

REVIEW RESEARCH PAPER

## Assessment of the Efficiency of Respiratory and Skin Protection Equipment Toward Controlling Nanoparticles in the Workplace with a Scoping Review Approach

Mahdi Mohammadiyan<sup>1</sup>, Nafiseh Nasirzadeh<sup>1</sup>, Akbar Ahmadi Asour<sup>1,2</sup>, Sepideh Keyvani<sup>1</sup>, Fatemeh Fasih-Ramandi<sup>1</sup>, Farideh Golbabaie<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Occupational Health Engineering, School of Health, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran

<sup>2</sup>Department of Occupational Health Engineering, School of Health, Sabzevar University of Medical Sciences, Razavi Khorasan, Iran

Received: 21 - 7 - 2023

Accepted: 20 - 4 - 2024

### ABSTRACT

**Introduction:** In recent years, exposure to nanomaterials has been known as a challenge among occupational health experts. In this line, personal protective equipment has been considered as a solution to reduce the worker's exposure. Since respiratory and skin tracts represent the most common workplace exposure routes, knowledge of the efficiency of respiratory and skin protection equipment is particularly important. So, the aim of this study is the assessment of the efficiency of respiratory and skin protection equipment toward controlling nanoparticles in the workplace with a scoping review approach.

**Material and Methods:** This study was conducted in 2022 with a scoping review approach. Arksey and O'Malley's five-step framework was chosen as the research method. The search strategy was followed in the databases necessary to access the research data, including PubMed, Google Scholar, Science Direct, Web of Science, and Scopus. Also, EndNote X9® and Microsoft Excel software were used to collect and analyze studies, respectively.

**Results:** In the first step, 1014 articles were identified. Finally, 38 articles were included in the study to examine quantitative and qualitative information about the efficiency of respiratory and skin protective equipment. Twenty-five articles were related to breathing masks, and six studies were about protective gloves, and seven other articles were devoted to protective clothing. According to the studies of breathing masks, the mean total penetration of nanoparticles was estimated at 2.27%. Also, based on the studies of protective clothing, the maximum penetration of nanoparticles was 30nm for protective clothing made of polypropylene and polyethylene with different layers.

**Conclusion:** Although the efficiency of existing personal protective equipment showed a good result for controlling nanoparticles, the size of nanoparticles is one of the essential parameters in determining the efficiency of the equipment, which should be considered the workplaces. So, it is recommended that more studies be considered to improve their efficiency, and standard tests should be developed to evaluate them.

**Keywords:** Breathing masks, Control of nanoparticles, Personal protective equipment, Protective gloves, work clothes

### HOW TO CITE THIS ARTICLE

Mohammadiyan M, Nasirzadeh N, Ahmadi Asour A, Keyvani Fasih-Ramandi F, Golbabaie F. Assessment of the efficiency of respiratory and skin protection equipment toward controlling nanoparticles in the workplace with a scoping review approach. *J Health Saf Work.* 2024; 14(2): 426-24.

\* Corresponding Author Email: [fgolbabaie@tums.ac.ir](mailto:fgolbabaie@tums.ac.ir)

Copyright © 2024 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

Due to the different physicochemical properties of nanomaterials and their potentially harmful effects in the workplace, it is necessary to reduce exposure to the lowest possible level using control strategies. Although personal protective equipment (PPE) is the last control measure to ensure the safety and occupational health of employees exposed to harmful factors at work, due to the different nature of nanoparticles, their use has been emphasized in most studies. Since respiratory and skin tracts represent the most common workplace exposure routes, knowledge of respiratory and skin protection equipment efficiency is particularly critical. In the studies, the efficiency of PPE for nanoparticles, their types, and the quantitative variables used have significant variations. Therefore, this study aims to assess the efficiency of respiratory and skin protection equipment in controlling nanoparticles in the workplace. It uses a scoping review approach.

## 2. MATERIAL AND METHODS

This study was conducted in 2022 with a scoping review approach. This adopts a clear and accurate process based on the five-step framework of Arksey and O'Malley. It provides the possibility of repeating the search strategy and increasing the reliability of the study findings. The proposed five steps of domain review include a) research questions, b) identification of related studies, c) selection of related studies, d) data collection, and e) summarizing and preparing reports. The search strategy was followed in the databases necessary to access the research data: PubMed, Google Scholar, Science Direct, Web of Science, and Scopus. The screening was managed by two researchers independently. Disagreements were resolved via discussion or a third researcher. Also, a list of articles was provided by EndNote X9® (Thomson Reuters, Toronto, Canada) software, and data analysis was provided by Microsoft Excel software.

The flowchart for identifying and selecting articles is presented in Figure 1.

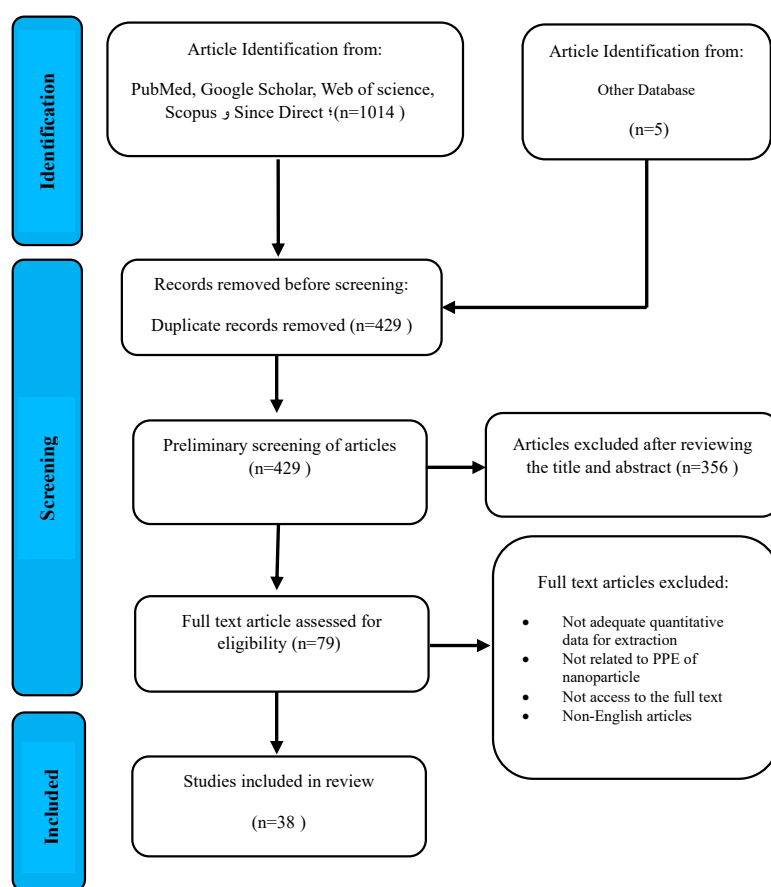


Fig. 1: The process of selecting and screening articles

### 3. RESULTS AND DISCUSSION

In the first step, 1014 articles were identified. Finally, 38 articles were included in the study to examine quantitative and qualitative information about respiratory and skin protective equipment efficiency. Twenty-five articles were related to breathing masks, six studies were about protective gloves, and seven others were devoted to safety clothing. In all studies based on respiratory protective equipment, the diameter size of nanoparticles (< 100 nm) and mean penetration were reported as a function of particle number concentration using particle counting measurement techniques. Nanoparticle penetration was estimated at 2.27%. Fourteen studies on breathing masks were tested with mannequins to simulate natural workplace conditions. According to the National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) protocol, nine studies used filter boxes to install respirators. Two other studies were conducted as field simulations on people. Investigations about evaluating skin protection equipment against nanoparticles were mainly experimental studies using test chambers to simulate the conditions of the actual use of the equipment. In the studies of skin protection equipment, six studies evaluated gloves. Also, seven articles discuss the protection of people wearing protective clothing from nanoparticles. In this study, nanoparticle penetration was 30nm for protective clothing made of polypropylene and polyethylene with different layers. These experimental studies investigated a wide range of laboratory methods (such as laboratory studies based on diffusion and filtration), test conditions (such as aerosolized solids, humidity, and physical stress), and types of nanoparticles. A study was conducted on particles ranging from 10 to 100 nm, with 30 and 85 L/min airflow rates. 50 nm MPPS was observed in the tested masks. The findings also showed that N95 masks can exceed 5% MPPS in 85 L/min airflow. However, N95 masks

are expected to have a filtration efficiency of 95% against nanoparticles. Other parameters affecting the penetration of nanoparticles through filters and breathing masks are related to the characteristics of the nanoparticles, including charge, shape, type, and size distribution. The filtration efficiency of fiberglass filters for NaCl nanoparticles with a size range of 2-100 nm decreased when they became charged particles. In the investigations of N95 masks to control TiO<sub>2</sub>, NaCl, and nanotube nanoparticles, the penetration rate at a flow rate of 130 L/min was more than 5%. The tests conducted on protective clothing included various types of acidic nanoparticles, potassium chloride, NaCl, graphite, titanium dioxide (TiO<sub>2</sub>), iron oxide, silver, and platinum as dry aerosol and colloidal solutions. In the case of dry aerosols with oleic acid and potassium chloride particles with a diameter between 15 nm and 3 μm at different flow rates, the rate of the flow pattern passing through the media was similar to the samples obtained from protective clothing of various materials exposed to NaCl aerosols with a flow rate of 10 and 32 L/min. In this case, the MPPS values varied between 100 and 500 nm.

### 4. CONCLUSIONS

One of the main challenges in occupational settings is to investigate the effect of the mentioned parameters on the efficiency of PPE in workplaces. Reviewed studies showed that although existing PPE is suitable for controlling nanoparticles, the size of nanoparticles is one of the essential parameters in determining equipment efficiency. Therefore, standard test methods should be developed to measure PPE efficiency in nanoparticle exposure. For this reason, it is necessary to have a suitable guide for choosing them. Therefore, future research should focus on formulating guidelines and developing novel manufacturing processes for PPE against nanoparticles.

## بررسی کارایی تجهیزات حفاظت تنفسی و پوستی به منظور کنترل نانو ذرات موجود در محیط های کاری با رویکرد مرور دامنه ای

مهدی محمدیان<sup>۱</sup>، نفیسه نصیرزاده<sup>۱</sup>، اکبر احمدی آسور<sup>۲</sup>، سپیده کیوانی<sup>۱</sup>، فاطمه فصیح رامندی<sup>۱</sup>، فریده گلبابایی<sup>۱\*</sup>

<sup>۱</sup> گروه مهندسی بهداشت حرفه ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران  
<sup>۲</sup> گروه مهندسی بهداشت حرفه ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی سبزوار، خراسان رضوی، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۴/۳۰، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۲/۱

### مکیده

**مقدمه:** در سال های اخیر مواجهه با نانو ذرات در محیط های شغلی به عنوان یک چالش شناخته شده، برای متخصصان بهداشت حرفه ای بوده است. در این زمینه استفاده از تجهیزات حفاظت فردی به عنوان راهکاری برای کاهش مواجهه شاغلان دانسته شده است. با توجه به اینکه مسیر استنشاقی و پوستی اصلی ترین مسیر مواجهه در محیط های کاری هستند، آگاهی از کارایی تجهیزات حفاظت تنفسی و پوستی اهمیت ویژه دارد. لذا این مطالعه با یک رویکرد دامنه ای به بررسی کارایی تجهیزات حفاظت تنفسی و پوستی به منظور کنترل نانو ذرات موجود در محیط های کاری پرداخته است.

**روش کار:** این مطالعه در سال ۲۰۲۲ با رویکرد مرور دامنه ای یا محدود انجام شد. چارچوب پنج مرحله ای Arksey و O'Malley به عنوان روش پژوهشی انتخاب گردید. به منظور دسترسی به داده ها، جست و جو در پایگاه های اطلاعات علمی PubMed, Google Scholar, Science direct, Web of Science, Scopus انجام گرفت. همچنین به منظور جمع آوری مطالعات از نرم افزار EndNote و برای تحلیل یافته ها از نرم افزار Microsoft Excel استفاده شد.

**یافته ها:** در جست و جوی اولیه ۱۰۱۴ مقاله شناسایی گردید، در نهایت ۳۸ مقاله برای بررسی کارایی تجهیزات حفاظت فردی وارد مطالعه شدند. ۲۵ مقاله در زمینه ماسک های تنفسی، ۶ مقاله در رابطه با دستکش های حفاظتی و ۷ مقاله دیگر لباس های حفاظتی را به خود اختصاص دادند. کارایی تجهیزات حفاظت تنفسی با شاخص های مختلفی در مطالعات سنجیده شده است که مهمترین آنها شاخص نافذترین اندازه ذره یا s می باشد. برای تجهیزات حفاظت پوستی نیز استانداردی جهت سنجش کارایی وجود نداشته و فقط در برخی از مطالعات بر پایه قابلیت نفوذ هوا در منسوج و یا از طریق سیستم شبیه سازی بسته پیشنهاد شده است.

**نتیجه گیری:** گرچه کارایی تجهیزات حفاظت فردی موجود، نتایج خوبی را برای کنترل نانوذرات نشان می دهد، با این حال سبب ذره یکی از پارامترهای مهم در تعیین کارایی بوده که بایستی با توجه به شرایط محیط کار مورد توجه قرار گیرد. از این رو پیشنهاد می شود مطالعات بیشتری برای بهبود کارایی آنها به کار گرفته شود، همچنین تست های استاندارد برای ارزیابی کارایی آنها توسعه داده شود.

**کلمات کلیدی:** تجهیزات حفاظت فردی، دستکش حفاظتی، کنترل نانوذرات، لباس کار، ماسک های تنفسی

## مقدمه

با پیشرفت فناوری نانو، میزان تولید محصولات نانویی در بازار جهانی به سرعت در حال افزایش است. در این میان نانومواد تولیدی، دومین سهم تولید محصولات نانویی را به خود اختصاص دادند (۱). این پیشرفت‌ها سبب گردید، تا در محیط‌های کاری، بخصوص صنایع تولید محصولات نانویی و محیط‌های پژوهشی، افراد بیشتری در معرض مواجهه با این مواد قرار گیرند (۲). تفاوت در ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی این مواد نسبت به مواد مشابه با سایز بزرگتر، منجر به گسترش استفاده از آن‌ها در صنایع مختلف از جمله الکترونیک، اپتیک، کالاهای مصرفی، تولید و ذخیره انرژی، حفظ خاک و آب و همچنین پزشکی گردید (۳).

مطالعات نشان می‌دهند که تغییر در ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نانو مواد، میزان نفوذ آن‌ها به بدن را افزایش داده و منجر به بروز سمیت در موجودات زنده از جمله انسان می‌گردد (۴، ۵). همچنین مطالعات، آلودگی‌ها و اثرات زیستی محیطی ناشی از مواجهه با آن‌ها را نیز تایید کرده اند (۶). برخی از مطالعات به بررسی اثرات نانومواد پرداخته و نشان دادند که موادی نظیر نانو مواد بر پایه کربن می‌توانند منجر به مرگ سلولی در سلول‌های رده اپیتلیال ریه انسان شوند (۷، ۸). این سمیت به شکل بروز آسیب‌های استرس اکسیداتیو، تغییر در سیتوکین‌های التهابی، آسیب کروموزومی و شکست DNA گزارش شده است (۹). برخی مطالعات نشان می‌دهند که نانو ذرات می‌توانند از طریق مواجهه شغلی پوستی به بدن انسان وارد شده و از سد خونی مغزی عبور کنند (۱۰).

باتوجه به موارد ذکر شده، استفاده از نانو مواد در محیط‌های شغلی یک مسئله نگران‌کننده برای متخصصان بهداشت حرفه‌ای دانسته می‌شود. از این رو متخصصان در تلاش‌اند تا با استفاده از روش‌ها و استراتژی‌های کنترلی، مواجهه با نانومواد به پایین‌ترین حد ممکن تقلیل یابد (۱۱). بکارگیری کنترل‌های مهندسی، اداری،

مدیریتی و استفاده از تجهیزات حفاظت فردی (PPE)، به عنوان راهکاری برای کنترل مواجهه با این مواد می‌باشند. گرچه استفاده از تجهیزات حفاظت فردی به عنوان آخرین راهکار برای کنترل مواجهه با عوامل زیان‌آور دانسته می‌شود؛ با این حال با توجه به متفاوت بودن ماهیت نانومواد، در عمده مطالعات به استفاده از تجهیزات حفاظت فردی تاکید ویژه شده است (۱۲). با توجه به اینکه مسیر استنشاقی و پوستی اصلی‌ترین مسیر مواجهه در محیط‌های کاری هستند، بکارگیری تجهیزات حفاظت تنفسی و پوستی از اهمیت ویژه برخوردار است (۱۳).

سازمان‌های مختلفی استانداردهای ویژه را برای تجهیزات حفاظت تنفسی جهت کنترل نانوذرات پیشنهاد داده‌اند. از این میان می‌توان به رسپیراتورهای تنفسی پیشنهاد شده توسط موسسه ملی ایمنی و بهداشت شغلی (NIOSH<sup>۲</sup>) برای محافظت در برابر ذرات بی‌اثر و بیولوژیکی هوابرد اشاره کرد (۱۴). این رسپیراتورها شامل سری‌های N95، R99 و P100 می‌باشند؛ که به ترتیب راندمان فیلتراسیون ۹۵، ۹۹ و ۹۹/۹۷ درصد را در بدام اندازی نانوذرات با سایز حداقل ۳۰۰ نانومتر دارند (۱۵).

در ارزیابی کارایی فیلترهای تجاری در ماسک‌های تنفسی شاخص MPPS<sup>۳</sup> مورد استفاده قرار می‌گیرد. شاخص MPPS نافذترین اندازه ذره‌ای را بیان می‌کند که قابلیت نفوذ در تجهیزات حفاظت تنفسی را دارد. برای ارزیابی MPPS، میزان نفوذ به عنوان تابعی از اندازه ذرات و به صورت درصد نفوذ (PP<sup>۴</sup>) تعیین می‌شود. نفوذ ذرات از طریق فیلتر و میزان حفاظت تأمین شده، با نشتی رسپیراتور در ناحیه صورت فرد مرتبط است (۱۶). با این حال در مطالعات مختلف از فاکتورهای متفاوتی جهت بررسی کارایی فیلترها استفاده می‌گردد؛ مانند فاکتور حفاظت تأمین شده (APF)<sup>۵</sup> که برای انتخاب رسپیراتور مناسب در شرایط آب و هوایی مشخص می‌باشد. همچنین فاکتور حفاظت محیط کار (WPF)<sup>۶</sup>،

1. Personal Protection Equipment (PPE)
2. The National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH)
3. Most Penetrating Particle Size (MPPS)
4. Particle Permissible (PP)
5. Assigned Protection Factor (APF)
6. Workplace protection factor (WPF)

### روش کار

این مطالعه در سال ۲۰۲۲ با رویکرد مرور دامنه‌ای یا محدود (scoping review) انجام شد. چارچوب پنج مرحله‌ای Arksey و O'Malley، به عنوان روش پژوهشی انتخاب گردید. مطابق با این روش مراحل پنج‌گانه پیشنهادی شامل موارد زیر است (۲۴)؛

#### الف) یافتن سؤالات تحقیق

مطابق با هدف مطالعه، مرور دامنه‌ای حاضر توسط سؤالات زیر هدایت شد:

۱. چه فاکتورهای مهمی در کارایی تجهیزات حفاظت تنفسی و پوستی در برابر کنترل نانوذرات موثرند؟
۲. کارایی ماسک‌های تنفسی با در نظر گرفتن فاکتورهای تاثیرگذار، برای حفاظت در برابر ذرات به چه میزان است؟
۳. کارایی دستکش‌های حفاظتی با در نظر گرفتن فاکتورهای تاثیرگذار، برای حفاظت در برابر ذرات به چه میزان است؟
۴. کارایی لباس‌های حفاظتی با در نظر گرفتن فاکتورهای تاثیرگذار، در برابر ذرات به چه میزان است؟
۵. چالش‌های موجود و روند مطالعات آینده برای توسعه تجهیزات حفاظت تنفسی و پوستی برای ذرات چیست؟

#### ب) شناسایی مطالعات مرتبط

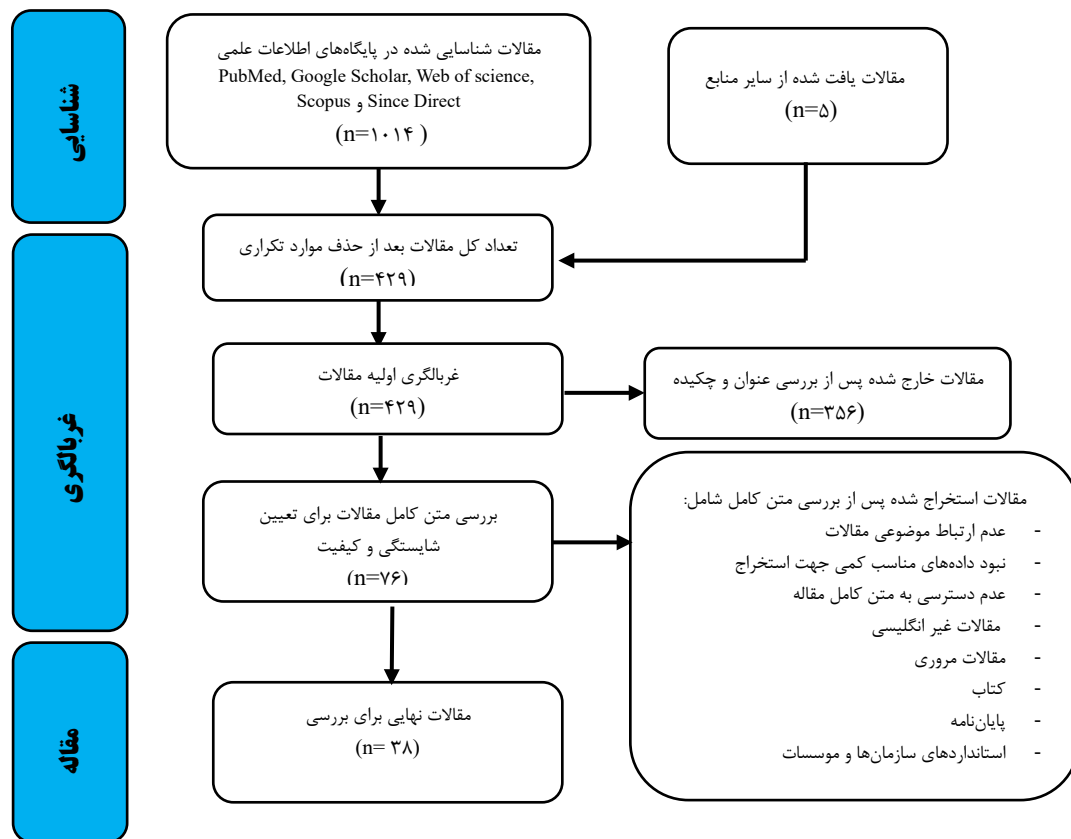
شناسایی مطالعات با جست‌وجو در پایگاه‌های اطلاعات علمی، تا سال ۲۰۲۲ انجام شد. این پایگاه‌ها شامل PubMed, Google Scholar, Science direct, Web of Science (WOS), Scopus بودند. همچنین برای جست‌وجو در پایگاه‌های مذکور، از کلیدواژه‌های "effective", "protect", "nanomaterial", "nanoparticle", "penetrate", "glove", "cloth", "mask", "respirator", و "PPE" استفاده شد.

فاکتور حفاظت مؤثر<sup>۱</sup> (EPF) و فاکتور برنامه حفاظتی<sup>۲</sup> (PPF) از جمله مهم‌ترین آنهاست (۱۵-۱۷).

تجهیزات حفاظت فردی مورد استفاده برای حفاظت پوست در برابر نانوذرات عمدتاً شامل لباس و روپوش‌های آزمایشگاهی، پاپوش، کفش و دستکش می‌باشند (۱۸). از آنجایی که هنوز هیچ روش اختصاصی استاندارد شده‌ای برای ارزیابی کارایی لباس‌ها و دستکش‌های محافظ در برابر نانوذرات در دسترس نیست، محققان به دنبال توسعه روشی برای این منظور هستند. با این حال برای منسوجات، میزان قابلیت نفوذ هوا به منظور بررسی کارایی در نظر گرفته می‌شود؛ مانند پارچه‌های مورد استفاده در پوشش و روپوش‌های آزمایشگاهی، و یا چیدمان لایه‌ها که برای این منظور در نظر گرفته می‌شود (۱۹، ۲۰). در این روش جریان نانو آئروسول از طریق یک سیستم شبیه‌سازی بسته اعمال می‌شود و غلظت آن در هر دو طرف نمونه با استفاده از تکنیک‌های استاندارد شمارش ذرات مانند اسکنر اندازه ذرات متحرک<sup>۳</sup> (SMPS)، همراه با یک شمارگر ذرات تراکمی<sup>۴</sup> (CPC) یا طیف‌سنج ذرات گسترده (WPS) اندازه‌گیری می‌شود (۲۱).

اخیراً تلاش‌های قابل توجهی برای توسعه روش‌های آزمایشگاهی اختصاص‌یافته است که شرایط کارایی تجهیزات حفاظت فردی در مواجهه با نانو ذرات در محل کار را بهتر شبیه‌سازی می‌کنند (۲۲). با توجه به تنوع تجهیزات حفاظت فردی و عدم وجود روش‌های واحد برای ارزیابی کارایی تجهیزات حفاظت تنفسی و پوستی در برابر نانوذرات، سؤالات و چالش‌های متعددی برای متخصصان در حوزه ایمنی و سلامت به منظور کنترل موثر آن‌ها وجود دارد (۲۳). از این رو مطالعه حاضر به بررسی کارایی تجهیزات حفاظت تنفسی و پوستی به منظور کنترل نانوذرات موجود در محیط‌های کاری با رویکرد مرور دامنه‌ای پرداخته است.

1. Effective protection factor (EPF)
2. Program protection factor (PPF)
3. Scanning Mobility particle seizer (SMPS)
4. Compressed particle counters (CPC)



شکل ۱: فرایند انتخاب و غربالگری مقالات

استفاده شد. پس از حذف مقالات تکراری با در نظر گرفتن معیارهای ورود، مطالعات مورد نظر انتخاب شدند. صلاحیت ورود مقالات به مطالعه توسط دو محقق به طور مستقل بررسی شد و مطابقت مقالات با اهداف این مطالعه بررسی گردید. در روند بررسی، وجود متغیرها و داده‌های کمی در رابطه با عملکرد تجهیزات حفاظت فردی مدنظر قرار گرفت. همچنین برای تحلیل کمی داده‌ها از نرم‌افزار Microsoft Excel کمک گرفته شد. در شکل ۱ روند شناسایی، انتخاب و غربالگری مقالات ارائه شده است.

#### د) ثبت و جمع‌آوری داده‌ها

متغیرهایی که از مطالعات منتخب استخراج شدند شامل نوع و محدوده اندازه آئروسول، MPPS، روش اندازه‌گیری نانو ذرات، فاکتور حفاظتی/ کارایی حفاظتی

#### ج) انتخاب مطالعات مرتبط

مقالات اصلی که حداقل یکی از کلیدواژه‌های مورد نظر را در بخش عنوان، چکیده و واژگان کلیدی داشتند، وارد پژوهش شدند. این مقالات دارای متن کامل بوده و به زبان انگلیسی منتشر شده بودند؛ معیارهای اصلی ورود در این مطالعه استفاده از تجهیزات حفاظت فردی شامل تجهیزات حفاظت تنفسی از قبیل ماسک‌ها و رسیپراتورها، لباس‌های حفاظتی و دستکش‌ها در مواجهه با نانوذرات بود. در مواردی که متن کامل مقالات در دسترس نبود، همچنین مقالات غیر مرتبط، مقالات منتشر شده به زبان‌های غیر انگلیسی، مقالات تکراری، مطالعات مروری، کتاب‌ها، استانداردهای منتشر شده توسط سازمان‌ها و موسسات و پایان‌نامه‌ها از روند بررسی حذف شدند. به منظور جمع‌بندی مطالعات از نرم‌افزار EndNote



نانو ذرات ( $< 100 \text{ nm}$ ) و میانگین نفوذ ذرات<sup>۲</sup> به عنوان تابعی از تعداد ذرات، با استفاده از تکنیک‌های شمارش ذرات گزارش شده بود. در ۱۴ مطالعه برای شبیه‌سازی سناریوهای واقعی‌تر یا پرداختن به اهداف خاص در مطالعات، تجهیزات حفاظت تنفسی با استفاده از آدمک‌ها مورد آزمایش قرار گرفتند. در ۹ مطالعه طبق پروتکل NIOSH از فیلتر باکس برای ارزیابی عملکرد استفاده شده بود. دو مطالعه دیگر نیز بصورت شبیه‌سازی میدانی و بر روی افراد صورت گرفته بود. از بین تجهیزات حفاظت تنفسی، N95، N99، R95، P100، FFP2 و FFP3 به عنوان مهمترین رسپراتورها مورد بررسی قرار گرفته بودند. همچنین از بین ماسک‌ها، نوع ماسک‌های نیم صورت و تمام صورت و تمام صورت فیلتردار به عنوان مهمترین ماسک‌ها در برابر مواجهه با نانوذرات پیشنهاد شده بود. به منظور بررسی کارایی فیلترها در به دام اندازی نانو ذرات، از ذرات  $\text{TiO}_2$ ،  $\text{NaCl}$ ، پلاکت‌های گرافن، DOP، فلزات (اکسید) و ذرات چوب، کاغذ و پلاستیک استفاده شده بود. سایر یافته‌های مربوط به حفاظ‌های تنفسی در **جدول ۱** ارائه شده است.

مطالعات در زمینه ارزیابی تجهیزات حفاظت پوستی در برابر نانو ذرات عمدتاً مطالعات تجربی با استفاده از محفظه‌های آزمایش برای شبیه‌سازی شرایط استفاده واقعی از تجهیزات بودند. در مطالعات تجهیزات حفاظت پوستی، ۶ مطالعه برای ارزیابی دستکش‌ها یافت شد. همچنین، در ۷ مطالعه، به حفاظت افراد با استفاده از لباس‌های حفاظتی در برابر نانو ذرات پرداخته شده بود. این مطالعات تجربی طیف گسترده‌ای از روش‌های آزمایشگاهی (مانند مطالعات آزمایشگاهی مبتنی بر انتشار و فیلتراسیون)، شرایط آزمایش (مانند جامدات آئروسل شده، رطوبت و تنش فیزیکی) و انواع نانو ذرات (شامل  $\text{SiO}_2$ ،  $\text{TiO}_2$ ،  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ،  $\text{Ag}$ ،  $\text{NaCl}$ ) را مورد بررسی قرار داده بودند. کارایی و مشخصات تجهیزات حفاظت پوستی شامل دستکش و لباس حفاظتی برای نانو ذرات استخراج شده از مقالات در جداول ۲ و ۳ ارائه شده است. مشابه تجهیزات

ماسک، لباس و دستکش بودند. در این مطالعه برای یکسان‌سازی بررسی میزان حفاظت تجهیزات حفاظت فردی در برابر نانو ذرات از یک فاکتور حفاظتی (PF)<sup>۱</sup> یا درصد اثربخشی (%) که معمولاً برای ماسک‌های تنفسی، لباس‌های محافظ و دستکش‌ها اعمال می‌شود؛ استفاده گردید. این فاکتور به صورت زیر محاسبه می‌شود (۲۵):

$$PF = \frac{C_{out}}{C_{in}}$$

در این فرمول  $C_{out}$  غلظت ذرات در خارج از وسیله حفاظتی و  $C_{in}$  غلظت ذرات نفوذ کرده در وسیله حفاظتی می‌باشد.

#### ه) جمع‌بندی، خلاصه‌سازی و گزارش یافته‌ها

با کمک فرم استخراج داده‌ها که توسط محقق و همکاران تهیه شده بود، مطالعات انتخاب شده به‌طور مستقل توسط دو محقق بررسی شد و در نهایت نتایج به اشتراک گذاشته شده و جمع‌بندی گردید.

### == یافته‌ها

در مجموع ۱۰۱۴ مقاله با جستجوی اولیه یافت شد. پس از بررسی نهایی، ۳۸ مقاله برای بررسی اطلاعات کمی و کیفی در مورد کارایی تجهیزات حفاظت فردی وارد مطالعه شدند. قدیمی‌ترین مطالعه مربوط به سال ۲۰۰۰ بود، در حالی که جدیدترین آن‌ها در سال ۲۰۲۱ منتشر شده بود. نتایج بررسی‌ها نشان داد؛ که ۲۵ مقاله در زمینه تجهیزات حفاظت تنفسی انجام شده بود، از این میان ۳ مقاله در ارتباط با ماسک‌های تنفسی (نیم صورت و تمام صورت) و بقیه در ارتباط با رسپراتورها بودند. در زمینه تجهیزات حفاظت پوستی نیز، ۶ مقاله در رابطه با دستکش‌های حفاظتی و ۷ مقاله مرتبط با لباس‌های حفاظتی انجام شده بود.

همانطور که در **جدول ۱** ارائه شده است؛ در همه مطالعات در مورد تجهیزات حفاظت تنفسی، اندازه قطر

2. Permissible particle

1. Protect factor



حفاظت تنفسی، فرض بر این است که مواد تست شده در برابر تجهیزات حفاظت پوستی، طبق دستورالعمل تأیید شده انتخاب می‌شوند؛ که بر اساس روش‌های تست استاندارد ASTM یا EN است (۴۹).

### بحث

کنترل نانوذرات در محیط‌های کاری به عنوان یک

چالش مهم برای متخصصان حوزه سلامت و ایمنی محسوب می‌شود. در این راستا کارایی و اثربخشی تجهیزات حفاظت تنفسی و پوستی به منظور کاهش مواجهه شاغلان از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. اگرچه اندازه ذرات می‌تواند بر راندمان جذب و نفوذ از طریق مدیای فیلتر تنفسی و لباس‌های حفاظتی تأثیر بگذارد، اما مقادیر کارایی و اثربخشی برای انواع مختلف تجهیزات

جدول ۱: مشخصات فیلتراسیون ماسک‌های تنفسی در برابر نانو ذرات (۲۰۰۰-۲۰۲۲)

نویسنده و سال انتشار	نوع تجهیزات حفاظت تنفسی و تعداد مدل‌های آزمایش شده	نوع و قطر ذرات آزمایش شده	نرخ جریان (l/min)	MPPS (nm)	میزان کارایی تخمین زده شده (%)	نحوه آزمایش ماسک‌ها	منابع
Martin and Moyer (۲۰۰۰)	سه مدل N95 و یک مدل از N99, R95 و P100	NaCl, DOP; ۴۰۰-۱۵	۸۵	۱۰۰-۵۰	۹۸/۹۹-۹۹/۹۴	دستگاه تست فیلتر	(۲۷)
Lee et al. (۲۰۰۴)	یک مدل N95	NaCl; ۴۰-۵۰۰	۳۰	۳۰۰-۱۰۰	۹۸/۲	آدمک شبیه‌سازی	(۲۸)
Balazy et al. (۲۰۰۶)	دو مدل N95	NaCl; ۱۰-۶۰۰	۸۵	۵۰-۴۰	۹۴/۵۵	آدمک شبیه‌سازی	(۲۹)
Rengasamy et al. (۲۰۰۷)	پنج مدل N95	NaCl; ۲۰-۳۰	۸۵	۴۰	۹۶/۷	دستگاه تست فیلتر	(۱۵)
Eninger et al. (۲۰۰۸)	دو مدل N99 و یک مدل N95	NaCl; ۲۰-۵۰۰	۳۰, ۸۵, ۱۳۰	۱۰۰<	۹۴/۹-۹۵/۴	آدمک شبیه‌سازی	(۳۰)
Eshbaugh et al. (۲۰۰۹)	چهار مدل از P100 و N95	NaCl, DOP; ۲۹۰-۲۰	پیوسته و متناوب ۱۱۵, ۸۵, ۴۰ و ۱۳۵	۲۰۰-۵۰	۹۹-۹۵/۹۷	دستگاه تست فیلتر	(۳۱)
Rengasamy et al. (۲۰۰۹)	چهار مدل از FF.P100, N95, FFP3 و P2	NaCl; ۲۰-۴۰۰, Ag; ۴-۳۰	۸۵	۶۰-۳۰	۹۶/۷-۹۹/۸۴	دستگاه تست فیلتر	(۳۲)
Cho et al. (۲۰۱۱)	چهار مدل از P100 و N95, دو مدل P95, یک مدل R95 و FFP2	فیوم جوشکاری و NaCl ۲۰۰-۱۵	۴۲/۸۵-۵	۶۰-۴۱	۹۵/۸-۹۷/۳۴	دستگاه تست فیلتر	(۳۳)
Mostofi et al. (۲۰۱۲)	یک مدل N95	NaCl; ۱۰۰-۱	۱/۱۰-۵	۷۰-۴۰	۹۶/۹۶-۹۲/۶۳	آدمک شبیه‌سازی	(۳۴)
Brochet et al. (۲۰۱۲)	دو مدل ماسک نیم صورت	NaCl; ۱۰۰-۵	پیوسته و متناوب ۸۴	---	۹۹/۹۹-۹۰/۹۵	آدمک شبیه‌سازی	(۱۶)
Rengasamy et al. (۲۰۱۳)	یک مدل N95 و چهار مدل N100 و P100	NaCl, DOP; ۴۰۰-۲۰	۸۵	۱۵.۴۰ و ۲۰۰	۹۸/۹۹-۶۴/۹۸	دستگاه تست فیلتر	(۳۵)
He et al. (۲۰۱۳)	یک ماسک نیم‌صورت و یک ماسک تمام‌صورت	کاغذ، چوب و پلاستیک ۵-۲۰۰	۸۵.۳۰ و ۱۳۰	۱۰۰<	۹۹/۹۷	آدمک شبیه‌سازی	(۳۶)
Bahloul et al. (۲۰۱۴)	یک مدل N95	NaCl; ۲۰۵-۱۰	۶۳-۴۲	۴۰	۹۷/۴۳	آدمک شبیه‌سازی	(۳۷)
Vo E, et al. (۲۰۱۵)	چهار مدل N95 و چهار مدل P100	NaCl; ۴۰۰-۱۰	---	---	۹۹-۹۹/۵	آزمایش میدانی بر روی انسان	(۳۸)

ادامه جدول ۱: مشخصات فیلتراسیون ماسک‌های تنفسی در برابر نانو ذرات (۲۰۲۲-۲۰۰۰)

منابع	نحوه آزمایش ماسک‌ها	میزان کارایی تخمین زده شده (%)	MPPS (nm)	نرخ جریان (l/min)	نوع و قطر ذرات آزمایش شده	نوع تجهیزات حفاظت تنفسی و تعداد مدل‌های آزمایش شده	نویسنده و سال انتشار
(۳۹)	دستگاه تست فیلتر	۹۸-۹۶/۸	---	۸۵-۳۰	NaCl; ۱۰-۷۰۰	چهار مدل N95	Rengasamy et al. (۲۰۱۵)
(۴۰)	آدمک شبیه‌سازی	۹۹/۹۹-۹۲۵/۹۸	۱۰۵-۳۰	۳۰، ۸۵، ۱۵ و ۱۳۰	NaCl، چوب، کاغذ و پلاستیک؛ ۱۵۰-۲۰	یک مدل R95 و یک مدل P95	Gao et al. (۲۰۱۵)
(۴۱)	آدمک شبیه‌سازی	۹۵	۱۵۴-۹۱	۸۵، ۳۰ و ۱۳۰	NaCl، TiO <sub>2</sub> نانو، تیوب‌های کربن و فلورن؛ ۱۲/۵۸-۳	یک مدل N95	Zhou et al. (۲۰۱۶)
(۴۲)	آدمک شبیه‌سازی	۹۴/۹۷-۸/۱	۴۳/۵۲-۵/۴	۸۵	NaCl	دو مدل N95	Ramirez et al. (۲۰۱۶)
(۴۳)	آزمایش میدانی بر روی انسان	۹۹/۹۳	۶۰-۴۰	۱۵، ۸۵، ۳۰ و ۱۳۰	NaCl، DOP؛ ۱۶۱-۲۸	یک مدل ماسک فیلتر دار تمام‌صورت	Lee et al. (۲۰۱۷)
(۴۴)	آدمک شبیه‌سازی	۹۵/۲	۵۰-۳۵	۹۵	NaCl؛ ۴۰۰-۲۰	سه مدل FFP1، چهار مدل FFP2 و شش مدل FFP3	Serfozo et al. (۲۰۱۷)
(۴۵)	آدمک شبیه‌سازی	۹۳	۲۶/۵	۸۵	۱۱/۳۶۵-۵	دو مدل N95	Adhikari (۲۰۱۸)
(۴۶)	دستگاه تست فیلتر	۹۹-۸۰/۷	۱۰۰<	۸۵	NaCl؛ و روغن ۱۰۰۰-۲۰	چهار مدل N95، دو مدل P100 و دو مدل FFP1	Rengasamy et al. (۲۰۱۸)
(۴۷)	آدمک شبیه‌سازی	۹۸/۶۴-۹۹/۹۹	۶۰	پیوسته و متناوب ۵۰، ۱۵ و ۸۵	۳۶۵-۱۰	دو مدل N95 و دو مدل P100	Zhu et al. (۲۰۲۰)
(۱۶)	دستگاه تست فیلتر	۹۴/۳۲-۹۸/۱۱	۱۰۰<	۸۵، ۴۲ و ۱۳۵	۲۰۵-۱۰	دو مدل N95	Brochot et al. (۲۰۲۰)
(۴۸)	آدمک شبیه‌سازی	۹۵/۹۶-۱۳/۲۷	۴۲-۱۰	۸۵	سیمان، چوب، خاک؛ ۱۱/۱۵۴-۴	دو مدل N95	Mitra et al. (۲۰۲۱)

ماسک‌های تنفسی به شدت تحت تأثیر میزان تناسب آن‌ها با صورت افراد قرار دارد. در صورت عدم تنظیم مناسب ماسک‌های تنفسی، میزان نشت آن‌ها ۱۰٪ تا ۲۰٪ خواهد شد (۵۸). مطالعه Lee و همکاران (۲۰۱۷) نشان داد که ماسک‌های FFP3 نسبت به ماسک‌های FFP2 با اندازه‌های متفاوت صورت، یکسان یا حتی بدتر عمل می‌کنند. این امر احتمالاً به دلیل افت فشار بیشتر و تراکم ذرات FFP3 در مقایسه با ماسک‌های FFP2 می‌باشد. همچنین تفاوت در عملکرد بین ماسک نیم صورت و ماسک تمام صورت قابل بحث است، تعداد محدودی از مطالعات تجربی نشان داده‌اند که ماسک‌های نیم صورت گاهی بهتر از ماسک‌های تمام صورت عمل می‌کنند، اگرچه این تأثیر را می‌توان به تناسب بهتر با

حفاظت فردی در مواجهه با نانو ذرات به‌طور کامل در دسترس نیست. این مطالعه تلاش کرده است تا با نگاهی به مطالعات پیشین، کارایی تجهیزات حفاظت تنفسی و پوستی را برای مواجهه کارکنان با نانو ذرات مورد بررسی قرار دهد. از نظر تئوری، ترکیبی از دو مکانیسم انتشار و جذب منجر به کارایی حداقل یا نفوذ حداکثری ذرات معین- معمولاً بین ۱۰۰ تا ۵۰۰ نانومتر و حداکثر در ۳۰۰ نانومتر می‌شوند (۱۵) و از لحاظ عملی ثابت شده است که اندازه‌های بسیار کوچک نانو ذرات بین ۴ تا ۲۰ نانومتر (مانند نقره) به‌طور مؤثر توسط مدیای فیلترهای تنفسی جذب می‌شوند (۳۵). کارایی فیلترها و میزان حفاظت مشخص شده توسط

مقادیر MPPS و کارایی فیلتراسیون در مورد ذرات با قطر ۳ و ۳۰۰ نانومتر را کاهش دهد (۲۹). علاوه بر این، الگوی جریان هوا نیز ممکن است در کارایی بدام اندازی ذرات نقش داشته باشد. آزمایش‌های انجام‌شده با فیلترهای مختلف N95 و P100 و با نانو ذرات NaCl و DOP نشان داده است که نفوذ ذرات تحت شرایط جریان متغیر، مشابه الگوی تنفس انسان، در مقایسه با جریان هوای ثابت بیشتر رخ می‌دهد (۵۸). محققان دیگر هیچ اثری از شرایط سیکنلی در مقایسه با جریان ثابت بر نفوذ نانو ذرات NaCl به قطر ۱۳ و ۵۹ نانومتر را از طریق ماسک‌های نیمه صورت مجهز به فیلترهای FFP2 و FFP3 گزارش نکردند (۱۶).

در مطالعه‌ای که برای ذرات در محدوده ۱۰ تا ۱۰۰ نانومتر و با نرخ جریان هوای ۳۰ و ۸۵ لیتر در دقیقه انجام شد. MPPS حدود ۵۰ نانومتر برای ماسک‌های آزمایش شده مشاهده گردید (۵۰). یافته‌ها همچنین نشان داد که میزان نفوذ در ماسک‌های N95 می‌تواند از ۵ درصد MPPS در جریان هوای ۸۵ لیتر در دقیقه فراتر برود. با این حال، انتظار می‌رود که ماسک‌های N95 کارایی فیلتراسیون ۹۵٪ را در برابر نانو ذرات داشته باشند (۲۹، ۳۰، ۴۲، ۴۵). Balazy و همکاران عملکرد فیلتراسیون ماسک‌های N95 را برای ذرات NaCl در اندازه ۱۰ تا ۶۰۰ نانومتر بر اساس یک پروتکل با استفاده از آدمک شبیه‌سازی در نرخ جریان هوای ۳۰ و ۸۵ لیتر در دقیقه آزمایش کردند و MPPS بدست آمده برای ماسک‌ها بین ۳۰ تا ۷۰ نانومتر بود (۲۹). همچنین در مطالعه Martin و همکاران، MPPS در فیلترهای مورد بررسی در محدوده اندازه ۵۰ تا ۱۰۰ نانومتر مشاهده گردید (۲۷). Rengasamy و همکاران نفوذ آئروسول NaCl در ماسک‌های N95 را در محدوده اندازه ۲۰ تا ۴۰۰ نانومتر بررسی نموده و MPPS را حدود ۴۰ نانومتر گزارش کردند (۱۵). در مجموع، مقالات MPPS را در محدوده ۱۰۰ تا ۴۰۰ نانومتر گزارش کردند و نشان از افزایش MPPS با کاهش قطر فیلتر و افزایش سرعت جریان هوا می‌باشد. در مطالعات دیگر با تست ماسک‌های N95 و FFP3 با استفاده از آزمون آدمک، MPPS در

ابعاد مختلف صورت افراد نسبت داد. به طور کلی، مقادیر محافظه‌کارانه‌تر برای انواع مختلف تجهیزات حفاظت تنفسی پیشنهاد می‌شود، با فرض اینکه عوامل انسانی مانند میزان کار، تست تناسب ابعاد و تعمیر و نگهداری در نظر گرفته نشود (۴۳). در مطالعه دیگر توسط Serfozo (۲۰۱۷) میزان عملکرد ماسک‌های FFP1 و FFP2 به ترتیب ۹۶/۸-۸۳/۷٪ و ۹۷/۶۵-۶۵/۷٪ در تست با نانو ذرات بدست آمد. عملکرد ماسک‌های FFP3 نیز در رنج ۹۹/۹۸-۹۶/۷٪ بود. به طور کلی نتایج یک روند افزایشی یکنواخت بین نفوذ با قطر نانو ذرات مقدار ۱٪ را نشان داد (۴۴).

مدل‌های تجاری مختلف فیلترهای N95 و ماسک‌های تنفسی نیز با نرخ جریان ۸۵ لیتر بر دقیقه با نانو ذرات NaCl و Ag مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. نفوذ نانو ذره با مقدار حداکثر ۵٪ در قطر بین ۴۰ و ۶۰ نانومتر مشاهده شد. همچنین این آزمایش برای ماسک‌های تنفسی P100 انجام شده و میزان نفوذ حداکثر ۰/۰۱٪ مشاهده گردید. در مورد یک فیلتر FFP3 آزمایش شده با نانو ذرات گرفتاریت ۱۰-۱۰۰ نانومتر، حداکثر میزان نفوذ حدود ۲٪ بود (۵۰).

توجه به این موضوع لازم است که در مطالعات مختلف از روش تست NIOSH، برای بررسی میزان حفاظت ماسک‌ها در برابر نانو ذرات استفاده شده است (۱۷). Janssen و همکاران بر این باورند که نرخ جریان هوا به میزان ۸۵ لیتر بر دقیقه (متوسط نرخ تنفس یک فرد تحت بارکاری سنگین) در روش NIOSH ممکن است بالاترین سطح جریان تنفسی را نشان ندهد و لذا پیشنهاد می‌کنند که نرخ جریان هوای اعمالی به ۳۵۰ لیتر بر دقیقه افزایش یابد، آنها بر این باورند که نرخ جریان هوای تنفسی در محیط‌های کاری ممکن است بسیار بالاتر و به مقدار ۳۵۰ برسد (۵۹).

از متغیرهای مهم در ارزیابی کیفیت ماسک‌های تنفسی، MPPS می‌باشد. عواملی که بر MPPS و مقدار حداکثر نفوذ ذرات تأثیر می‌گذارد، سرعت و الگوی جریان ذره است. گاهی اوقات نرخ بالای جریان هوا، می‌تواند

جدول ۲: عملکرد و مشخصات لباس‌های حفاظتی در برابر نانو ذرات (۲۰۰۰-۲۰۲۲)

منابع	کارایی حفاظتی لباس	نوع و سایز ذرات (nm)	مدل لباس	نویسنده و سال انتشار
(۲۰)	۸۰-۵۰٪	NaCl: ۵۰۰-۱۰۰	پارچه‌های بافته‌شده و الیافی	Huang S.H, et al. (۲۰۰۷)
(۵۰)	پارچه پنبه‌ای: ۷۳٪ منسوجات پلی‌اتیلن: ۹۹/۴۰٪	گرافیت: ۳۵-۴۰	پارچه پنبه‌ای منسوجات پلی‌اتیلن دانسیته بالا	Golanski L, et al. (۲۰۰۹)
(۵۱)	پنبه و پلی‌استر در هنگام آزمایش با ذرات TiO <sub>2</sub> و پلاتین با میانگین قطر هندسی حدود ۱۰ نانومتر کارایی تقریباً یکسانی دارند. پارچه‌های غیر بافته در برابر نانو ذرات پلاتین و TiO <sub>2</sub> در ذرات ۱۰ نانومتر کارآمدتر از پنبه بافته‌شده و پلی‌استر هستند.	TiO <sub>2</sub> : ۹-۹۰ پلاتین: ۹-۱۹	پنبه پلی‌اتیلن با چگالی بالا پارچه Tyvek پلی‌استر	Golanski L, et al. (۲۰۱۰)
(۵۲)	زمان مورد نیاز برای رسیدن به حداکثر نرخ نفوذ در حدود ۵۵٪ در ۹۰ دقیقه برای یک روپوش آزمایشگاهی خشک و حدود ۶۰ دقیقه در لباس اتاق تمیز خشک بدست آمد.	AgNO <sub>3</sub> : ۱۲-۱۰	یک روپوش آزمایشگاهی از پنبه، یک لباس اتاق تمیز از پلی‌استر	Park et al. (۲۰۱۱)
(۵۳)	پارچه‌های بافته نشده < ۹۹٪ پارچه‌های بافته‌شده < ۹۷٪	NaCl: ۴۰-۱۴	پارچه‌های بافته نشده پارچه‌های بافته‌شده	Ben Salah, et al. (۲۰۱۶)
(۲۵)	CPC1 <sup>۱</sup> : بدون درز ۱۲٪ و با درز: ۲۸٪ CPC2: بدون درز ۱٪ و با درز: ۵۸٪ CPC3: بدون درز ۲۸٪ و با درز: ۸۸٪ CPC4: بدون درز ۱٪ و با درز: ۲۲٪ CPC5: بدون درز ۵٪ و با درز: ۶۵٪ CPC6: بدون درز ۵٪ و با درز: ۵۵٪ CPC7: بدون درز ۲٪ و با درز: ۸۰٪ CPC8: بدون درز ۱۰٪ و با درز: ۱۵٪	NaCl: ۳۹۲-۱۴	دو مدل پلی‌پروپیلن- یک مدل پلی‌اتیلن با دانسیته بالا- یک مدل پلی‌اتیلن- چهار مدل ترکیبی پلی‌پروپیلن و پلی‌اتیلن	Vinches et al. (۲۰۱۷)
(۵۴)	میزان نفوذ TiO <sub>2</sub> -روتیل ۲۲٪ و TiO <sub>2</sub> -آناناز تنها ۱۱٪ بود. حداقل نفوذ برای 30-nSiO <sub>2</sub> ۳۰ نانومتر ۲۴٪ و برای 300-nSiO <sub>2</sub> ۳۰۰ نانومتر ۲۶٪ به دست آمد. اختلاف ۲٪ ناچیز بوده در نتیجه نفوذ برای هر دو اندازه ذرات معادل هم هستند.	nTiO <sub>2</sub> , nSiO <sub>2</sub> : ۳۰۰-۲۰۰	یک نوع لباس حفاظتی (پنج لایه از پلی‌پروپیلن ساخته شده است)	Vinches et al. (۲۰۱۸)

<sup>۱</sup> Chemical Protective Clothing

محدوده ۳۰ تا ۶۰ بدست آمد (۳۴، ۳۷، ۴۰، ۴۴، ۴۷). پارامترهای دیگر مؤثر بر نفوذ نانو ذرات از طریق فیلترها و ماسک‌های تنفسی، مربوط به خصوصیات ذرات شامل بار، شکل، نوع، اندازه و توزیع اندازه می‌باشند.

کارایی تصفیه فیلترهای فایبرگلاس برای نانو ذرات NaCl دارای دامنه اندازه ۱۰۰-۲۰۰ نانومتر، در هنگام تبدیل شدن به ذرات باردار، کاهش یافت. نتایج Zour و همکاران در بررسی ماسک‌های N95 در کنترل نانو ذرات TiO<sub>2</sub>، و نانو تیوب کربن میزان نفوذ در دبی ۱۳۰ لیتر بر دقیقه بیش از ۵٪ می‌باشد (۴۱). Adhikari و همکاران در بررسی انواع ذرات ریز سیمان، چوب و خاک در محدوده ۴۲۰-۱۰ نانومتر برای ماسک‌های درزبند شده درصد

نفوذ بسیار بالا بوده و در برخی موارد سطح حفاظت را تا ۶۰ درصد کاهش پیدا کرده است (۴۸). پارامتر دیگر مؤثر بر راندمان فیلتراسیون نانو ذرات، شرایط مورد استفاده از آن‌ها است. افزایش نفوذ نانو ذرات ناشی از کاهش بار سطح فیلتر به دلیل تأثیر رطوبت ناشی از بازدم گزارش شده است (۶۰). در مطالعه‌ای که اثر بار الکترواستاتیک بر کارایی مدیای فیلتر در ماسک N95 با نانو ذرات NaCl در محدوده سایز ۲۰۰-۴۰ نانومتر مورد بررسی قرار گرفت؛ کاهش راندمان در رطوبت ۱۰ تا ۷۰ درصد برای ذرات کمتر از ۱۰۰ نانومتر را نشان داد. به طوری که کاهش نفوذ نانوذره برای ذرات کمتر از ۱۵ نانومتر و افزایش برای ذرات بزرگ‌تر از ۱۰۰ نانومتر

جدول ۳: عملکرد و مشخصات دستکش های حفاظتی در برابر نانو ذرات (۲۰۲۲-۲۰۰۰)

نویسنده و سال انتشار	مدل دستکش	نوع و سایز ذرات (nm)	نحوه تعیین کارایی	کارایی حفاظتی دستکش	منابع
Golanski et al. (۲۰۱۰)	یک مدل دستکش نیتریل، یک مدل دستکش لاتکس و یک مدل دستکش نئوپرن	Pt:9-9 TiO <sub>2</sub> : ۹۰-۱۰ گرافیت: ۹۰-۱۵	تعیین کارایی با استفاده از دو جعبه آزمایش؛ یکی دارای فیلتر با کنترل جریان هوا و دیگری بدون فیلتر، با کمک تزریق نانو ذرات به این جعبه-ها و مواجهه دستکش با نانو ذرات و در نهایت تحلیل تعداد ذرات نفوذی قبل و بعد از آزمون با استفاده از شمارشگر نانو ذرات	برای نانو آئروسول های TiO <sub>2</sub> و Pt با اندازه ذرات با قطر هندسی متوسط حدود ۱۰ نانومتر بسیار کارآمد بودند.	(۵۱)
Park et al. (۲۰۱۱)	دستکش لاتکس یکبار مصرف دستکش نیتریل یکبار مصرف	AgNO <sub>3</sub> : ۱۲۰-۱۰	تعیین کارایی با استفاده از جعبه آزمایش، با کمک تزریق نانو ذرات نقره و تحلیل میزان نفوذ آنها با استفاده از شمارشگر نانو ذرات	هیچ نفوذی از طریق دستکش های متشکل از مواد غیر متخلخل یافت نشد.	(۵۲)
Dolez et al. (۲۰۱۱)	یک مدل نیتریل و لاتکس یکبار مصرف و یک مدل دستکش لاستیکی نئوپرن و بوتیل	TiO <sub>2</sub> : ۱۵	ارزیابی کارایی دستکش، پس از تغییر شکل های مکانیکی آن با یک شبیه ساز، با کمک یک جعبه آزمایش مجهز به دستکش و در معرض مواجهه با نانو ذرات پودری تزریق شده و در نهایت تحلیل میزان نفوذ آنها با استفاده از اسکنر نانو ذرات	نتایج اولیه به دست آمده با پودر TiO <sub>2</sub> نشان دهنده نفوذ احتمالی نانو ذرات از طریق دستکش به دنبال تغییر شکل های مکانیکی است.	(۵۵)
Vinches et al. (۲۰۱۳)	دو مدل دستکش لاستیکی نیتریل (۱۰۰ و ۲۰۰ μm)، یک مدل دستکش لاتکس و یک مدل دستکش لاستیکی بوتیل	nTiO <sub>2</sub> : ۱۵	ارزیابی عملکرد دستکش محافظ در برابر نانو ذرات، پس از تغییر شکل های مکانیکی آن، نظیر خم کردن دست در شبیه ساز مکانیکی، در اثر مواجهه دستکش با محلول نانو ذرات در یک محفظه انجام شده و در نهایت تعیین غلظت روی دستکش (مواجهه-کنترل) با ICP-MS	ضعیف: NBR-100 خوب: NBR-200 خوب: Latex ضعیف: Butyl Rubber	(۵۶)
Domat et al. (۲۰۱۷)	پنج مدل از دستکش های یکبار مصرف نیتریل نازک، نیتریل ضخیم، وینیل (بدون پودر) و لاتکس (بدون پودر) و سه مدل از دستکش های قابل استفاده مجدد: نئوپرن، پی وی سی و بوتیل	NaCl: ۴۰	تعیین کارایی با استفاده از جعبه آزمایش، با کمک تزریق ذرات کلرید سدیم و تحلیل میزان نفوذ آنها با استفاده از شمارشگر اندازه ذرات	میزان کارایی: ۹۹-۹۵٪	(۲۶)
Vinches et al. (۲۰۱۷)	دستکش محافظ لاستیکی نیتریل (ضخامت ۷۳ μm)	طلا: ۱۰۰	ارزیابی عملکرد دستکش محافظ در برابر نانو ذرات، پس از تغییر شکل های مکانیکی آن، نظیر خم کردن دست در شبیه ساز مکانیکی، در اثر مواجهه دستکش با محلول نانو ذرات در یک محفظه انجام شده و در نهایت تعیین غلظت روی دستکش (مواجهه-کنترل) با ICP-MS	نانو ذرات طلای ۵ نانومتری از میان دستکش های محافظ عبور کردند.	(۵۷)

جدول ۳: عملکرد و مشخصات دستکش های حفاظتی در برابر نانو ذرات (۲۰۲۲-۲۰۰۰)

انجام شده با ماسک های نیم صورت و از طریق آدمک شبیه سازی، تفاوت زیادی در ضریب حفاظت ماسک ها برای ذرات با قطر ۱۳ و ۵۹ نانومتر وجود داشت (۱۶). همچنین، تغییرات زیادی در میزان نفوذ نانو ذرات در ماسک های با آب بندی مناسب مشاهده شد. این موضوع به عدم تکرار پذیری وضعیت ماسک روی آدمک و آب بند

مشاهده گردید (۱۷). سایر عوامل مؤثر بر کارایی حفاظتی فیلترها نیز شامل مدت زمان و میزان فعالیت افراد استفاده کننده فیلترها است (۶۱). تعداد محدودی از مطالعات مورد بررسی به اثرات نشن نانو ذرات در فصل مشترک ماسک های تنفسی با پوست صورت اختصاص داشت. با توجه به آزمایش های

با چگالی بالا (مانند پلی اتیلن، پلی آمید، پلی اورتان) به عنوان سد حفاظتی نسبت به مواد بافته شده مانند لیاف از جنس پنبه بهتر عمل می کنند (۶۶). همچنین شواهد کنونی نشان می دهد که ضخامت دستکش عامل مهمی است که بر حفاظت در برابر نانو ذرات تأثیر می گذارد. جمع آوری داده ها بر اساس مقادیر اثربخشی یا فاکتورهای حفاظتی حاصل از طیف وسیعی از روش های آزمایش، همیشه بحث برانگیز بوده است. اگرچه برخی از مطالعات در محیط های کار در مقایسه با مطالعات تجربی تأیید کرده اند که کارگران، سطوح مورد انتظار حفاظت در برابر نانو ذرات را داشته اند (۱۳). اخیراً تلاش های قابل توجهی به توسعه روش های آزمایشگاهی اختصاص یافته است که وضعیت تجهیزات حفاظت فردی در مواجهه با نانو ذرات در محیط کار را بهتر شبیه سازی می کنند. این امر برای مثال شامل اعمال تغییر شکل مکانیکی به نمونه های تجهیزات حفاظت فردی هم زمان با مواجهه نانو ذرات می باشد. علاوه بر این، تجهیزات حفاظت فردی در معرض محدودیت های فیزیکی مختلفی بوده که هم ناشی از شرایط محیطی کار و هم ناشی از شرایط رطوبت و دمایی است که در داخل لباس و دستکش ایجاد می شود (۲۲). اثر تورم ناشی از تماس با محلول های فیزیولوژیکی مانند عرق شبیه سازی شده است. مواجهه پوستی با نانو ذرات در محیط کار نیز شامل پودرهای خشک و محلول های کلوئیدی است، که با استفاده از روش های مختلف، میزان نفوذ نانو ذرات برای منسوجات مورد استفاده در تجهیزات حفاظت فردی بدست آمده است (۵۵).

آزمایش های صورت گرفته بر روی لباس های حفاظتی شامل انواع مختلفی از نانو ذرات اسیدی، کلرید پتاسیم، NaCl، گرافیت، تیتانیوم دی اکسید ( $TiO_2$ )، اکسید آهن، نقره و پلاتینیم به عنوان آئروسول خشک و محلول کلوئیدی بوده است. نرخ الگوی جریان عبوری از مدیای فیلتر آزمون شده با آئروسول های خشک اسید اولئیک و ذرات کلرید پتاسیم با قطر بین ۱۵ نانومتر تا ۳ میلی متر در سرعت های جریان مختلف، مشابه با نمونه لباس های حفاظتی با جنسهای مختلف بود که با آئروسول NaCl با

کردن آن در آزمایش های مختلف نسبت داده شده است. بعلاوه، هیچ تأثیری از اندازه ذرات بر میزان نفوذ آن مشاهده نشد (۴۶، ۴۷، ۶۲). نکته آخر در مورد کارایی فیلتر و ماسک های تنفسی در برابر نانو ذرات، به برگشت حرارتی هوای بازدمی مرتبط می باشد (۶۳). وجود این پدیده برای نانو ذرات توسط برخی محققان به عنوان عامل افزایش نفوذ ذرات کم تر از ۲۰ نانومتر گزارش شده است؛ اما پژوهشگران دیگر این مورد را به خطاهای تجربی ناشی از استفاده نامناسب از دستگاه های شمارشگر ذرات نسبت داده اند (۶۴، ۶۵).

یافته های کلی حاکی از آن است که بازدهی فیلتراسیون فیلترها در برابر نانو ذرات عموماً مطابق با مشخصات مربوط به نوع فیلتر می باشد؛ حتی اگر مقادیر MPPS بین ۳۰ تا ۵۰ نانومتر قرار داشته باشند، یعنی کمتر از سایز ذراتی ۳۰۰ نانومتری است که در روش های تست استاندارد برای حفاظت تنفسی استفاده می شوند. همچنین، برخی از محققان مقادیر نفوذ نانو ذرات را کمی بیشتر از ۵ درصد برای فیلترهای N95 گزارش کردند (۲۹، ۴۱، ۵۸، ۶۰). از سوی دیگر، شبیه سازی شرایط محیط کار مانند: رطوبت تنفسی، سرعت جریان بالای هوا، نانو ذرات پلی دیسپرس و نشستی موجود در سطح مشترک با پوست، نشان داد که این متغیرها می توانند بر راندمان فیلتراسیون نانو ذرات توسط ماسک تأثیر بگذارد. از آنجایی که هنوز هیچ اطلاعاتی در مورد حداکثر میزان مواجهه در دسترس نیست. شایسته است هنگام انتخاب تجهیزات حفاظت تنفسی در مواجهه با نانو ذرات احتیاط کرد.

در خصوص تجهیزات حفاظت پوستی، آزمایش نفوذ نانو ذرات از طریق این تجهیزات مانند لباس و دستکش پیچیده است و شواهد کمی وجود دارد؛ اما برخی مطالعات نشان می دهند که نوع نانوذره (برای مثال  $TiO_2$ )، حالت فیزیکی آن (جامد، جامد در مایع)، ضخامت لباس و نوع و ترکیب پارچه (بافته، نبافته، روکش شده) عوامل مهمی هستند (۵۵). به طور کلی، داده ها نشان می دهد که نانو ذرات می توانند از منسوجات و مواد نفوذ کنند، مواد

نیز این کاهش مشاهده گردید. با این حال، گزارش شده است که این روند بین مواد بافته‌شده و بافته نشده در مورد هیدروسول‌های نانو ذرات نقره در نتیجه اثر موئینگی منافذ بین الیاف، معکوس است (۵۲).

در ارتباط با نانو ذرات، تعداد مطالعات موجود برای غشاهای غیر متخلخل نظیر غشاهای مورد استفاده برای دستکش‌های محافظ بسیار محدود است. نتایج آزمایش انجام‌شده با پنج مدل دستکش ساخته‌شده با لاستیک نیتریل، لاتکس، نئوپرن و وینیل در یک دستگاه بدون جریان هوا نشان داد که مقادیر ضریب انتشار، برای نانو ذرات آئروسول خشک گرافیت با قطر ۳۰ نانومتر، نزدیک به صفر و مقادیر ضریب انتشار، برای نانو ذرات با قطر ۸۰ نانومتر بین  $5 \times 10^{-12}$  و  $4 \times 10^{-11}$  متر مربع بر ثانیه، است (۵۰). داده‌ها نشان دادند که ضریب انتشار اندازه‌گیری شده برای نانو ذرات علاوه بر جنس دستکش، به شرکت سازنده نیز بستگی دارد. همچنین، آزمایش‌هایی با استفاده از نانو ذرات پودری گرافیت انجام شده است (۵۱). در این آزمایش‌ها، دستکش‌های با جنس‌های لاستیک نیتریل، لاتکس، نئوپرن و لاستیک بوتیل در معرض نانوذرات پودر  $TiO_2$  با اندازه ۱۵ نانومتر بودند، در حالی که به طور هم‌زمان در معرض تغییر شکل دینامیکی به میزان ۵۰٪ در دو محور و به مدت پنج دقیقه نیز قرار داشتند (۶۸). غلظت Ti نشان‌دهنده حضور نانو ذرات  $TiO_2$  است. از سوی دیگر، افزایش غلظت Ti در لاستیک نیتریل پس از ۷ ساعت تغییر شکل دینامیکی در دو محور به میزان ۵۰٪ را نشان داد. این امر به آسیب در غشا مورد استفاده در دستکش و کاهش تراکم نانو ذرات ناشی از تنش‌های مکانیکی مکرر اعمال شده نسبت داده شد. در مورد نئوپرن در معرض پودر نانو ذرات  $TiO_2$ ، غلظت‌های بالاتر Ti برای ۵ و ۷ ساعت تغییر شکل دینامیکی در دو محور اندازه‌گیری شد. برخی از مطالعات برای دستکش‌هایی که در محلول‌های کلئیدی نانو ذرات نیکل با قطر ۳۰ نانومتر و  $TiO_2$  با قطر ۸۰ نانومتر قرار گرفته‌اند؛ انجام شده است. نتایج هیچ مقدار نفوذی از نانوذره را برای دستکش‌های لاستیک نیتریل، لاتکس و وینیل، بعد از

دبی ۱۰ و ۳۲ لیتر بر دقیقه تست شده بودند. در این مورد مقادیر MPPS بین ۱۰۰ و ۵۰۰ نانومتر متغیر بود (۲۰). سایر نویسندگان نفوذ نانو ذرات گرافیت از طریق منسوجات پنبه‌ای برای اندازه ذرات بزرگ‌تر از ۵۰ نانومتر را در سرعت پایین گزارش کردند که جریان هوای ناشی از حرکت بدن انسان را شبیه‌سازی کرده بودند (۵۰). همچنین در این مورد، اثر سرعت جریان اندازه‌گیری شده با استفاده از ذرات NaCl با نظریه فیلتراسیون مطابقت داشت (۱۹). بطوریکه، افزایش در نفوذ نانو ذرات و کاهش MPPS در میزان جریان‌های بالاتر مشاهده شد (۶۷). در مطالعه Golanski و همکاران بر روی لباس‌های حفاظتی از جنس منسوجات پنبه‌ای و پلی‌استر در مواجهه با ذرات  $TiO_2$  و پلاتین با قطر حدود ۱۰ نانومتر کارایی تقریباً یکسان بود. پارچه‌های غیر بافته در برابر نانوذرات پلاتین و  $TiO_2$  با قطر ۱۰ نانومتر کارآمدتر از پنبه بافته‌شده و پلی‌استر بودند (۵۱). در مطالعه مشابه دیگر میزان کارایی لباس‌های حفاظتی از منسوجات پنبه ۷۳٪ و پلی‌اتیلن بیش از ۹۹٪ گزارش گردید (۵۰). یافته‌های مطالعات Vinches و همکاران (۲۰۱۷) و (۲۰۱۸) میزان حفاظت هشت مدل از لباس‌های حفاظتی شیمیایی از جنس پلی‌پروپیلن و پلی‌اتیلن با لایه‌های متفاوت، بکار رفته برای مواجهه با نانو ذرات NaCl،  $nTiO_2$  و  $nSiO_2$  بررسی شد. بیشترین نفوذ ذرات در قطر ۳۰ نانومتر بود. یافته‌ها تأثیر درزبندی کامل لباس بر بهبود حفاظت پوستی در برابر نانو ذرات، حتی بیش از ۸۰ درصد را نشان می‌دهد. همچنین تجهیزات حفاظت فردی و لباس‌های ویژه مواد شیمیایی برای حفاظت افراد در برابر نانو ذرات عملکرد مناسبی را نشان داد (۲۵، ۵۴، ۵۷). انواع مختلفی از منسوجات بافته‌شده و غیر بافته‌شده نیز با نانو ذرات گرافیت، پلاتین و نانو آئروسول‌های خشک  $TiO_2$  با قطر بین ۱۰ و ۸۰ نانومتر به چالش کشیده شدند (۵۰، ۵۱). کاهش بیش از ۱۰۰۰ برابری در نفوذ ذرات با استفاده از مواد پلی‌اتیلن نوع تایوک<sup>۱</sup> در مقایسه با نمونه‌های پنبه‌ای و پلی‌استر بافته‌شده مشاهده شد، حتی با افزایش ضخامت

1. Tyvek



ارائه دهند. در دستکش‌های حفاظتی به نظر می‌رسد که نانو ذرات ممکن است در برخی از انواع دستکش‌ها در مواجهه با تغییر شکل‌های مکرر مکانیکی و یا نانو ذرات به شکل محلول کلونیدی نفوذپذیر شوند؛ بنابراین در صورت مواجهه احتمالی با نانو ذرات، تعویض دستکش به طور مرتب توصیه می‌شود (۵۶، ۵۷).

به طور کلی به دلیل ابهامات موجود نتیجه‌گیری علمی از مطالعات گذشته بسیار دشوار است. این عدم قطعیت به دلیل عدم درک در مورد اثربخشی و کارایی فیلترهای ماسک‌های تنفسی و تجهیزات حفاظت پوستی در مواجهه با نانو ذرات می‌باشد. روش‌ها و پروتکل‌های اتخاذ شده استاندارد نیستند و آزمایش‌ها در شرایط مختلف از لحاظ دما، سرعت جریان هوا، رطوبت نسبی، تکنیک‌های اندازه‌گیری و غیره انجام شده‌اند. این امر ضمن اینکه اعتبار روش‌ها را محدود کرده، سبب شده است که مقایسه نتایج مطالعات نیز دشوار گردد. یکی از چالش‌های اصلی در مواجهات شغلی بررسی تأثیر پارامترهای ذکر شده بر کارایی تجهیزات حفاظت فردی در شرایط محیط کار است. از این رو باید روش‌های تست استاندارد برای اندازه‌گیری کارایی تجهیزات حفاظت فردی در مواجهه با نانو ذرات توسعه داده شوند (۵۶). در رابطه با تجهیزات حفاظت پوستی نیز ممکن است نانو ذرات آئروسول چالش واقعی برای دستکش‌های حفاظتی نباشد؛ بلکه نانو ذرات محلول در مایع خطر بیشتری ایجاد نمایند. به همین دلیل روش‌های ارزیابی باید شرایط استفاده از تجهیزات حفاظت فردی به‌ویژه، شرایط مکانیکی، فیزیکی، شیمیایی، محیطی و فیزیولوژیکی را شبیه‌سازی کنند که نشان‌دهنده تأثیر نفوذ نانو ذرات از طریق غشاهای متخلخل و غیرمتخلخل می‌باشد (۵۲).

از چالش‌های دیگر می‌توان به داده‌های کمی در مورد کارایی تجهیزات حفاظت فردی با برندهای تجاری موجود در برابر نانو ذرات و در شرایط محیط کار اشاره کرد. اطلاعات موجود در مورد تجهیزات حفاظت فردی در برابر نفوذ نانو ذرات به تعداد بسیار کمی از مدل‌ها، نوع و شکل نانو ذرات محدود می‌شود. در مورد حفاظت

۱۵ روز یا بیشتر و پس از اعمال تغییر شکل استاتیک به نمونه‌ها، گزارش نکردند. دستکش‌ها با جنس لاستیک نیتریل، لاتکس، نئوپرن و لاستیک بوتیل در معرض نانو ذرات  $TiO_2$  در آب قرار گرفتند و سپس افزایش غلظت  $Ti$  در محفظه نمونه‌برداری مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. این اثر تا حدی به نفوذ مایع کلونیدی نانو ذرات  $TiO_2$  در الاستومرها نسبت داده شد که با اندازه‌گیری میزان تورم ایجاد شده در دستکش مشخص شد. همچنین در مورد لاستیک بوتیل، افزایش اندک در غلظت  $Ti$  به دلیل مواجهه با نانو ذرات  $TiO_2$  در محلول کلونیدی مشاهده گردد. بعلاوه به دلیل مشکل آلودگی محفظه نمونه‌برداری، هیچ نتیجه‌ای برای نئوپرن گزارش نشد. این نتایج ممکن است نشان‌دهنده نفوذ احتمالی نانو ذرات  $TiO_2$  در محلول‌های کلونیدی از طریق غشاهای الاستومر، در ترکیب با تغییر شکل دینامیکی در دو محور و حتی بدون تغییر شکل باشد (۵۶، ۶۹). در مطالعه Vinches و همکاران (۲۰۱۷)، پنج نوع دستکش نیتریل با ضخامت ۷۳ نانومتر در شرایط شبیه‌سازی واقعی در مواجهه با نانو ذرات طلا (۱۰۰ نانومتر) قرار گرفتند، و تنها نفوذ برای ذرات زیر ۵ نانومتر گزارش شد (۵۷). مطالعه مشابهی توسط Domat و همکاران برای (۲۰۱۷) بررسی نفوذ نانو ذرات  $NaCl$  با قطر ۴۰ نانومتر، در دستکش‌های نیتریل، ونیل، لاتکس، نئوپرن، PVC و بوتیل، در شرایط شبیه‌سازی انجام گرفت. نتایج آن نشان داد که کمترین میزان نفوذ برای دستکش نیتریل (۰/۰۴) و بیشترین میزان برای ونیل (۴/۶۴) بوده است (۲۶).

بصورت کلی می‌توان نتیجه‌گیری نمود، حتی با وجود نتایج اندک به نظر می‌رسد که برخی از لباس‌های محافظ موجود ممکن است محافظت محدودی در برابر نانو ذرات داشته باشند، به‌ویژه زمانی که تحت شرایط مربوط به استفاده از آن‌ها در محیط‌های شغلی قرار گیرند. به عنوان مثال، نفوذ بسیار بالای نانو ذرات از طریق پارچه‌های مختلف در شرایط واقعی گزارش شده است. همچنین هنگامی که تغییر شکل‌های استاتیکی یا دینامیکی روی منسوجات اعمال می‌شود، ممکن است حفاظت کمتری

این موضوع به توسعه تخصص و دانش در زمینه حفاظت در برابر نانو ذرات کمک خواهد کرد. همچنین توسعه یک روش استاندارد برای اندازه‌گیری کارایی تجهیزات حفاظت تنفسی و حفاظت پوستی و مقایسه آن‌ها ضروری است. بعلاوه برای درک مکانیسم‌های موجود در تعامل بین تجهیزات حفاظت فردی و نانو ذرات، باید شرایط تجربی واقعی مربوط به محیط کار در نظر گرفته شود. همچنین، محدودیت‌های مکانیکی و محیطی در طول استفاده از تجهیزات حفاظت فردی، ممکن است بر کارایی حفاظتی آن‌ها در برابر نانو ذرات تأثیر بگذارد. لذا پیشنهاد می‌گردد در مطالعات بعدی، به منظور بهبود ارتقاء خواص تجهیزات حفاظت فردی، جنس تجهیزات، به‌ویژه تجهیزات حفاظت تنفسی بررسی گردد. استفاده از مواد بافته شده و مدیای بهبودیافته برای ساخت فیلترهای تنفسی از این دسته می‌باشند. مورد دیگر به کارگیری فن‌آوری‌های نوین برای لباس‌های ویژه خطرات شیمیایی، بیولوژیکی و رادیولوژیکی در ساخت تجهیزات حفاظت فردی برای کاهش درزها و منافذ بین تجهیزات و سطح پوست می‌باشد. علاوه بر این، تحقیقات آینده باید بر توسعه دستورالعمل‌ها و راهنماهایی برای انتخاب صحیح تجهیزات حفاظتی مناسب در برابر نانو ذرات و فرآیندهای خاص براساس داده‌های علمی تمرکز کند.

## REFERENCES

- Nasirzadeh N, Omari Shekaftik S, Keshavarz Z. Benefits of nanotechnology for occupational ergonomic design: A positive step toward more protection of workers' health. *Hum Factors Ergon Manuf.* 2023;1-9.
- Graczyk H, Lewinski N, Zhao J, Sauvain J-J, Suarez G, Wild P, et al. Increase in oxidative stress levels following welding fume inhalation: a controlled human exposure study. *Part Fibre Toxicol.* 2015;13(1):1-14.
- Iavicoli I, Leso V, Manno M, Schulte PA. Biomarkers of nanomaterial exposure and effect: current status. *J Nanopart Res.* 2014;16(3):2302.
- Govindasamy R, Rahuman AA. Histopathological studies and oxidative stress of synthesized silver nanoparticles in Mozambique tilapia (*Oreochromis*

از چشم نیز اطلاعاتی وجود ندارد (۶۹). همچنین در حال حاضر کاربرد اصل احتیاط به دلیل فقدان دانش در مورد سمیت نانو ذرات به عنوان تنها راه حل می‌باشد، به همین منظور وجود یک راهنمای مناسب برای انتخاب تجهیزات حفاظت فردی در مواجهه با نانو ذرات ضروری است (۷۰).

## نتیجه گیری

پیشرفت‌هایی در زمینه ساخت تجهیزات حفاظت فردی در دسترس است که می‌تواند سطح مناسبی از محافظت در برابر نانو ذرات را فراهم نماید؛ اما شبیه‌سازی شرایط محیط کار از جمله رطوبت تنفسی، سرعت جریان بالای هوا، نانو ذرات پلی دیسپرس و نشستی موجود در سطح مشترک با پوست، نشان می‌دهد که این متغیرها می‌توانند بر راندمان فیلتراسیون نانو ذرات تأثیر بگذارد. همچنین برخی از لباس‌های حفاظتی موجود ممکن است محافظت محدودی در برابر نانو ذرات داشته باشند، به‌ویژه زمانی که تحت شرایط مرتبط با استفاده از آن‌ها در محیط‌های شغلی قرار می‌گیرند. با توجه به یافته‌های بدست آمده پیشنهاد می‌گردد اولویت در پروژه‌های تحقیقاتی آینده به سمت توسعه یک مجموعه آزمایشگاهی برای مشخص کردن کارایی تجهیزات حفاظت تنفسی و پوستی در شرایط آزمایشی مختلف باشد.

*mossambicus*). *J Environ Sci.* 2012;24(6):1091-8.

- Park E-J, Yi J, Chung K-H, Ryu D-Y, Choi J, Park K. Oxidative stress and apoptosis induced by titanium dioxide nanoparticles in cultured BEAS-2B cells. *Toxicol Lett.* 2008;180(3):222-9.
- Park H-G, Yeo M-K. Nanomaterial regulatory policy for human health and environment. *Mol Cell Toxicol.* 2016;12(3):223-36.
- Nasirzadeh N, Azari MR, Rasoulzadeh Y, Mohammadian Y. An assessment of the cytotoxic effects of graphene nanoparticles on the epithelial cells of the human lung. *Toxicol Ind Health.* 2019;35(1):79-87.
- Nasirzadeh N, Rasoulzadeh Y, Rezazadeh Azari M, Mohammadian YJJoCHR. Cellular Toxicity of Multi-walled Carbon Nanotubes on Human Lung Cells. *J*

- Chem Health Risks. 2020;10(2):135-44.
9. Nasirzadeh N, Mohammadian Y, Rasoulzadeh Y, Azari MR, Khodaghali F. Toxicity of Carbon-Based Nanomaterials in the Human Lung: A Comparative In-Vitro Study. *Tanaffos*. 2022;21(3):391.
  10. Labouta HI, El-Khordagui LK, Kraus T, Schneider M. Mechanism and determinants of nanoparticle penetration through human skin. *Nanoscale*. 2011;3(12):4989-99.
  11. 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.
  12. Molyneux MK. Organizing for risk assessment and management. *Occup Health Risk Assess Manag*. 1999:22-37.
  13. Dolez PI, Bodila N, Lara J, Truchon G. Personal protective equipment against nanoparticles. *Int J Nanotechnol*. 2010;7(1):99-117.
  14. Rosenstock L. 42 CFR Part 84: respiratory protective devices implications for tuberculosis protection. *Infect Control Hosp Epidemiol*. 1995;16(9):529-31.
  15. Rengasamy S. Nanoparticle penetration through NIOSH-approved N95 filtering-facepiece respirators. *J Int Soc Respir Prot*. 2007;24:49-59.
  16. Brochot C, Michielsen N, Chazelet S, Thomas D. Measurement of protection factor of respiratory protective devices toward nanoparticles. *Ann Occup Hyg*. 2012;56(5):595-605.
  17. Haghghat F. Development of a procedure to measure the effectiveness of N95 respirator filters against nanoparticles. 2012.
  18. Ostiguy C, Roberge B, Ménard L, Endo C-A. Best practices guide to synthetic nanoparticle risk management. 2009.
  19. Hofacre K, editor *Aerosol penetration of fabric swatches. Elevated Wind Studies International Conference*, Arlington, VA; 2006.
  20. Huang S, Huang Y, Chen C, Chang C, editors. *Nanoparticles penetration through protective clothing materials. 3rd International Symposium on Nanotechnology, Occupational and Environmental Health*; 2007: Taipei Taiwan.
  21. Jaques PA, Hsiao T-C, Gao P. A recirculation aerosol wind tunnel for evaluating aerosol samplers and measuring particle penetration through protective clothing materials. *Ann Occup Hyg*. 2011;55(7):784-96.
  22. Meyer J, Flenghi D, Turpin-Legendre E. Force maximale de préhension: Intérêts, méthode de recueil et valeurs de référence. *Arch Mal Prof*. 2001;62(6):469-76.
  23. Schulte P, Geraci C, Zumwalde R, Hoover M, Kuempel E. Occupational risk management of engineered nanoparticles. *J Occup Environ Hyg*. 2008;5(4):239-49.
  24. Arksey H, O'Malley L. Scoping studies: towards a methodological framework. *Int J Soc Res Methodol*. 2005;8(1):19-32.
  25. Vinches L, Hallé S. Resistance of Type 5 chemical protective clothing against nanometric airborne particles: Behavior of seams and zipper. *J Occup Environ Hyg*. 2017;14(12):939-46
  26. Domat M, Pla J, Cadavid-Rodríguez M, Fito C, editors. *Experimental evaluation of the effectiveness offered by different types of personal protective clothing against nanoaerosols. J Phys Conf Ser*; 2017: IOP Publishing.
  27. Martin Jr SB, Moyer ES. Electrostatic respirator filter media: filter efficiency and most penetrating particle size effects. *Appl Occup Environ Hyg*. 2000;15(8):609-17.
  28. Lewinski N, Colvin V, Drezek R. Cytotoxicity of nanoparticles. *Small*. 2008;4(1):26-49.
  29. Balazy A, Toivola M, Reponen T, Podgórski A, Zimmer A, Grinshpun SA. Manikin-based performance evaluation of N95 filtering-facepiece respirators challenged with nanoparticles. *Ann Occup Hyg*. 2006;50(3):259-69.
  30. Eninger M, Honda T, Adhikari A, Heinonen-Tanski H, Reponen T, Grinshpun SA. Filter performance of N99 and N95 facepiece respirators against viruses and ultrafine particles. *Ann Occup Hyg*. 2008;52(5):385-96.
  31. Eshbaugh JP, Gardner PD, Richardson AW, Hofacre KC. N95 and P100 respirator filter efficiency under high constant and cyclic flow. *J Occup Environ Hyg*. 2008;6(1):52-61.
  32. Rengasamy S, Eimer BC, Shaffer RE. Comparison of nanoparticle filtration performance of NIOSH-approved and CE-marked particulate filtering facepiece respirators. *Ann Occup Hyg*. 2009;53(2):117-28.
  33. Cho H-w, Yoon C-S, Lee J-H, Lee S-j, Viner A, Johnson EW. Comparison of pressure drop and filtration efficiency of particulate respirators using welding fumes and sodium chloride. *Ann Occup Hyg*. 2011;55(6):666-80.
  34. Mostofi R, Noël A, Haghghat F, Bahloul A, Lara

- J, Cloutier Y. Impact of two particle measurement techniques on the determination of N95 class respirator filtration performance against ultrafine particles. *J Hazard Mater.* 2012;217:51-7.
35. Rengasamy S, King WP, Eimer BC, Shaffer RE. Filtration performance of NIOSH-approved N95 and P100 filtering facepiece respirators against 4 to 30 nanometer-size nanoparticles. *J Occup Environ Hyg.* 2008;5(9):556-64.
  36. He X, Yermakov M, Reponen T, McKay RT, James K, Grinshpun SA. Manikin-based performance evaluation of elastomeric respirators against combustion particles. *J Occup Environ Hyg.* 2013;10(4):203-12.
  37. Bahloul A, Mahdavi A, Haghghat F, Ostiguy C. Evaluation of N95 filtering facepiece respirator efficiency with cyclic and constant flows. *J Occup Environ Hyg.* 2014;11(8):499-508.
  38. Vo E, Zhuang Z, Horvatin M, Liu Y, He X, Rengasamy S. Respirator performance against nanoparticles under simulated workplace activities. *Ann Occup Hyg.* 2015;59(8):1012-21.
  39. Rengasamy S, Walbert G, Newcomb W, Coffey C, Wassell JT, Szalajda J. Protection factor for N95 filtering facepiece respirators exposed to laboratory aerosols containing different concentrations of nanoparticles. *Ann Occup Hyg.* 2015;59(3):373-81.
  40. Gao S, Kim J, Yermakov M, Elmashae Y, He X, Reponen T, et al. Penetration of combustion aerosol particles through filters of NIOSH-certified filtering facepiece respirators (FFRs). *J Occup Environ Hyg.* 2015;12(10):678-85.
  41. Zhou Y, Cheng YS. Evaluation of N95 filtering facepiece respirators challenged with engineered nanoparticles. *Aerosol Air Qual Res.* 2016;16(1):212-20.
  42. Ramirez JA, O'Shaughnessy PT. The effect of simulated air conditions on N95 filtering facepiece respirators performance. *J Occup Environ Hyg.* 2016;13(7):491-500.
  43. Lee S-A, Chen Y-L, Hwang D-C, Wu C-C, Chen J-K. Performance evaluation of full facepiece respirators with cartridges. *Aerosol Air Qual Res.* 2017;17(5):1316-28.
  44. Serfozo N, Ondráček J, Otáhal P, Lazaridis M, Ždímal V. Manikin-based size-resolved penetrations of CE-marked filtering facepiece respirators. *J Occup Environ Hyg.* 2017;14(12):965-74.
  45. Adhikari A, Mitra A, Rashidi A, Ekpo I, Schwartz J, Doehling J. Field evaluation of N95 filtering facepiece respirators on construction jobsites for protection against airborne ultrafine particles. *Int J Environ Res Public Health.* 2018;15(9):1958.
  46. Rengasamy S, Zhuang Z, Niezgoda G, Walbert G, Lawrence R, Boutin B, et al. A comparison of total inward leakage measured using sodium chloride (NaCl) and corn oil aerosol methods for air-purifying respirators. *Occup Environ Hyg.* 2018;15(8):616-27.
  47. Zhu J, He X, Guffey S, Wang L, Wang H, Cheng J. Performance comparison of N95 and P100 filtering facepiece respirators with presence of artificial leakage. *Ann Work Expo Health.* 2020;64(2):202-16.
  48. Mitra A, Adhikari A, Martin C, Dardano G, Wagemaker P, Adeoye C. Evaluation of a filtering facepiece respirator and a pleated particulate respirator in filtering ultrafine particles and submicron particles in welding and asphalt plant work environments. *Int J Environ Res Public Health.* 2021;18(12):6437.
  49. International A. Standard Guide for Handling Unbound Engineered Nanoscale Particles in Occupational Settings. 2007.
  50. Golanski L, Guiot A, Rouillon F, Pocachard J, Tardif F. Experimental evaluation of personal protection devices against graphite nanoaerosols: fibrous filter media, masks, protective clothing, and gloves. *Hum Exp Toxicol.* 2009;28(6-7):353-9.
  51. Golanski L, Guiot A, Tardif F. Experimental evaluation of individual protection devices against different types of nanoaerosols: graphite, TiO<sub>2</sub>, and Pt. *J Nanopart Res.* 2010;12(1):83-9.
  52. Park J, Kwak BK, Kim Y, Yi J. Efficiency of protective dermal equipment against silver nanoparticles with water aerosol. *J Nanopart Res.* 2011;13(7):3043-9.
  53. Ben Salah M, Hallé S, Tuduri L. Efficiency of five chemical protective clothing materials against nano and submicron aerosols when submitted to mechanical deformations. *J Occup Environ Hyg.* 2016;13(6):425-33.
  54. Vinches L, Hallé S. Effects of size and morphology of TiO<sub>2</sub> and SiO<sub>2</sub> airborne nanoparticles on their filtration through chemical protective clothing. *J Theor Appl Nanotechnol.* 2018;6.
  55. Dolez P, Vinches L, Wilkinson K, Plamondon P, Vu-Khanh T, editors. Development of a test method for

- protective gloves against nanoparticles in conditions simulating occupational use. *J Phys Conf Ser*; 2011: IOP Publishing.
56. Vinches L, Testori N, Dolez P, Perron G, Wilkinson KJ, Hallé S. Experimental evaluation of the penetration of TiO<sub>2</sub> nanoparticles through protective clothing and gloves under conditions simulating occupational use. *Nanosci Methods*. 2013;2(1):1-15.
57. Vinches L, Zemez M, Hallé S, Peyrot C, Wilkinson KJ, Tufenkji N. An improved experimental methodology to evaluate the effectiveness of protective gloves against nanoparticles in suspension. *J Occup Environ Hyg*. 2017;14(7):D95-D101.
58. Richardson AW, Eshbaugh JP, Hofacre KC, Gardner PD. Respirator filter efficiency testing against particulate and biological aerosols under moderate to high flow rates. Battelle Memorial Institute. Columbus, Ohio; 2006.
59. Janssen L. Principles of physiology and respirator performance. *Occup Health Saf*. 2003;72(6):73-81.
60. Kim CS, Bao L, Okuyama K, Shimada M, Niinuma H. Filtration efficiency of a fibrous filter for nanoparticles. *J Nanopart Res*. 2006;8:215-21.
61. Lara J, Vennes M. Guide pratique de protection respiratoire-2e éd: CSST; IRSST; 2003.
62. Rengasamy S, Eimer BC. Total inward leakage of nanoparticles through filtering facepiece respirators. *Ann Occup Hyg*. 2011;55(3):253-63.
63. Wang H-C, Kasper G. Filtration efficiency of nanometer-size aerosol particles. *J Aerosol Sci*. 1991;22(1):31-41.
64. Huang S-H, Chen C-W, Chang C-P, Lai C-Y, Chen C-C. Penetration of 4.5 nm to 10µm aerosol particles through fibrous filters. *J Aerosol Sci*. 2007;38(7):719-27.
65. Japuntich DA, Franklin LM, Pui DY, Kuehn TH, Kim SC, Viner AS. A comparison of two nano-sized particle air filtration tests in the diameter range of 10 to 400 nanometers. *J Nanopart Res*. 2007;9:93-107.
66. Vinches L, Dolez P, Wilkinson K, Hallé S, editors. Experimental evaluation of the resistance of nitrile rubber protective gloves against TiO<sub>2</sub> nanoparticles in water under conditions simulating occupational use. *J Phys Conf Ser*; 2013: IOP Publishing.
67. Gao P, Jaques PA, Hsiao T-C, Shepherd A, Eimer BC, Yang M, et al. Evaluation of nano- and submicron particle penetration through ten nonwoven fabrics using a wind-driven approach. *J Occup Environ Hyg*. 2011;8(1):13-22.
68. Dolez P, Vinches L, Perron G, Vu-Khanh T, Plamondon P, L'Espérance G, et al. Development of a method of measuring nanoparticle penetration through protective glove materials under conditions simulating workplace use: [policycommons.net](http://policycommons.net); 2013.
69. Harrabi L, Dolez P, Vu-Khanh T, Lara J, editors. Optimization in the selection of protective gloves for resistance to mechanical risks. In 2nd International Conference of Applied Research Textile. 2006; Tunisia: Espace ÉTS.
70. Harrabi L, Dolez P, Vu-Khanh T, Lara J. Optimization in the selection of protective gloves for resistance to mechanical risks. 2006.