت به دو مقیاس دیگر، دردسترس‌تر بوده و دارای

استانداردهای مواجهه با آئروسول‌ها، براساس غلظت جرمی^۱ هستند؛ البته استثناهایی نیز وجود دارند، مانند آزمون^۲ که استاندارد آن براساس غلظت عددی^۳ است. متخصصین بهداشت حرفه‌ای، غلظت جرمی را ترجیح می‌دهند؛ زیرا نمونه‌برداری و آنالیز نمونه‌ها در این روش، فرآیندی سراسر^۴ است: فیلتر وزن می‌شود، نمونه هوای آلوده از آن عبور داده می‌شود، فیلتر دوباره وزن می‌شود؛ اختلاف وزن فیلتر، قبل و بعد از عبور هوا، با یکی از واحدهای جرم بر واحد هوا (برای مثال میلی‌گرم بر مترمکعب) گزارش می‌شود (۳۰).

بسیاری از متخصصان بر این عقیده‌اند که غلظت جرمی، مقیاسی مناسب برای ارزیابی مواجهه با نانومواد نیست؛ به این دلیل ساده که جرم این ذرات ناچیز است (۳۱). ناچیزبودن جرم آن‌ها باعث می‌شود به تجهیزات دقیق‌تری برای اندازه‌گیری جرم آن‌ها نیاز داشته باشیم و در بسیاری موارد، به دلایل مختلف مانند هزینه بالا و ضعف‌های تکنولوژیکی، امکان دسترسی به چنین تجهیزاتی وجود ندارد (۳۲). بررسی متون مربوط به سمیت نانومواد نشان می‌دهد که بسیاری از محققان اثرات نامطلوب ناشی از مواجهه با نانومواد را با مساحت سطح آن‌ها مرتبط می‌دانند (۳۳). لذا به نظر منطقی است که غلظت سطحی^۴ ذرات اندازه‌گیری شده و شاخص‌های مواجهه، براساس مساحت سطح نانومواد، ایجاد شوند (۳۴). درحالی که برای بررسی سمیت نانومواد، اصل مساحت سطح ممکن است بسیار مهم باشد، هم‌اکنون هیچ ابزاری وجود ندارد که بتواند مستقیماً غلظت سطحی هندسی^۵ ذرات را تعیین کند. در حقیقت، حتی تعریف سطح (مرتبط) یک ذره نیز، هنوز در حاله‌ای از ابهام قرار دارد؛ چراکه برای ساختارهای هندسی منظم نانومواد (مانند ساختار کره‌ای)، می‌توان به سختی (با اندازه‌گیری توزیع اندازه ذرات، وزن دادن توزیع با مساحت سطح ذرات و سپس ادغام در محدوده

1. Mass Concentration
2. Number Concentration
3. Straightforward
4. Surface area concentration
5. Geometric surface area

6. Active surface area
7. Lung-deposited surface area (LDSA) concentration

تنوع بالایی هستند. شمارنده های تراکمی ذرات^۱، اندازه گیر پویشی جنبشی ذرات^۲ و اندازه گیر جنبشی سریع ذرات^۳ از مهمترین این تجهیزات هستند که به شکل های مختلف ساکن و پرتابل در دسترس هستند. البته این تجهیزات نیز بسیار گران قیمت بوده و صحت آن ها نیز با کاهش اندازه نانوذرات مورد اندازه گیری، کاهش چشم گیری می یابد (۳۲).

- اقدامات کنترلی

تاکنون، محققان و سازمان های مختلف طیف وسیع و متنوعی از اقدامات کنترلی را، براساس "سلسله مراتب کنترل ها" پیشنهادی NIOSH، برای کاهش/حذف مواجهه با نانومواد، در فعالیت های درگیر با این مواد، پیشنهاد کرده اند (۳۳). "سلسله مراتب کنترل ها"، به ترتیب کاهش اثربخشی و اولویت، عبارت از حذف، جایگزینی، کنترل های مهندسی، کنترل های مدیریتی و تجهیزات حفاظت فردی هستند. اما بررسی ها نشان می دهد که دو اولویت اول این سلسله مراتب (حذف و جایگزینی)، اصولاً در محیط های کاری درگیر با نانومواد، قابلیت اجرایی ندارند (۳۴). بسیاری از کنترل های مهندسی معمول (مانند تهویه عمومی، تهویه موضعی و فیوم هودها)، حفاظت کافی را در مقابل نانومواد فراهم نمی کنند و حتی ممکن است به تشدید مواجهه کمک کنند (۳۵). از سوی دیگر، میزان توجه به کنترل های مدیریتی (کاهش زمان مواجهه، آموزش، ضبط وربط و شیوه های مناسب کاری) در محیط های کاری و آزمایشگاهی درگیر با نانومواد به اندازه کافی نیست و در کنترل مواجهه با این مواد، نقش ناچیزی دارند (۳۶). در زمینه تجهیزات حفاظت فردی پیشنهادی نیز تنوع بسیاری وجود دارد. از ماسک های ۱۰۰N، ۹۵N، ۳FFP و ۲FFP گرفته تا رسپراتورهای مجهز به فیلترهای HEPA یا فیلترهای معادل آن. از دستکش های معمول آزمایشگاهی (وینیل، نیتریل، لاتکس و نوپرن) گرفته تا کفش های سربسته،

شلوار بلند بدون دمپای تاشده، پیراهن آستین بلند و کت آزمایشگاهی (۳۷-۴۰). لذا در این زمینه نیز با عدم اجماع مواجه هستیم.

به دنبال فقدان این اطلاعات و همچنین وجود عدم قطعیت های فراوان در زمینه اثرات نانومواد بر انسان و محیط زیست، و همچنین در زمینه ویژگی های از نانوذرات که بر این اثرات موثر هستند، انجام ارزیابی ریسک کمی (روش سنتی بهداشت حرفه ای) برای نانومواد - با دانش کنونی - سخت، با قابلیت استناد پایین و در مواردی غیرقابل انجام خواهد بود (۴۱).

رویکردهای کیفی و نیمه کمی

نظر به آنچه گفته شد، روش های نیمه کمی و کیفی، به منظور ارزیابی ریسک فعالیت های درگیر با نانومواد، بیشتر موردتوجه قرار گرفته اند. این تغییر رویه، استفاده از روش هایی مانند شبیه سازی های مونت کارلو، تکنیک های بیزی، رویکرد لایه ای^۴، رویکردهای تصمیم گیری چندمعیاره، تجزیه وتحلیل درخت تصمیم و Control Banding (CB) را در ارزیابی ریسک فعالیت های درگیر با نانومواد، پررونق کرده است. با بررسی دقیق و کنارهم قراردادن این روش ها، معلوم شده است که رویکردهای مبتنی بر CB، که در سال ۲۰۰۸ با معرفی روش Nanotool رسماً شهرت یافتند، بیشتر از دیگر روش ها با نانومواد سازگار هستند و بسیار موردتوجه محققان قرار گرفته و مورد استفاده آنان هستند (۴۲). در پی این شناخت، چندین روش مبتنی بر CB طراحی و پیشنهاد شد، که مثال های اصلی آن ها عبارت از ANSES، Nanosafer، Guidance، ISO/Precautionary و Stoffenmanager Nano، TS12901-2 Matrix هستند، که نشان دهنده تحول قابل توجهی در استراتژی های ارزیابی ریسک طراحی شده برای فعالیت های مرتبط با نانومواد مهندسی شده است (۴۳).

- روش های ارزیابی ریسک مبتنی بر شیوه Control

Banding

4. Tiered Approach

1. Condensation Particle Counters (CPCs)
2. Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS)
3. Fast-Mobility Particle Sizer (FMPS)

از نانومواد و اطلاعات سم شناختی موجود درباره آن‌ها می‌دهند. زمانی چنین اطلاعاتی درباره نانومواد بسیار کم و غیرقابل استناد بود؛ اما اکنون شواهد نسبتاً خوبی درباره اثرات نانومواد مختلف بر انسان وجود دارند که می‌توانند مورد استناد قرار گیرند (۵۲-۵۴). بخشی از فرآیند ارزیابی ریسک در برخی از روش‌های مذکور مبتنی بر ویژگی‌های مواد مادر (روش Nanotool) و حتی در برخی مبتنی بر ویژگی‌های مواد مشابه با نانوماده موردبررسی است (روش ANSES) (۵۵). به نظر می‌رسد این یک نقص جدی باشد؛ چراکه در تعریف نانومواد داریم که به علت اندازه کوچک و سطح بسیار زیادشان، به کلی با مواد بالک تفاوت دارند؛ حتی اگر ترکیب شیمیایی یکسانی داشته باشند (۵۶) و مطالعات نیز نشان داده‌اند که نانومواد، حداقل در ۲۸ ویژگی، متفاوت از مواد بالک هستند (۵۷). لذا بهتر است که ارزیابی ریسک آن‌ها به کلی متفاوت و مجزا از مواد شیمیایی بالک باشد.

مشکل دیگر این روش‌ها، وابستگی زیاد آن‌ها به قضاوت فردی است (۵۸). بخشی از این وابستگی، به دلیل ابهام در تعاریف و دستورالعمل روش‌ها است. برای مثال در روش Nanotool، معیار تعیین Dustiness به روشنی مشخص نیست و کاربر باید براساس قضاوت شخصی، یکی از گزینه‌های "زیاد، متوسط، کم، هیچکدام و نمی‌دانم" را انتخاب کند. در همین روش، وضعیت Surface reactivity حتی پیچیده‌تر است؛ اینجا علاوه بر اینکه معیار تعیین امتیاز مشخص نیست، خود Surface reactivity تعریف مشخصی هم ندارد و بسیار گنگ است (۵۹).

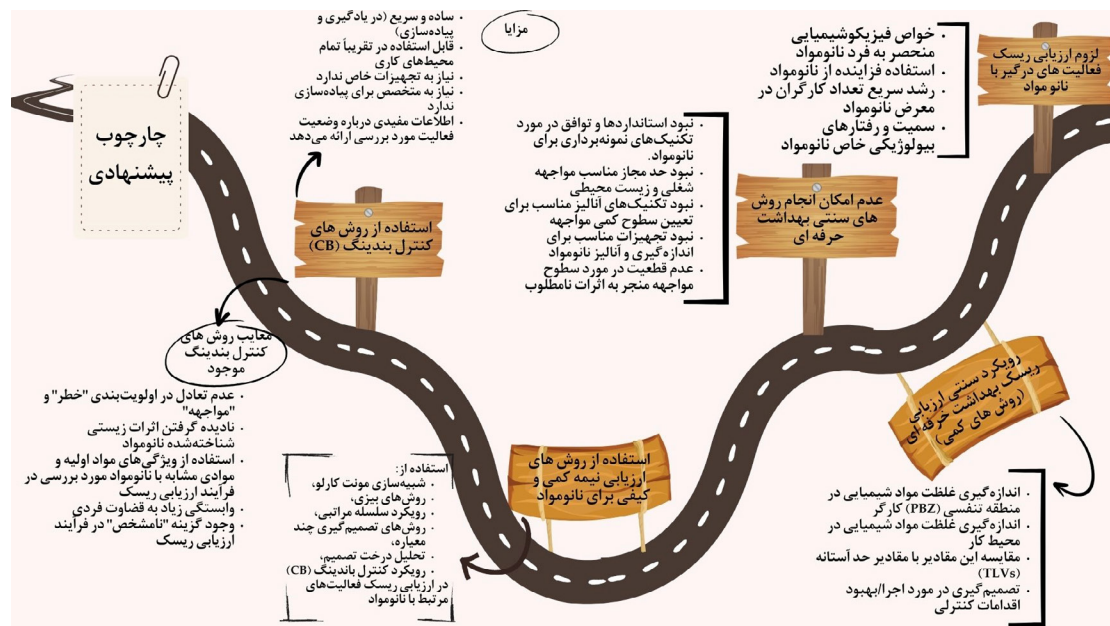
از دیگر مشکلات برخی از این روش‌ها (CB) Nanotool و (IN Nanotool) این است که به علت داشتن گزینه‌ای با عنوان «نامعلوم»، فقدان اطلاعات درباره نانومواد موردبررسی، منجر به امتیازدهی بالا و درنهایت تعیین سطح ریسک بالا می‌شود که ممکن است چندان نزدیک به واقعیت نباشد (۶۰). این گزینه، اگرچه انجام ارزیابی ریسک را آسان‌تر می‌کند، اما مبنای امتیاز آن معلوم نیست و پشتوانه علمی قوی ندارد (۶۱). اگرچه اغلب این روش‌ها شرایط کاری و ویژگی‌های فعالیت

از جمله روش‌های کیفی و نیمه کمی مفید در زمینه ارزیابی ریسک فعالیت‌های درگیر با نانومواد، روش‌های مبتنی بر شیوه Control Banding (CB) هستند (۱۰، ۱۳، ۴۴-۴۶). CB از گروه‌ها یا «باند»های خطرات بهداشتی در ترکیب با سناریوهای مواجهه یا پتانسیل مواجهه، برای تعیین سطوح کنترلی مطلوب استفاده می‌کند (۴۷، ۴۸). «باند خطر» در این روش‌ها بر مبنای ویژگی‌های نانوماده و در برخی روش‌ها براساس ویژگی‌های مواد مادر یا مواد مشابه با نانوماده موردبررسی، تعیین می‌شود (۴۹). "باند مواجهه" نیز براساس شرایط کاری و ویژگی‌های محیط کار و فعالیت درگیرنانومواد تعیین می‌شود. درنهایت، با استفاده از یک ماتریس، سطح کلی ریسک فعالیت موردبررسی تعیین شده و متناسب با سطح ریسک، اقدام (های) کنترلی پیشنهاد می‌شود (۳۳).

با وجود اعتبار خوب و -در مواردی- کارایی خوب این روش‌ها در ارزیابی ریسک فعالیت‌های درگیر با نانومواد، هیچ‌کدام از آن‌ها خالی از ایراد نیستند و محققان بسیاری تاکنون این روش‌ها را مورد نقد قرار داده‌اند. یکی از مشکلات عمده روش‌های فوق، عدم توازن در اهمیت دادن به "خطر" و "مواجهه" است. شبیه‌سازی و آنالیز حساسیت این روش‌ها نشان داده است که در هیچ‌یک از آن‌ها اهمیت فاکتورهای مربوط به خطر (باند خطر) و فاکتورهای مربوط به مواجهه (باند مواجهه) یکسان نیست؛ در برخی روش‌ها اهمیت باند خطر بیشتر است، مانند روش Nanotool و در برخی دیگر، اهمیت باند مواجهه بیشتر است، مانند ISO/TS12901-2 (۴۲). این درحالی است که محققان توصیه می‌کنند که در فرایند ارزیابی ریسک به خطر و مواجهه بهای یکسانی داده شود (۵۰)؛ چراکه اگر ماده‌ای خطرناک (سمی) نباشد، مواجهه شغلی نمی‌تواند ریسک بالایی داشته باشد. از طرف دیگر، اگر مواجهه‌ای صورت نگیرد، هیچ ریسکی متوجه کارکنان نخواهد بود، حتی اگر ماده بسیار خطرناک باشد (۵۱).

این روش‌ها بهای کمی به اثرات بیولوژیک ناشی

1. Band



شکل ۱: روند تحول ارزیابی ریسک فعالیت های درگیر با نانومواد

الزامات مدنظر در چارچوب پیشنهادی

- می بایست کیفی/نیمه کمی باشد؛ چراکه عدم قطعیت های موجود در مبحث نانومواد، با دانش کنونی، اجازه ایجاد رویکردی کاملاً کمی برای ارزیابی ریسک فعالیت های درگیر با نانومواد را نمی دهد. اگر امکان جمع آوری برخی از داده های لازم برای انجام ارزیابی ریسک، با استفاده از تجهیزات ارزان و در دسترس، فراهم باشد، رویکرد نیمه کمی ترجیح داده می شود.

- باید اثرات ثابت شده نانومواد بر سلامت و سمیت آن ها را مورد توجه قرار دهد. سمیت و مکانیسم های آن، همچنین اثرات ناشی از مواجهه با نانومواد، نقش تعیین کننده ای در شناسایی میزان خطر آن ها ایفا می کنند.

- نباید آنقدر پیچیده باشد که برای اجرا نیاز به متخصص داشته باشد؛ چراکه شرکت های تولیدکننده/ مصرف کننده نانومواد، بویژه در کشورهای در حال توسعه، عموماً کوچک یا متوسط^۱ هستند و گردش مالی آن ها به حدی نیست که بتوانند برای انجام ارزیابی ریسک،

موردنظر را درنظر می گیرند، اما ویژگی های محیط کار را درنظر نمی گیرند و یا بسیار کم به آن ها توجه می کنند. درحالی که تحقیقات نشان داده است که ویژگی های محیط کار مانند کنترل های مهندسی، کنترل های مدیریتی و تجهیزات حفاظت فردی مورد استفاده، تاثیر بسیار زیادی بر مواجهه احتمالی با نانومواد دارند (۳۳، ۶۲).

شکل ۱، به خوبی روند تحول ارزیابی ریسک فعالیت های درگیر با نانومواد و لزوم ایجاد چارچوبی جدید برای توسعه روش های جدید و جامع را نشان می دهد.

بحث

با توجه به آنچه گفته شد، نیاز است که چارچوبی جامع تر برای ارزیابی ریسک فعالیت های درگیر با نانومواد پیشنهاد شود. چارچوبی که تا حد امکان بتواند نقایص برشمرده شده را برطرف کند و گامی بلندتر در جهت ایجاد روش های ارزیابی ریسک فعالیت های درگیر با نانومواد بردارد.

1. SMEs 3. (Small and Medium Enterprises)

ریسک نانومواد است. در این مرحله، به‌ویژه تمامی عوامل مؤثر بر سطح ریسک فعالیت‌های مرتبط با نانومواد باید شناسایی شوند. بدین منظور، می‌توان از مجموعه‌ای از روش‌های نظام‌مند مورد استفاده در علوم انتقالی، همچون ایجاد طبقه‌بندی‌ها، مجموعه‌های داده حداقلی (۶۳) و آنتولوژی‌ها بهره برد (۶۴).

در مرحله بعد، این عوامل باید به‌درستی دسته‌بندی شوند و هریک در گروه مربوط به خود قرار گیرد. براساس روش‌های موجود ارزیابی ریسک‌های بهداشتی نانومواد، می‌توان گفت که در فرآیند ارزیابی ریسک فعالیت‌های مرتبط با نانومواد، توجه به ویژگی‌های نانومواد، مواد اولیه، محیط کار و وظایف مرتبط با نانومواد ضروری است (۶۳). اما از آنجا که قرار است روش‌های نظام‌مند و جامع برای تعیین این عوامل استفاده شوند، ممکن است عواملی شناسایی شوند که در هیچ‌یک از گروه‌های ذکر شده قرار نگیرند. بنابراین، امکان افزودن گروه‌های جدید و اصلاح گروه‌های مذکور وجود دارد. مطالعات نشان داده‌اند که در روش‌های ارزیابی ریسک، هرچه تعداد گروه‌های درگیر در تعیین خطر بیشتر باشد، دقت و صحت آن افزایش می‌یابد؛ هرچند ممکن است اجرای آن را دشوارتر سازد (۵۰).

چارچوب پیشنهادی دارای دو محور اصلی است (شکل ۲)

- محور نخست، شدت/خطر

این محور میزان خطر بالقوه‌ای را که در اثر مواجهه با نانومواد ممکن است ایجاد شود، مشخص می‌کند. تعیین/برآورد خطر ناشی از مواجهه با نانومواد عمدتاً براساس ویژگی‌های خود نانوماده، تأثیرات اثبات‌شده و اطلاعات موجود در زمینه سم‌شناسی آن صورت می‌گیرد. برای شناسایی این ویژگی‌ها، براساس روش‌های مبتنی بر کنترل باند (CB)، توصیه می‌شود که به برگه‌های اطلاعات ایمنی مواد (SDSs) و سایر منابع مرتبط مراجعه شود. در غیر این صورت، در صورت نبود سایر منابع اطلاعاتی، قضاوت کارشناسی می‌تواند به کار گرفته شود

متخصص استخدام کنند؛ لذا بحث سهولت استفاده می‌بایست حتماً در نظر گرفته شود. اما باید این نکته را نیز در نظر گرفت که دقت و صحت روش نباید فدای سادگی آن شود، همان‌گونه که در برخی از روش‌های بررسی‌شده مشاهده می‌شود.

- باید تا حد امکان کل چرخه عمر^۱ نانومواد را در نظر بگیرد؛ از سنتز، بسته‌بندی، حمل‌ونقل، استفاده، دفع تا بازیافت پسماندهای حاوی نانومواد. این بدان معناست که تمامی فعالیت‌های مرتبط با نانومواد را، بدون توجه به اینکه در کدام مرحله از چرخه عمر نانومواد قرار دارند، پوشش دهد.

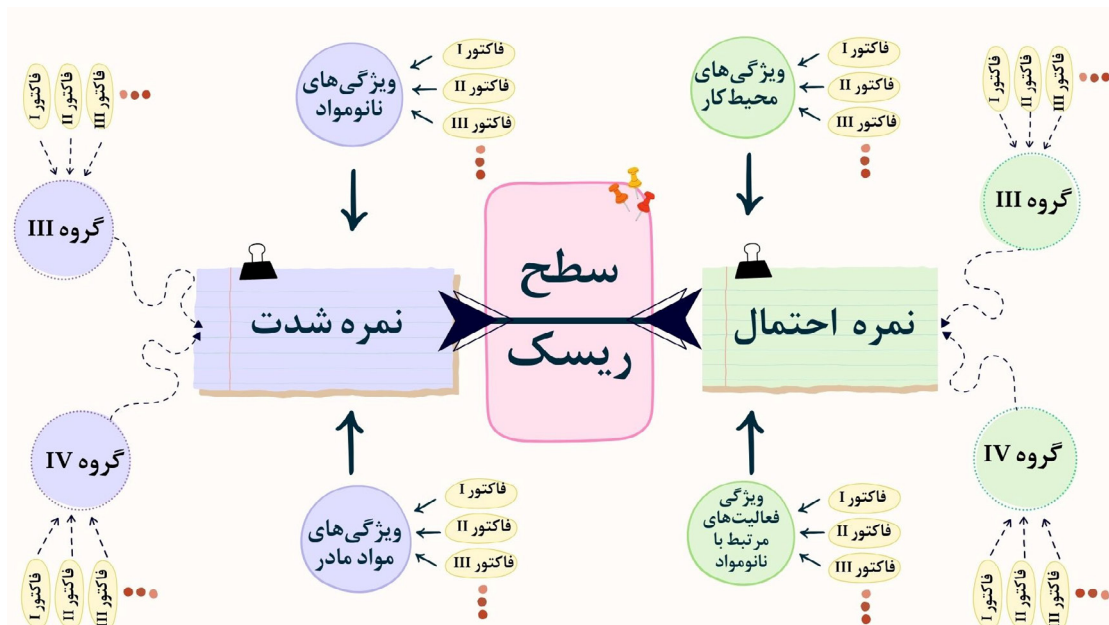
- هم مبتنی بر سناریوهای مواجهه^۲ باشد و هم مبتنی بر خطرات نانومواد. برخی از محققان اعتقاد دارند باید به دنبال روش‌های مبتنی بر مواجهه باشیم؛ چراکه اگر روشی برای تشخیص میزان مواجهه داشته باشیم، وظایف را بر این اساس دسته‌بندی خواهیم کرد و کنترل‌های مناسب به هریک از وظایف اعمال خواهد شد. اما برخی می‌گویند می‌بایست مبتنی بر خطرات نانومواد باشد؛ چراکه در صورت وجود اطلاعات سم‌شناختی خوب، می‌توان OEL تدوین نمود و همه مواجهه‌ها را بر اساس آن اطلاعات و OELها ارزیابی و درنهایت کنترل‌های مناسب را اعمال کرد.

- محیط‌های مرتبط با نانومواد را می‌توان به سه گروه کلی تقسیم کرد: شرکت‌های تولیدکننده و مصرف‌کننده نانومواد، محیط‌های پژوهشی و آزمایشگاهی، و محیط‌های درگیر با نانومواد اتفاقی. روش‌شناسی‌های آینده باید تمامی این فعالیت‌های متنوع را با دقت و صحت قابل قبول ارزیابی کنند.

چارچوب پیشنهادی

با در نظر گرفتن آنچه درباره کاستی‌های روش‌های موجود و انتظارات از روش‌های جدید بیان شد، به نظر می‌رسد که نخستین گام برای دستیابی به هدف، دستیابی کامل و نظام‌مند به تمامی اطلاعات موجود درباره ارزیابی

1. lifecycle
2. exposure



شکل ۲: چارچوب پیشنهادی ارزیابی ریسک فعالیت‌های درگیر با نانومواد

(۵۹). همچنین، استفاده از ابزارهای مناسب برای توصیف نانومواد (روش‌های نیمه کمی) جهت تأیید این ویژگی‌ها توصیه می‌شود. چالش اصلی این محور، تعیین روش (و/یا دستگاه) مناسب برای شناسایی این ویژگی‌ها است. این بخش همچنین به تعامل میان نانومواد و بافت‌های زنده، که به تعامل زیست-نانویی (bio-nano interaction) معروف است، می‌پردازد. برای بررسی این تعاملات، مجموعه‌ای از آزمایش‌ها به کار گرفته می‌شود که شامل آزمایش‌های ارزیابی زیست‌پذیری برای بررسی سلامت سلولی، آزمایش‌های استرس اکسیداتیو به منظور اندازه‌گیری تولید گونه‌های فعال اکسیژن و آزمایش‌های خاص بیماری برای ارزیابی اثرات آسیب‌شناختی بالقوه، در کنار سایر روش‌ها، می‌شود. این روش‌ها بینش‌های ارزشمندی درباره‌ی تأثیرات زیستی نانومواد ارائه می‌دهند و به درک عمیق‌تر ایمنی و عملکرد آن‌ها در کاربردهای زیست‌پزشکی کمک می‌کنند (۶۵).

- محور دوم، احتمال/مواجهه

این محور به توصیف احتمال و نحوه مواجهه با نانومواد در حین فعالیت می‌پردازد. تعیین این محور از طریق توصیف محیط کار و وظیفه مورد بررسی و عوامل دیگر امکان‌پذیر خواهد بود. ویژگی‌های وظیفه (فعالیت) مانند تکرار وظیفه، مدت زمان هر وظیفه، مقدار نانوماده

همچنین، استفاده از ابزارهای مناسب برای توصیف نانومواد (روش‌های نیمه کمی) جهت تأیید این ویژگی‌ها توصیه می‌شود. چالش اصلی این محور، تعیین روش (و/یا دستگاه) مناسب برای شناسایی این ویژگی‌ها است. این بخش همچنین به تعامل میان نانومواد و بافت‌های زنده، که به تعامل زیست-نانویی (bio-nano interaction) معروف است، می‌پردازد. برای بررسی این تعاملات، مجموعه‌ای از آزمایش‌ها به کار گرفته می‌شود که شامل آزمایش‌های ارزیابی زیست‌پذیری برای بررسی سلامت سلولی، آزمایش‌های استرس اکسیداتیو به منظور اندازه‌گیری تولید گونه‌های فعال اکسیژن و آزمایش‌های خاص بیماری برای ارزیابی اثرات آسیب‌شناختی بالقوه، در کنار سایر روش‌ها، می‌شود. این روش‌ها بینش‌های ارزشمندی درباره‌ی تأثیرات زیستی نانومواد ارائه می‌دهند و به درک عمیق‌تر ایمنی و عملکرد آن‌ها در کاربردهای زیست‌پزشکی کمک می‌کنند (۶۵).
نشانه‌های زیستی (بیومارکرها) در موارد زیر مورد استفاده قرار می‌گیرند: (۱) ارزیابی میزان مواجهه فردی یا گروهی؛ (۲) شناسایی پارامترهای زیستی که در

همان اندازه، درک روابط متقابل میان این پارامترها و سازماندهی آنها در یک چارچوب ساختاری نیز حائز اهمیت است. توسعه چنین چارچوبی گامی اساسی به سوی دستیابی به روش‌شناسی‌های کامل‌تر برای ارزیابی ریسک‌های مرتبط با نانومواد به شمار می‌رود. این رویکرد نه تنها دقت ارزیابی ریسک را افزایش می‌دهد، بلکه از توسعه شیوه‌های استاندارد برای مدیریت خطرات بالقوه ناشی از فعالیت‌های مرتبط با نانومواد نیز حمایت می‌کند. یکی از محدودیت‌های عمده در توسعه چنین روش‌هایی، چالش دسترسی به تمامی عوامل دخیل در ارزیابی خطرات و درک روابط پیچیده میان آنها است. با این حال، این مانع می‌تواند با به کارگیری رویکردهایی همچون توسعه آنتولوژی‌ها و ایجاد مجموعه داده‌های حداقلی که چارچوب‌های ساختاری و اطلاعات پایه‌ای ضروری برای تحلیل‌های جامع‌تر را فراهم می‌کنند، به طور قابل توجهی کاهش یابد.

== کد اخلاق

این تحقیق با کد اخلاق IR.TUMS.SPH. REC.1403.228 بوسیله دانشگاه علوم پزشکی تهران مورد تایید قرار گرفته است. حمایت مالی: این پایان نامه با شماره طرح ۷۶۱۱۲ مورد حمایت دانشگاه علوم پزشکی تهران است.

== REFERENCES

1. Iavicoli I, Leso V, Manno M, Schulte PA. Biomarkers of nanomaterial exposure and effect: current status. *J Nanopart Res.* 2014;16(3):2302.
2. Wu WT, Liao HY, Chung YT, Li WF, Tsou TC, Li LA, et al. Effect of nanoparticles exposure on fractional exhaled nitric oxide (FENO) in workers exposed to nanomaterials. *Int J Mol Sci.* 2014;15(1):878–94.
3. Asbach C. Exposure measurement at workplaces. In: Dolez PI, editor. *Nanoengineering*. Amsterdam: Elsevier; 2015. p. 523–55.
4. Beigzadeh Z, Kolahdouzi M, Kalantary S, Golbabaie F. A systematic review of released nanoparticles from commercial nano-textiles during use and washing. *J Ind*

استفاده‌شده و مسائل مشابه بررسی خواهند شد. ویژگی‌ها و خصوصیات محیط کار (از نظر کنترل‌های موجود، برنامه‌های مدیریتی، تجهیزات حفاظت فردی موجود و استفاده‌شده و غیره) نیز مورد بررسی قرار خواهند گرفت. این موضوع به بررسی ویژگی‌های محیط کار مربوط می‌شود، به‌ویژه ارزیابی کنترل‌های موجود که در محل کار اعمال شده‌اند؛ مواردی مانند انواع تهویه‌های عمومی و موضعی، جعبه‌های دستکش دار، کمدهای ایمنی، تجهیزات حفاظت فردی و اقلام مشابه در این مرحله مورد بررسی قرار می‌گیرند (۳۳).

با شناسایی عوامل و گروه‌های مؤثر در هر یک از محورهای مورد نظر، خروجی حاصل از ترکیب شدت/خطر و احتمال/مواجهه، سطح ریسک فعالیت را تعیین خواهد کرد.

در شکل ۲، چارچوب پیشنهادی و گروه‌های اصلی و فرعی و نیز فاکتورهای محتمل هرگروه به خوبی نشان داده شده‌اند.

== نتیجه گیری

با توجه به روش‌های کمی و کیفی موجود برای ارزیابی ریسک مرتبط با فعالیت‌های شغلی دارای نانومواد، یک رویکرد جامع برای ارزیابی ریسک نیازمند شناسایی تمامی پارامترها و مفاهیم مرتبط است. به

Text. 2024;54:15280837241254512.

5. Omari Shekaftik S, Ashtarinezhad A, Yarahmadi R, Rasouli M, Soleimani M, Hosseini Shirazi F. Relationship between chemical composition and physical state of used nanomaterials in nanotechnology companies with type and prevalence of symptoms of employees of these companies in Tehran, Iran. *IOH.* 2020;17(2):1–12.
6. Omari Shekaftik S, Sedghi Noushabadi Z, Ashtarinezhad A. NanoSafety: a knowledge, attitude and practice study among Iranian researchers working in nanotechnology laboratories. *Int J Occup Saf Ergon.* 2021:1–11.
7. McShane HVA, Sunahara GI. Environmental perspectives. In: Dolez PI, editor. *Nanoengineering*. Amsterdam: Elsevier; 2015. p. 257–83.

8. Naziri SH, Pouyakian M, Sadegh Hassani S, Farhang Dehghan S. Risk management of engineered nanomaterials at workplaces: a narrative review on available frameworks and tools. *J Health Saf Work*. 2024;14(1):174–98.
9. Omari Shekaftik S, Biganeh J, Hosseinzadeh M, Jafari Nodoushan H, Mehrparvar N. Health risk assessment of chemicals: from bulk to nano. *J Health Saf Work*. 2024;14(4):889–915.
10. Paik SY, Zalk DM, Swuste P. Application of a pilot control banding tool for risk level assessment and control of nanoparticle exposures. *Ann Occup Hyg*. 2008;52(6):419–28.
11. Zalk DM, Paik SY. Risk assessment using control banding. In: Ramachandran G, editor. *Assessing Nanoparticle Risks to Human Health*. 2nd ed. Oxford: William Andrew Publishing; 2016. p. 121–52.
12. Albuquerque PC, Gomes JF, Pereira C, Miranda RM. Assessment and control of nanoparticles exposure in welding operations by use of a control banding tool. *J Clean Prod*. 2015;89:296–300.
13. Maynard AD. Nanotechnology: the next big thing, or much ado about nothing? *Ann Occup Hyg*. 2006;51(1):1–12.
14. Andrews R, O'Connor PF. NIOSH manual of analytical methods (NMAM). Cincinnati (OH): National Institute for Occupational Safety and Health; 2020.
15. Pouran HM. Engineered nanomaterials in the environment, their potential fate and behaviour and emerging techniques to measure them. In: *Handbook of Environmental Materials Management*. Cham: Springer; 2018. p. 1–15.
16. John AC, Küpper M, Manders-Groot AM, Debray B, Lacomme JM, Kuhlbusch TA. Emissions and possible environmental implication of engineered nanomaterials in the atmosphere. *Atmosphere*. 2017;8(5):84.
17. Schulte P, Murashov V, Zumwalde R, Kuempel E, Geraci C. Occupational exposure limits for nanomaterials: state of the art. *J Nanopart Res*. 2010;12:1971–87.
18. Mihalache R, Verbeek J, Graczyk H, Murashov V, van Broekhuizen P. Occupational exposure limits for manufactured nanomaterials, a systematic review. *Nanotoxicology*. 2017;11(1):7–19.
19. Stefaniak AB. Principal metrics and instrumentation for characterization of engineered nanomaterials. In: *Metrology and Standardization of Nanotechnology: Protocols and Industrial Innovations*. Cham: Springer; 2017. p. 151–74.
20. Kreider ML, Cyrs WD, Tosiano MA, Panko JM. Evaluation of quantitative exposure assessment method for nanomaterials in mixed dust environments: application in tire manufacturing facilities. *Ann Occup Hyg*. 2015;59(9):1122–34.
21. Sheehan MJ, Vosburgh DJH, O'Shaughnessy PT, Park JH, Sotelo C. Direct-reading instruments for aerosols: a review for occupational health and safety professionals part 2: applications. *J Occup Environ Hyg*. 2022;19(12):706–29.
22. Abbott LC, Maynard AD. Exposure assessment approaches for engineered nanomaterials. *Risk Anal*. 2010;30(11):1634–44.
23. Park JY, Ramachandran G, Raynor PC, Olson Jr GM. Determination of particle concentration rankings by spatial mapping of particle surface area, number, and mass concentrations in a restaurant and a die casting plant. *J Occup Environ Hyg*. 2010;7(8):466–76.
24. Zou H, Zhang Q, Xing M, Gao X, Zhou L, Tollerud DJ, et al. Relationships between number, surface area, and mass concentrations of different nanoparticles in workplaces. *Environ Sci Process Impacts*. 2015;17(8):1470–81.
25. Bau S, Witschger O, Gensdarmes F, Thomas D. Determining the count median diameter of nanoaerosols by simultaneously measuring their number and lung-deposited surface area concentrations. *J Nanopart Res*. 2013;15:1–8.
26. Woo KS, Chen DR, Pui DYH, Wilson WE. Use of continuous measurements of integral aerosol parameters to estimate particle surface area. *Aerosol Sci Technol*. 2001;34(1):57–65.
27. Maynard AD. Estimating aerosol surface area from number and mass concentration measurements. *Ann Occup Hyg*. 2003;47(2):123–44.
28. Baltensperger U, Gaggeler H, Jost D, Emmenegger M, Nägeli W. Continuous background aerosol monitoring with the epiphaniometer. *Atmos Environ A*. 1991;25(3–4):629–34.
29. Pandis SN, Baltensperger U, Wolfenbarger JK, Seinfeld JH. Inversion of aerosol data from the epiphaniometer. *J Aerosol Sci*. 1991;22(4):417–28.
30. Asbach C, Fissan H, Stahlmecke B, Kuhlbusch TAJ, Pui

- DYH. Conceptual limitations and extensions of lung-deposited nanoparticle surface area monitor (NSAM). *J Nanopart Res.* 2009;11:101–9.
31. Poland CA, Donaldson K. Respiratory system, part one: basic mechanisms. In: Fadeel B, Pietroiusti A, Shvedova AA, editors. *Adverse Effects of Engineered Nanomaterials*. 2nd ed. London: Academic Press; 2017. p. 225–42.
32. Lee BP, Li Y-J, Flagan RC, Lo C, Chan CK. Sizing characterization of the fast-mobility particle sizer (FMPS) against SMPS and HR-ToF-AMS. *Aerosol Sci Technol.* 2013;47(9):1030–7.
33. Omari Shekaftik S, Nasirzadeh N. Exposure control measures proposed by different organizations: the curious case of nanomaterial-involved activities. *Int J Occup Saf Ergon.* 2024;30(2):460–70.
34. Omari Shekaftik S, Golbabaie F, SheikhMozafari MJ. An analysis of “hierarchy of controls” in workplaces and laboratories involving nanomaterials. *J Nanopart Res.* 2023;25(12):245.
35. Vogel U, Savolainen K, Wu Q, van Tongeren M, Brouwer D, Berges M, editors. *Handbook of nanosafety: measurement, exposure and toxicology*. Amsterdam: Elsevier; 2013.
36. Díaz-Soler BM, López-Alonso M, Martínez-Aires MD. Nanosafety practices: results from a national survey at research facilities. *J Nanopart Res.* 2017;19(5):169.
37. European Commission, Directorate-General for Employment, Social Affairs & Inclusion. *Working safely with manufactured nanomaterials: guidance for workers*. Luxembourg: Publications Office of the European Union; 2013.
38. Occupational Safety and Health Administration. *Working safely with nanomaterials*. Washington (DC): OSHA; 2013.
39. National Institutes of Health. *Nanotechnology safety and health program*. Bethesda (MD): NIH; 2014.
40. Safe Work Australia. *Working safely with nanotechnology (OHS_HS239)*. Canberra: Safe Work Australia; 2015.
41. Dizaji RA. *Risk assessment of chemical materials in nano-scale using control banding method in chemistry laboratories*. Tehran: Tehran University of Medical Sciences, Faculty of Health; 2012.
42. Omari Shekaftik S, Nasirzadeh N, Mohammadiyan M, Mohammadpour S. An analysis on control banding-based methods used for occupational risk assessment of nanomaterials. *Nanotoxicology.* 2023;17(10):628–50.
43. Omari Shekaftik S, Moghadasi N, Nasirzadeh N. National (Iranian) and global use of control banding-based methods for assessing the risks of activities involved with nanomaterials: a comparative review. *J Nanopart Res.* 2023;25(7):145.
44. Zalk DM, Paik SY, Swuste P. Evaluating the control banding nanotool: a qualitative risk assessment method for controlling nanoparticle exposures. *J Nanopart Res.* 2009;11(7):1685.
45. Ostiguy C, Riediker M, Triolet J, Troisfontaines P, Vernez D. *Development of a specific control banding tool for nanomaterials*. Paris: French Agency for Food, Environmental and Occupational Health & Safety (ANSES); 2010.
46. Duuren-Stuurman B, Vink S, Brouwer D, Kroese D, Heussen H, Verbist K, et al. *Stoffenmanager Nano: description of the conceptual control banding model*. The Netherlands: TNO; 2011. Report No.: V9216.
47. Zalk D. *Control banding: a simplified, qualitative strategy for the assessment of occupational risks and selection of solutions*. USA: DM Zalk; 2010.
48. Schulte PA, Geraci CL, Zumwalde RD, Hoover MD, Kuempel ED. Occupational risk management of engineered nanoparticles. *J Occup Environ Hyg.* 2008;5(4):239–49.
49. Omari Shekaftik S, Mehrparvar N, Peivandi Z, Shahtaheri SJ. Risk assessment of occupational exposure to engineered and incidental nanomaterials: differences and challenges. *J Nanopart Res.* 2024;26(4):67.
50. Jayjock MA, Lynch J, Nelson DI. *Risk assessment principles for the industrial hygienist*. Fairfax (VA): AIHA Press; 2000.
51. Association AIH, Group CBW. *Guidance for conducting control banding analyses*: AIHA; 2007.
52. Omari Shekaftik S, F HS, Yarahmadi R, Rasouli M, Ashtarinezhad A. Investigating the relationship between occupational exposure to nanomaterials and symptoms of nanotechnology companies' employees. *Arch Environ Occup Health.* 2022;77(3):209–18.
53. Omari Shekaftik S, Nasirzadeh N. 8-Hydroxy-2'-deoxyguanosine (8-OHdG) as a biomarker of oxidative DNA damage induced by occupational exposure to nanomaterials: a systematic review. *Nanotoxicology.*

- 2021;15(6):850-64.
54. Ghafari J, Moghadasi N, Shekaftik SO. Oxidative stress induced by occupational exposure to nanomaterials: a systematic review. *Ind Health*. 2020;58(6):492-502.
55. Dimou K, Emond C, editors. *Nanomaterials, and Occupational Health and Safety—A Literature Review About Control Banding and a Semi-Quantitative Method Proposed for Hazard Assessment*. Journal of Physics: Conference Series; 2017: IOP Publishing.
56. Omari Shekaftik S, Hosseini Shirazi F, Yarahmadi R, Rasouli M, Soleimani Dodaran M, Ashtarinezhad A. Preliminary Investigation of the Symptoms of Nanotechnology Companies Employees in Tehran, Iran, 2018. *Journal of Occupational Hygiene Engineering*. 2019;6(2):61-70.
57. Nasirzadeh N, Omari Shekaftik S. Occupational Exposure to Nanomaterials: Hazards, Toxicity and Safety Concerns. In: Faheem M, Ditta A, Du J, editors. *Nanomaterials in Industrial Chemistry*. 1 ed. Boca Raton: CRC Press; 2024. p. 179-216.
58. Bergamaschi E, Poland C, Canu IG, Prina-Mello A. The role of biological monitoring in nano-safety. *Nano Today*. 2015;10(3):274-7.
59. Zalk DM, Paik SY. Risk assessment using control banding. *Assessing nanoparticle risks to human health*: Elsevier; 2016. p. 121-52.
60. Brouwer DH. Control banding approaches for nanomaterials. *Annals of occupational hygiene*. 2012;56(5):506-14.
61. Sousa M, Arezes P, Silva F. Occupational Exposure to Incidental Nanomaterials in Metal Additive Manufacturing: An Innovative Approach for Risk Management. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2023;20(3):2519.
62. Omari Shekaftik S, Yarahmadi R, Moghadasi N, Sedghi Noushabadi Z, Hosseini AF, Ashtarinezhad A. Investigation of recommended good practices to reduce exposure to nanomaterials in nanotechnology laboratories in Tehran, Iran. *Journal of Nanoparticle Research*. 2020;22(3):59.
63. Omari Shekaftik S, Jadid H, Dehdashti MJ, Mohammadian Y, Ebrahimi W. Toward a minimum data set for assessing the risks of activities involved with nanomaterials. *Journal of Nanoparticle Research*. 2023;25(2):25.
64. Schulte PA, Guerin RJ, Cunningham TR, Hodson L, Murashov V, Rabin BA. Applying translational science approaches to protect workers exposed to nanomaterials. *Frontiers in public health*. 2022;10:816578.
65. Bahring F, Schlenk F, Wotschadlo J, Buske N, Liebert T, Bergemann C, et al. Suitability of viability assays for testing biological effects of coated superparamagnetic nanoparticles. *IEEE transactions on magnetics*. 2012;49(1):383-8.
66. Manno M, Viau C, Cocker J, Colosio C, Lowry L, Mutti A, et al. Biomonitoring for occupational health risk assessment (BOHRA). *Toxicology letters*. 2010;192(1):3-16.
67. Smolders R, Bartonova A, Boogaard P, Dusinska M, Koppen G, Merlo F, et al. The use of biomarkers for risk assessment: Reporting from the INTARESE/ENVIRISK Workshop in Prague. *International journal of hygiene and environmental health*. 2010;213(5):395-400.