

Review Article

# Ergotoxicology as a Novel Approach to Reducing Chemical Exposure Risk in the Workplace: A Narrative Review

Hojatollah Hossainian<sup>1</sup> , Negar Safarpour Khotbesara<sup>2</sup> , Ali Salehi Sahlabadi<sup>3</sup> , Narges Asadi<sup>4</sup> , Zahra Rahimi<sup>5\*</sup> , Mohsen Poursadeghiyan<sup>6,7\*</sup> 

<sup>1</sup> Applied Chemistry Department, Faculty of Gas and Petroleum, Yasouj University, Gachsaran, Iran

<sup>2</sup> Department of Occupational Health and Safety Engineering, School of Public Health and Safety, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran

<sup>3</sup> Safety Promotion and Injury Prevention Research Center, Research Institute for Health Sciences and Environment, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran

<sup>4</sup> School of Pharmacy, Islamic Azad University, Tehran, Iran

<sup>5</sup> Students Research Committee, School of medicine, Ardabil University of Medical Sciences, Ardabil, Iran

<sup>6</sup> Department of Occupational Health Engineering, School of Health, Ardabil University of Medical Sciences, Ardabil, Iran

<sup>7</sup> Social Determinants of Health Research Center, Ardabil University of Medical Sciences, Ardabil, Iran

## Abstract

### Article history:

Received: 21 December 2025

Revised: 09 March 2026

Accepted: 02 June 2026

ePublished: 10 June 2026

\*Corresponding authors: Zahra Rahimi, Students Research Committee, School of medicine, Ardabil University of Medical Sciences, Ardabil, Iran  
E-mail: HojatollahHossainian@gmail.com

Mohsen Poursadeghiyan, Department of Occupational Health Engineering, School of Health, Ardabil University of Medical Sciences, Ardabil, Iran

E-mail: poursadeghiyan@gmail.com

**Background and Objective:** Ergotoxicology overcomes the limitations of traditional industrial toxicology by analyzing the triad of human, chemical, and workplace interactions. Despite the expansion of studies in this field, a comprehensive summary of the applications and new technologies in ergotoxicology for reducing the risk of chemical exposure in the workplace has not yet been presented. Therefore, this study aimed to review, identify, analyze, and synthesize the available evidence on the application of ergotoxicology and related new technologies to reduce chemical exposure in the workplace.

**Materials and Methods:** This narrative review was conducted using a comprehensive search strategy across international databases (PubMed, Scopus, and Web of Science) and Persian databases (SID, Magiran), without performing a statistical meta-analysis, for articles published from 1990 to 2024. The search strategy included a combination of keywords, and articles were selected based on inclusion and exclusion criteria. The extracted data were then categorized and clarified through thematic analysis.

**Results:** Based on studies conducted, the application of ergotoxicology can be stated in four areas, which are: 1. Design of the ergotoxicological workplace: from hazard identification to control, 2. Design of tools and equipment to reduce chemical exposure, 3. Ergonomic evaluation of package transfer systems to reduce chemical contamination in hospitals, and 4. Application of the 5S system in ergotoxicology to reduce chemical exposure.

**Conclusion:** Studies show that reducing exposure to toxic substances is not possible with personal protective equipment alone, and that the use of engineering controls and ergonomic design of processes is essential. This approach leads to reduced chemical exposure, increased safety and productivity across industries, and improved management of hazardous materials in various sectors, including oil and petrochemicals, agriculture, hospitals, and chemical industries.

**Keywords:** Ergotoxicology, Ergonomics, Risk assessment, Toxicology

**Please cite this article as follows:** Hossainian H, Safarpour Khotbesara N, Salehi Sahlabadi A, Asadi N, Rahimi Z, Poursadeghiyan M. Ergotoxicology as a Novel Approach to Reducing Chemical Exposure Risk in the Workplace: A Narrative Review. J Occup Hyg Eng. 2025; 12(3): 258-270. DOI: 10.53208/joohe.12.3.258

مقاله مروری

# ارگوتوکسیکولوژی به عنوان رویکردی نوین برای کاهش خطر مواجهه با مواد شیمیایی در محیط کار: یک مرور روایتی

حجت‌اله حسینیان<sup>۱</sup> ID، نگار صفرپور خطبه‌سرا<sup>۲</sup> ID، علی صالحی سهل‌آبادی<sup>۳</sup> ID، نرگس اسدی<sup>۴</sup> ID، زهرا رحیمی<sup>۵</sup> ID\*، محسن پورصادقیان<sup>۶</sup> ID\*

۱. گروه شیمی کاربردی، دانشکده نفت و گاز گچساران، دانشگاه یاسوج، گچساران، ایران
۲. گروه مهندسی بهداشت حرفه ای و ایمنی کار، دانشکده بهداشت و ایمنی، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران
۳. مرکز تحقیقات ارتقای ایمنی و پیشگیری از مصدومیت‌ها، پژوهشکده علوم بهداشتی و محیط زیست، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران
۴. دانشکده داروسازی دانشگاه آزاد، تهران، ایران
۵. کمیته تحقیقات دانشجویی، دانشکده پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی اردبیل، اردبیل، ایران
۶. مرکز تحقیقات عوامل اجتماعی موثر بر سلامت، دانشگاه علوم پزشکی اردبیل، اردبیل، ایران
۷. گروه مهندسی بهداشت حرفه ای و ایمنی کار، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی اردبیل، اردبیل، ایران

## چکیده

**سابقه و هدف:** ارگوتوکسیکولوژی با تحلیل تعامل انسان، ماده شیمیایی و محیط کار، محدودیت‌های رویکرد سنتی سم‌شناسی صنعتی را برطرف می‌کند. باوجود گسترش مطالعات در این زمینه، هنوز جمع‌بندی جامعی از کاربردها و فناوری‌های نوین ارگوتوکسیکولوژی در کاهش ریسک مواجهه با مواد شیمیایی در محیط کار ارائه نشده است. بنابراین، هدف این مطالعه مرور روایتی، شناسایی، تحلیل و تلفیق شواهد موجود در زمینه کاربرد ارگوتوکسیکولوژی و فناوری‌های نوین مرتبط با آن در کاهش مواجهه با مواد شیمیایی در محیط کار است.

**مواد و روش‌ها:** این مطالعه مروری روایتی با استفاده از استراتژی جستجوی جامع در پایگاه‌های اطلاعاتی بین‌المللی (Scopus، PubMed، Web of Science) و پایگاه‌های اطلاعاتی فارسی (Magiran، SID) و بدون انجام متاآنالیز آماری برای مقالات منتشر شده از سال ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۴ انجام شد. استراتژی جستجو شامل ترکیبی از کلمات کلیدی بود و مقالات براساس معیارهای ورود و خروج انتخاب شدند. سپس داده‌های استخراج شده از طریق تحلیل موضوعی طبقه‌بندی و شفاف‌سازی شدند.

**یافته‌ها:** براساس مطالعات انجام‌شده، کاربرد ارگوتوکسیکولوژی را می‌توان در چهار زمینه عنوان کرد که عبارت‌اند از: ۱. طراحی محیط کار ارگوتوکسیکولوژیک: از شناسایی خطر تا کنترل، ۲. طراحی ابزارها و تجهیزات برای کاهش تماس با مواد شیمیایی، ۳. ارزیابی ارگونومیک سیستم‌های انتقال بسته برای کاهش بار آلودگی شیمیایی در بیمارستان‌ها، ۴. کاربرد سیستم ۵S در ارگوتوکسیکولوژی برای کاهش مواجهه با مواد شیمیایی.

**نتیجه‌گیری:** مطالعات نشان می‌دهد که کاهش مواجهه با مواد سمی فقط با تجهیزات حفاظت فردی ممکن نیست و استفاده از کنترل‌های مهندسی و طراحی ارگونومیک فرایندها ضروری است. این رویکرد به کاهش مواجهه شیمیایی، افزایش ایمنی و بهره‌وری در صنایع و نیز بهبود مدیریت مواد خطرناک در بخش‌های مختلف، ازجمله صنایع نفت و پتروشیمی، کشاورزی، بیمارستان‌ها و صنایع شیمیایی، منجر می‌شود.

**واژگان کلیدی:** ارگوتوکسیکولوژی، سم‌شناسی، ارزیابی ریسک، ارگونومی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۹/۳۰

تاریخ ویرایش مقاله: ۱۴۰۴/۱۲/۱۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۵/۰۳/۱۲

تاریخ انتشار مقاله: ۱۴۰۵/۰۳/۲۰

تمامی حقوق نشر برای دانشگاه علوم پزشکی همدان محفوظ است.

\* نویسنده مسئول: زهرا رحیمی، کمیته تحقیقات دانشجویی، دانشکده پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی اردبیل، ایران

ایمیل: zrahimi772@gmail.com

محسن پورصادقیان، گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی اردبیل، اردبیل، ایران

ایمیل: poursadeghiyan@gmail.com

**استناد:** حسینیان، حجت‌اله؛ صفرپور خطبه‌سرا، نگار؛ صالحی سهل‌آبادی، علی؛ اسدی، نرگس؛ رحیمی، زهرا؛ پورصادقیان، محسن. ارگوتوکسیکولوژی به عنوان رویکردی نوین برای کاهش خطر مواجهه با مواد شیمیایی در محیط کار: یک مرور روایتی. مجله مهندسی بهداشت حرفه‌ای، پاییز ۱۴۰۴؛ ۱۲(۳): ۲۷۰-۲۵۸

## مقدمه

حوزه مطالعه سم‌شناسی صنعتی، مواد سمی موجود در محیط کار است که در قالب ارزیابی سمیت، تعیین ریسک و

شیمیایی در محیط کار ارائه می‌دهد شامل حسگرهای پوشیدنی، پایش و مدل‌سازی کامپیوتری و هوش مصنوعی و فناوری‌های جایگزینی و اصلاح فرایند است [۱۶]. با نگاهی به مطالعات گذشته مشخص است که بررسی کمی در زمینه مثال‌ها، کاربردها و فناوری‌های نوین ارگوتوکسیکولوژی در کاهش ریسک مواجهه با مواد شیمیایی در محیط کار انجام شده و ضروری است مطالعه‌ای در زمینه جمع‌آوری مثال‌ها، کاربردها و فناوری‌های نوین ارگوتوکسیکولوژی در کاهش ریسک مواجهه با مواد شیمیایی در محیط کار انجام شود. به همین منظور، با توجه به پراکندگی این موضوعات، این مطالعه برای پوشش جامع مباحث نام‌برده، به جمع‌بندی آن‌ها پرداخته است.

### روش کار

طراحی مطالعه و استراتژی جست‌وجو این مطالعه به‌صورت مرور روایتی (Narrative Review) در سال ۲۰۲۵ انجام می‌شود تا به‌صورت جامع، شواهد موجود درباره کاربرد ارگوتوکسیکولوژی را در فناوری‌های نوین در کاهش ریسک مواجهه با مواد شیمیایی در محیط کار در آینده تحلیل و تلفیق کند. فرایند جست‌وجوی مقالات با پوشش بازه زمانی ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۵ بررسی شد. جست‌وجو به‌صورت جامع و گسترده و بدون متاآنالیز آماری در پایگاه‌های داده‌های بین‌المللی معتبر شامل Web, Wiley, Scopus, PubMed, of Science و ScienceDirect انجام شد. برای اطمینان از پوشش کامل، از موتور جست‌وجوی Google Scholar نیز به‌عنوان ابزار مکمل استفاده شد. علاوه بر این، برای شناسایی مطالعات فارسی‌زبان، پایگاه‌های داده‌های داخلی (Scientific Information Database) SID و Magiran نیز جست‌وجو شدند.

استراتژی جست‌وجو براساس ترکیبی از کلمات کلیدی اصلی و مترادف‌های آن‌ها با استفاده از عملگرهای بولی (AND, OR) طراحی شد. برای پایگاه‌های بین‌المللی از کلمات کلیدی انگلیسی «ارگوتوکسیکولوژی، فناوری‌های نوین، فناوری‌های پوشیدنی، مدیریت ریسک شیمیایی، ایمنی شیمیایی» استفاده شد. با استفاده از معادل‌های فارسی این کلمات کلیدی در پایگاه‌های داده‌های داخلی، جست‌وجوی مشابهی اجرا شد. فرایند انتخاب مقالات و معیارهای ورود و خروج تمام مقالات شناسایی شده پس از جست‌وجو به نرم‌افزار مدیریت مراجع EndNote (Version 2025) منتقل شدند و مقالات تکراری به‌صورت خودکار و دستی حذف شدند. فرایند

طراحی اقدامات ایمنی بررسی می‌شود [۱]. سمیت و ریسک مواد شیمیایی دو مفهوم جدا از هم هستند؛ سمیت توانایی ذاتی یک ماده در ایجاد اثر زیان‌آور در اندام و ریسک احتمال اثر سمی یک ماده هنگام استفاده است [۲، ۳]. باوجود پیشرفت‌های سم‌شناسی در درک چگونگی اثر و جذب مواد سمی، این علم برای تشخیص فوری خطرهای در ایستگاه‌های کاری، به‌تنهایی کافی نیست [۴، ۵]. همچنین، نادیده گرفتن نقش فعال کارگر و تمرکز صرف بر عوامل فیزیکی باعث ایجاد شکاف بین ارزیابی علمی سموم و درک کارگران از خطر می‌شود [۶، ۷]. به همین منظور، باید به‌دنبال راهکارهای مؤثرتر بود.

ارگوتوکسیکولوژی (Ecotoxicology) به‌عنوان درک خطر مواد شیمیایی در موقعیت‌های کاری پیچیده عنوان می‌شود، به‌طوری که عوامل مرتبط با کار را از لحاظ ارگونومی، برای پیشگیری ریسک ترکیبات سمی در محیط کار آنالیز می‌کند [۸]. هرچند ارگوتوکسیکولوژی نمی‌تواند جایگزین علم مطالعه سموم شود، به پیشگیری یا کاهش ریسک‌های موجود منجر می‌شود. امروزه، محققان زیادی هم‌زمان با سنجش مواد شیمیایی در هوای محیط کار یا مایعات بیولوژیک و انجام تحقیقات اپیدمیولوژیک، به تجزیه ارگونومیکی کار علاقه‌مندند [۹]. ارگوتوکسیکولوژی صرفاً ترکیب ساده سم‌شناسی و ارگونومی نیست، بلکه فرایندی عملیاتی است که با تحلیل فعالیت‌های کاری، خطرهای شیمیایی کارگران را ارزیابی می‌کند، راهکارهای پیشگیرانه ارائه می‌دهد و به درک چگونگی تأثیر مواجهه شغلی با مواد سمی در کارگر می‌پردازد [۱۰، ۱۱].

نتایج حاصل از مطالعات حاکی از آن است که بررسی دقیق مواجهه، ریسک مواد سمی را کاهش می‌دهد و آنالیز فعالیت با اصلاحات زیرساختی و تجهیزاتی باعث تحول در سازمان کار و انعطاف‌پذیری بیشتر مدیریت ریسک ناشی از محصول و کارگران خواهد شد [۱۲، ۱۳]. در مدل ارگوتوکسیکولوژی، میزان و مواجهه با استفاده از روش‌های سنتی و استراتژی‌ها و بررسی دقیق تجزیه و تحلیل می‌شود و کارگران قادر به توصیف ریسک و شناسایی اهداف پیشگیری هستند؛ به‌طوری که از بررسی مشاهده‌ای، اطلاعات جدول و مصاحبه با مدیران و سرکارگران استفاده می‌شود [۱۴]. ارگوتوکسیکولوژی با رویکردی یکپارچه، تنها به میزان سمیت ماده توجه ندارد، بلکه تعامل سه‌گانه انسان، ماده شیمیایی و محیط کار را به‌دقت تحلیل می‌کند [۱۵]. فناوری‌های نوینی که ارگوتوکسیکولوژی در جهت کاهش ریسک مواجهه با مواد

غربالگری مقالات در دو مرحله انجام شد:

۱. بررسی اولیه: دو نویسنده به‌طور مستقل عنوان و چکیده تمام مقالات باقی‌مانده را بررسی کردند تا مرتبط‌بودن آن‌ها با هدف مطالعه مشخص شود؛

۲. بررسی متن کامل: متن کامل مقالاتی که در مرحله اولیه واجد شرایط شناخته شدند، به‌طور دقیق بررسی شد.

معیارهای ورود (*Inclusion Criteria*) عبارت بودند از: مقالات اصلی یا مروری که به زبان انگلیسی یا فارسی منتشر شده بودند؛ مطالعاتی که به تعامل و تقابل بین عوامل ارگونومیک (وضعیت بدن، طراحی ابزار، حرکات تکراری، خستگی) و مواجهه با مواد شیمیایی خطرناک پرداخته بودند؛ مطالعاتی که راهکارهای کنترل یکپارچه (هم‌زمان برای خطرهای ارگونومیک و شیمیایی) مانند اتوماسیون، طراحی مجدد ایستگاه کار یا آموزش ترکیبی را ارائه داده بودند؛ مطالعاتی که طراحی ارگونومیک تجهیزات (مانند ماسک‌های تنفسی، ابزار دستی، حسگرهای پوشیدنی، سیستم‌های انتقال بسته) را با هدف کاهش مواجهه شیمیایی بررسی کرده بودند؛ مطالعاتی که سیستم‌های مدیریتی مانند ۵S را در چهارچوب کنترل مواجهه با مواد شیمیایی و بهبود ایمنی ارگونومیک ارزیابی کرده بودند.

معیارهای خروج (*Exclusion Criteria*) عبارت بودند از: مطالعاتی که فقط خطرهای ارگونومیک (مانند درد اسکلتی - عضلانی) را، بدون در نظر گرفتن عامل شیمیایی، بررسی کرده بودند؛ مطالعاتی که فقط مواجهه شیمیایی یا سم‌شناسی مواد را اندازه‌گیری کرده بودند، بدون بررسی تأثیر فاکتورهای ارگونومیک (وضعیت بدن، طراحی کار، خستگی) در میزان یا جذب آن مواجهه؛ مطالعات بدون زمینه شغلی؛ خلاصه کنفرانس‌ها، مقالات بدون متن کامل، یا نامه به سردبیر؛ مطالعاتی که به زبانی غیر از فارسی یا انگلیسی منتشر شده بودند.

با توجه به ماهیت روایتی مطالعه، داده‌های استخراج‌شده از مقالات منتخب با استفاده از رویکرد تحلیل موضوعی (*Thematic Analysis*) طبقه‌بندی، ترکیب و به‌صورت روایتی گزارش شدند. به‌دلیل تنوع روش‌شناسی مطالعات اولیه و هدف مطالعه، که سنتر مفاهیم و کاربردها بود، از انجام متاآنالیز آماری خودداری شد. مدیریت و دسته‌بندی این داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار *Microsoft Excel* انجام شد. در نهایت، براساس مطالعات انجام‌شده، کاربرد ارگوتوکسیکولوژی را می‌توان در چهار زمینه عنوان کرد که عبارت‌اند از: ۱. طراحی محیط کار ارگوتوکسیکولوژیک: از شناسایی خطر تا کنترل، ۲. طراحی ابزارها و تجهیزات برای کاهش تماس با

مواد شیمیایی، ۳. ارزیابی ارگونومیک سیستم‌های انتقال بسته برای کاهش بار آلودگی شیمیایی در بیمارستان‌ها، ۴. کاربرد سیستم ۵S در ارگوتوکسیکولوژی برای کاهش مواجهه با مواد شیمیایی.

## یافته‌ها

### ۱. طراحی محیط کار ارگوتوکسیکولوژیک: از شناسایی خطر تا کنترل

#### ۱.۱ طراحی محیط کار ارگوتوکسیکولوژیک (شناسایی خطر)

در طراحی محیط کار ارگوتوکسیکولوژیک، مرحله شناسایی خطر بر درک تعامل خطرهای ارگونومیک و شیمیایی تمرکز دارد [۱۷]. این فرایند تنها به شناسایی جداگانه عوامل مانند وضعیت‌های بدنی نامناسب، حرکات تکراری یا وجود بخارات سمی بسنده نکرده است، بلکه به‌طور ویژه به چگونگی تأثیرگذاری این عوامل در یکدیگر می‌پردازد. یک وضعیت بدنی خمیده ناشی از طراحی نامناسب ایستگاه کار نه‌تنها نوعی خطر ارگونومیک است، بلکه می‌تواند منطقه تنفسی کارگر را مستقیماً در مسیر بخارات سنگین منتشرشده از یک منبع شیمیایی قرار دهد و میزان مواجهه و جذب مواد سمی را به‌شکل چشمگیری افزایش دهد [۱۸]. نتایج مطالعه *Kermit G. Davis* و همکاران در سال ۲۰۲۲، با عنوان «تأثیر وضعیت ارگونومیک بر میزان مواجهه کارگران با مواد شیمیایی در صنایع نفت و شیمی»، نشان داد موقعیت منطقه تنفسی با وضعیت قرارگیری و قد کارگر تغییر می‌کند [۱۹].

#### ۱.۲ طراحی محیط کار ارگوتوکسیکولوژیک (کنترل خطر)

##### ۱.۲.۱ کنترل‌های اداری یکپارچه خطر

کنترل‌های اداری یکپارچه با تغییر نحوه انجام کار مواجهه را مدیریت می‌کنند. یکی از روش‌های تغییر نحوه انجام کار آموزش است؛ آموزش کارگران نه‌تنها درباره خطرهای مواد شیمیایی و استفاده از تجهیزات حفاظت فردی، بلکه درباره تأثیر وضعیت بدن در مواجهه شیمیایی (مانند اصل پشت به باد در سمپاشی توسط کشاورزان) و تکنیک‌های ارگونومیک صحیح است [۲۰]. یکی دیگر از روش‌های کنترل خطر، جابه‌جایی کارگران بین وظایفی است که در معرض مواد شیمیایی و فشارهای ارگونومیک متفاوتی هستند تا از تجمع مواجهه و آسیب‌های ناشی از حرکات تکراری کاسته شود. همچنین برنامه‌ریزی زمان‌های استراحت برای کاهش

را تا ۵۰ درصد یا بیشتر کاهش دهد [۳۲، ۳۳]. در این زمینه، پیشرفت فناوری اسکن سه‌بعدی و پرینت سه‌بعدی افق تازه‌ای در شخصی‌سازی این تجهیزات ایجاد کرده است. استفاده از داده‌های اسکن سه‌بعدی از صورت انسان امکان طراحی ماسک‌های نیم‌صورت با تطابق بیشتر (۸۸/۷-۴/۸ درصد) با آناتومی صورت را فراهم کرده است و این بهبود در نواحی حساسی مانند ریشه بینی، کناره‌های بینی، گونه و چانه به کاهش نفوذپذیری آلاینده‌ها منجر می‌شود [۲۲]. همچنین، این رویکرد در طیف وسیعی از تجهیزات حفاظت تنفسی، از جمله ریسپراتورهای تصفیه‌کننده هوا (APR) نظیر ماسک‌های ذره‌دار N95 و FFP2 [۳۴] و ماسک‌های نیم‌صورت دارای کارتریج برای حذف گازها و بخارات شیمیایی کاربرد دارد [۳۵]. با این حال، اعمال این فناوری برای تمامی انواع ریسپراتورها به یک میزان امکان‌پذیر یا ضروری نیست، به‌طوری که در ماسک‌های مخصوص فرار اضطراری (Escape Respirators)، که معمولاً به‌صورت هودهای سرتاسری طراحی می‌شوند و ناحیه گردن یا شانه‌ها را می‌پوشانند، پیچیدگی‌های طراحی سه‌بعدی برای تطابق با جزئیات آناتومی صورت، در مقایسه با ماسک‌های تمام‌صورت، اولویت کمتری دارد و شاخصه‌هایی مانند سرعت پوشیدن و پوشش کامل سر در اولویت قرار دارد [۲۶]. از این رو، اگرچه تلفیق اصول ارگونومی با داده‌های آنترپومتریک پیشرفته برای اکثر ریسپراتورها، از جمله انواع نیم‌صورت و تمام‌صورت راهکار مؤثری در جهت بستن راه‌های نشت و کاهش مواجهه سیستمیک با مواد شیمیایی و تست‌های مکرر فیت‌تست محسوب می‌شود، نحوه و میزان کاربرد آن باید متناسب با نوع ماسک، شرایط مواجهه و الزامات عملکردی هر تجهیز باشد. بنابراین، سرمایه‌گذاری در طراحی ارگونومیک، در واقع سرمایه‌گذاری در اثربخشی کل سیستم حفاظتی و در نهایت، سلامت نیروی کار است. این رویکرد به‌وضوح نشان می‌دهد که تلفیق اصول ارگونومی در طراحی ماسک‌ها چگونه می‌تواند به‌عنوان راهکار مؤثر در کنترل مواجهه با مواد شیمیایی در چهارچوب ارگونوسیکولوژی عمل کند.

## ۲.۲ طراحی ابزارهای دستی با ارگونومی بهتر

طراحی ارگونومیک ابزارهای دستی با هدف قراردادن سه محور اصلی کاهش تماس مستقیم با مواد شیمیایی، بهینه‌سازی فرایندهای کاری و بهبود شرایط کاری برای کاربر، به‌طور مؤثری سطح ایمنی شیمیایی را در محیط کار ارتقا می‌بخشد [۳۷]. طراحی ارگونومیک دسته ابزارها با سطوح

خستگی عضلانی (خطر ارگونومیک) و کاهش مدت‌زمان مواجهه کلی با مواد شیمیایی می‌تواند مؤثر باشد [۲۱].

## ۱.۲.۲ تجهیزات حفاظت فردی (PPE)

تجهیزات حفاظت فردی به‌عنوان آخرین خط دفاعی برای کنترل و حذف خطرهای کار گرفته می‌شوند. در این میان، استفاده از ماسک‌های تنفسی، که علاوه بر تأمین سطح حفاظت مناسب در برابر مواد شیمیایی خاص، طراحی ارگونومیکی دارند، تأثیر بسزایی در ارتقای تطابق (فیت) ماسک با صورت کاربر دارند [۲۲]. چنین ماسک‌هایی ضمن ایجاد حفاظت لازم، مانع دید طبیعی، تنفس راحت و ارتباط کلامی مؤثر نمی‌شوند و در نتیجه، کارایی حفاظتی آن‌ها به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد [۲۳]. طراحی ارگونومیک لباس‌های حفاظتی با استفاده از لباس‌هایی که علاوه بر ایجاد سد محافظ در برابر مواد شیمیایی، از جنسی ساخته شده‌اند که محدودیت حرکتی کمتری ایجاد و از گرم‌زدگی (استرس حرارتی) جلوگیری می‌کنند، از دیگر عوامل تأثیرگذار است [۲۴، ۲۵]. Cristiano و Matos همکاران در سال ۲۰۲۵ مطالعه‌ای با عنوان «آثار ارگونومی و تجهیزات حفاظت فردی در سلامت متخصصان شیمی درمانی» انجام دادند؛ نتایج نشان داد استفاده از تجهیزات حفاظت فردی، که هماهنگی لازم را با اصول ارگونومی ندارد، به ایجاد مشکل و خطر منجر می‌شود [۲۶].

## ۲. طراحی ارگونومیک ابزارها و تجهیزات برای کاهش تماس با مواد شیمیایی

### ۲.۱ طراحی ماسک‌های تنفسی با ارگونومی بهتر

ماسک‌های تنفسی اولین خط دفاعی در برابر مواجهه با مواد شیمیایی خطرناک در محیط‌های صنعتی و کشاورزی هستند و نقش اصلی آن‌ها ایجاد سد فیزیکی در مسیر دستگاه تنفسی است تا از ورود ذرات مضر، گازها و بخارات شیمیایی به ریه‌ها جلوگیری کنند [۲۷-۲۹]. علاوه بر محیط‌های صنعتی و کشاورزی، استفاده از ماسک‌های مناسب همانند ماسک‌های تهویه غیرتهاجمی (NIV) در محیط‌های بیمارستانی به‌عنوان راهکار کلیدی در حوزه ارگونوسیکولوژی مطرح شده است، به‌طوری که طراحی آن‌ها با در نظرگیری اصول ارگونومی، در کاهش مواجهه با آلاینده‌ها و تنفس مناسب در بیماران نقش مؤثری ایفا می‌کند [۳۰، ۳۱]. تحقیقات متعدد نشان داده‌اند که صرف‌نظر از کارایی فیلتر، نشت آلاینده از نواحی اطراف ماسک به‌دلیل تطابق نداشتن با آناتومی صورت، می‌تواند اثربخشی محافظتی

ضد لغزش و متناسب با آناتومی دست، از رهاشدن یا لغزش ابزار در حین کار با مواد خطرناک جلوگیری می‌کند. همچنین، کاهش خستگی کاربر از طریق توزیع مناسب وزن و طراحی تعادلی ابزار، به دقت عملیاتی بیشتر و کاهش خطاهای انسانی منجر می‌شود که خود یکی از عوامل اصلی بروز آلودگی‌های شیمیایی است [۳۸]. علاوه بر این، طراحی سطوح صاف و غیرمتمخلخل در ابزارها امکان شست‌شو و ضد عفونی مؤثر را فراهم و از انتقال آلودگی به دیگر مناطق جلوگیری می‌کند. این ویژگی‌ها در کنار هم نه تنها ایمنی فردی کاربر را افزایش می‌دهند، بلکه با جلوگیری از انتشار آلاینده‌ها به حفظ پاکیزگی محیط کار و کاهش مواجهه جمعی کمک شایانی می‌کنند [۳۹].

طراحی ارگونومیک ابزارهای سمپاشی در کاهش مواجهه کشاورزان با آفت‌کش‌ها نقش تعیین‌کننده‌ای دارد؛ به‌طوری که هم‌زمان با افزایش بهره‌وری، موجب کاهش تماس مستقیم کاربران با مواد سمی می‌شود [۴۰]. سمپاش‌های پشتی با طراحی نوین با توزیع متعادل وزن و دسته‌های ضد لغزش، نه تنها خستگی کاربر را کاهش می‌دهند، بلکه با جلوگیری از نشت و پاشش، تماس پوستی با سموم را به حداقل می‌رسانند. همچنین، سیستم‌های هوشمند مانند سمپاش‌های مجهز به حسگر نشت و قطع اتوماتیک و طراحی نازل‌های قابل تنظیم از پراکندگی غیرعمدی مواد شیمیایی جلوگیری می‌کنند [۴۱]. بنابراین، رویکرد ارگوتوکسیکولوژی با تلفیق سم‌شناسی و ارگونومی در مرحله طراحی ابزارهای دستی با کاهش مواجهه و افزایش دقت در کاربرد سموم، باعث حفظ سلامت شاغلان، افزایش بهره‌وری و پایداری محیطی می‌شود.

## ۲.۳ طراحی حسگرهای پوشیدنی و مانیتورهای هشداردهنده

طراحی ارگونومیک حسگرهای پوشیدنی برای پایش عوامل شیمیایی تحولی اساسی در حوزه ارگوتوکسیکولوژی است. این فناوری با یکپارچه‌سازی حسگرهای پیشرفته در تجهیزات کاری، مانند دستکش‌ها و لباس‌های محافظ، امکان نظارت بلادرنگ و کیفی بر مواجهه با مواد شیمیایی را فراهم می‌کند [۴۲، ۴۳]. Peng-fei Guo و همکاران در سال ۲۰۲۱ مطالعه‌ای با عنوان «بررسی مواجهه شخصی با مواد شیمیایی در چین با استفاده از دستگاه‌های پوشیدنی پایش آلودگی هوا؛ مطالعه‌ای با اندازه‌گیری مکرر در بزرگ‌سالان در جینان، چین» انجام دادند. در این مطالعه، امکان سنجی توصیف وقوع و میزان مواجهه شخصی با آلاینده‌های شیمیایی موجود در هوا با استفاده از نمونه‌گیرهای میج‌بند غیرفعال نشان داده شد

[۴۴]. در بخش کشاورزی، دستکش‌های مجهز به حسگر هنگام سمپاشی نشت سموم را تشخیص می‌دهند و از تماس پوستی جلوگیری می‌کنند [۴۵]. بنابراین، یکپارچه‌سازی این حسگرها با سایر تجهیزات امکان پایش جامع‌تر را فراهم می‌کند و چنین سیستم‌های پایشی می‌توانند به‌عنوان سیستم‌های هشدار اولیه عمل و از مواجهه‌های خطرناک با مواد شیمیایی جلوگیری کنند. این رویکرد پیشگیرانه نه تنها ایمنی شغلی را افزایش می‌دهد، بلکه با جمع‌آوری داده‌های دقیق از مواجهه‌های شیمیایی به طراحی محیط کار ایمن‌تر کمک می‌کند. در نهایت، توسعه این فناوری‌ها مسیر را برای ایجاد محیط‌های کاری سالم‌تر و کاهش بیماری‌های ناشی از مواجهه با مواد شیمیایی هموار می‌کند.

## ۳. ارزیابی ارگونومیک سیستم‌های انتقال بسته برای کاهش بار آلودگی شیمیایی در بیمارستان‌ها

سیستم‌های انتقال بسته (Closed System Drug Transfer Device) فناوری‌های مکانیزمی هستند که برای جلوگیری از فرار داروهای خطرناک به محیط طراحی شده‌اند و اساس کار آن‌ها ایجاد مسیر انتقال بسته و محافظت‌شده بین ویال دارو، سرنگ و کیسه تزریق داخل وریدی است [۴۶]. این سیستم‌ها معمولاً از مکانیسم‌های فیزیکی مانند سوزن‌های دولبه محافظت‌شده، مهروموم‌های مکانیکی یا محفظه‌های دارای فیلتر استفاده می‌کنند تا از تماس پرسنل با بخارات، آئروسول‌ها یا قطرات دارو جلوگیری کنند [۴۷]. سیستم‌های انتقال بسته (CSTDs) به‌عنوان راهکار ارگونومیک و مهندسی کنترل مؤثر، در کاهش بار آلودگی شیمیایی داروهای خطرناک، به‌ویژه داروهای ضدسرطان، نقش بسزایی در محیط‌های بیمارستانی ایفا می‌کنند [۴۸].

مزیت ارگونومیک این سیستم‌ها در طراحی آن‌ها نهفته است که از خروج آئروسول‌ها، بخارات یا ذرات دارو به محیط جلوگیری می‌کنند. این موضوع نه تنها ایمنی دارو را افزایش می‌دهد، بلکه با حذف نیاز به فعالیت‌های اضافی برای پاک‌سازی سطوح، بار کاری پرسنل را نیز کاهش می‌دهد. مطالعات متعدد اثربخشی این سیستم‌ها را در کاهش مواجهه شغلی تأیید کرده‌اند، به‌طوری که B.S. Pharm و همکاران در سال ۲۰۱۸ مطالعه‌ای با عنوان «ارزیابی چندمرکزی یک دستگاه جدید انتقال دارو با سیستم بسته در کاهش آلودگی سطحی توسط داروهای خطرناک ضدنئوپلاستیک» انجام دادند [۴۹]. نتایج نشان داد که دستگاه انتقال دارو با سیستم بسته، آلودگی سطحی توسط سیکلو فسفامید و فلوروراسیل

و روش *Seiketsu* (مرحله چهارم) با استانداردسازی روش‌ها، رفتارهای ایمن را نهادینه می‌کند. در نهایت، *Shitsuke* با ایجاد فرهنگ انضباط فردی و جمعی، تضمین می‌کند که این کنترل‌ها به‌صورت پایدار ادامه می‌یابد. در نتیجه ۵۰٪ با کاهش مواجهه در مبدأ، مسیر و فرد، به ابزاری پیشگیرانه و مؤثر برای کاهش بیماری‌های ناشی از سموم صنعتی تبدیل می‌شود [۵۴]. به‌طور خلاصه، ۵۰٪ چهارچوب عملیاتی قدرتمند برای اجرای مؤثر اصول ارگوتوکسیکولوژی است و این سیستم از حذف فیزیکی خطرهای *Seiri* شروع می‌شود و به کنترل مهندسی و اداری (*Seiketsu, Seiso, Seiton*) می‌رسد و در نهایت، به تقویت فرهنگ ایمنی (*Shitsuke*) منجر می‌شود. پیاده‌سازی ۵۰٪ به معنای ایجاد محیطی است که در آن امکان مواجهه با سموم به حداقل ممکن می‌رسد [۵۵]. *Martin Collao-Diaz* و همکاران در سال ۲۰۲۲ مطالعه‌ای با عنوان «مدل مدیریت ایمنی مبتنی بر استانداردسازی فرایندها و ۵۰٪ برای کاهش میزان مسمومیت در شرکت‌های کوچک و متوسط در بخش مواد شیمیایی» انجام دادند. نتایج نشان داد که تلفیق استانداردسازی فرایندها (*Seiketsu*) با کل سیستم ۵۰٪ مدل نظری یک راهکار اجرایی اثربخش برای دستیابی به هدف اصلی ارگوتوکسیکولوژی، به ویژه در شرکت‌های کوچک و متوسط است [۵۱]. خلاصه‌ای از مطالعات کلیدی که این یافته‌ها را تأیید می‌کنند، در جدول ۱ ارائه شده است.

را در طول ترکیب و تجویز شبیه‌سازی شده کاهش می‌دهد. استقرار این سیستم‌ها در چهارچوب یک برنامه جامع، مانند تمرکزسازی فعالیت‌های پرخطر مانند پرایمینگ لوله‌های IV در داروخانه، می‌تواند به‌طور هم‌زمان آلودگی در بخش‌های دیگر، مانند اتاق‌های بیمار را، نیز بدون افزایش بار آلودگی در داروخانه کاهش دهد [۵۰].

#### ۴. کاربرد سیستم ۵۰٪ در ارگوتوکسیکولوژی

سیستم ۵۰٪ و ارگوتوکسیکولوژی در محیط کار ارتباطی تنگاتنگ و اساسی دارند. می‌توان ۵۰٪ را به‌عنوان زیرساخت عملیاتی قدرتمندی برای تحقق اهداف ارگوتوکسیکولوژی دانست [۵۱]. این سیستم با ایجاد نظم، پاکیزگی و استانداردسازی در محیط کار، به‌طور مستقیم در سه محور اصلی ارگوتوکسیکولوژی (شناسایی، ارزیابی و کنترل) برای مواجهه با مواد شیمیایی خطرناک مؤثر است [۵۲]. مرحله *Seiri*، که اولین مرحله روش ۵۰٪ است، با حذف مواد غیرضروری، منبع آلودگی را از بین می‌برد که اولین و مؤثرترین قدم در کنترل مواجهه (حذف در مبدأ) است و حجم مواد خطرناکی را که به مدیریت نیاز دارند کاهش می‌دهد. در مرحله بعدی (*Seiton*)، با مرتب‌سازی ایمن از نشت یا تماس تصادفی جلوگیری می‌کند [۵۳]. روش *Seiso*، که مرحله سوم است، با پاکسازی مستمر، آلاینده‌ها را از محیط حذف می‌کند

جدول ۱. نتایج مطالعه تجربی، مروری و در زمینه کاربرد ارگوتوکسیکولوژی در فناوری‌های نوین در کاهش ریسک مواجهه با مواد شیمیایی در محیط کار

| شماره | نویسنده اول و سال مطالعه          | عنوان مطالعه                                                                                                             | حوزه کاربرد                                              | جامعه مورد مطالعه                   | یافته کلیدی                                                                                                                                                                                      | رفرنس |
|-------|-----------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| ۱     | Carson Whitehead و همکاران (۲۰۲۲) | تأثیر وضعیت ارگونومیک بر مواجهه کارگران با مواد شیمیایی در صنایع نفت و شیمی                                              | طراحی محیط کار ارگوتوکسیکولوژیک: از شناسایی خطر تا کنترل | دو مانکن (شبیه‌ساز انسانی)          | وضعیت بدنی و اندازه بدن کارگر به‌طور مستقیم موقعیت منطقه تنفسی را تغییر می‌دهد و در نتیجه، میزان مواجهه با مواد شیمیایی را بسته به چگالی گاز و ارتفاع منبع انتشار، به‌شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. | [۱۹]  |
| ۲     | Alain Garrigou و همکاران (۲۰۰۸)   | سهم ارگونومی در پیشگیری از خطرهای شیمیایی: بررسی ارگوتوکسیکولوژیکی اثربخشی پوشش سرهمی در برابر خطر آفات گیاهی در تاکداری | طراحی محیط کار ارگوتوکسیکولوژیک: از شناسایی خطر تا کنترل | تعداد نمونه در مطالعه ذکر نشده است. | یک راه‌حل به‌ظاهر فنی و استاندارد (PPE) می‌تواند به‌دلیل بی‌توجهی به تعامل بین ویژگی‌های ماده شیمیایی، خواص تجهیزات محافظ و واقعیات فعالیت کاری انسان، نه تنها بی‌اثر، که خطرناک نیز باشد.       | [۲۰]  |
| ۳     | Nathalie Judon و                  | سهم ارگونومی مشارکتی                                                                                                     | طراحی محیط کار                                           | تعداد نمونه                         | استفاده از ارگونومی مشارکتی و                                                                                                                                                                    | [۲۱]  |

|    |                                    |                                                                                                                                                            |                                                                                      |                                     |                                                                                                                                                                                                                             |
|----|------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|    | همکاران (۲۰۱۸)                     | در مشارکت کارگران در پروژه‌های پیشگیری از خطرات مواد شیمیایی                                                                                               | ارگوتوکسیکولوژیک: از شناسایی خطر تا کنترل                                            | در مطالعه ذکر نشده است.             | تبدیل کارگران از دریافت‌کنندگان منفعل دستورالعمل به شرکای فعال در فرایند پیشگیری، مؤثرترین راهکارهای کنترل هم‌زمان خطرهای شیمیایی و ارگونومیک است.                                                                          |
| ۴  | Ana Reis و همکاران (۲۰۲۳)          | آثار ارگونومی و تجهیزات حفاظت فردی در سلامت متخصصان شیمی درمانی                                                                                            | طراحی محیط کار ارگوتوکسیکولوژیک: از شناسایی خطر تا کنترل                             | ۱۹ مطالعه بررسی شده است.            | طراحی ضعیف ایستگاه کاری (ارگونومی) و تجهیزات حفاظت فردی می‌تواند دقت و ایمنی در کار با مواد شیمیایی را کاهش و خطر مواجهه را افزایش دهد.                                                                                     |
| ۵  | Xin Cui و همکاران (۲۰۲۲)           | ارگونومی و شخصی‌سازی ماسک‌های تهویه غیرتهاجمی                                                                                                              | طراحی ارگونومیک ابزارها و تجهیزات برای کاهش تماس با مواد شیمیایی                     | ۹۳ مطالعه بررسی شده است.            | تناسب ضعیف ماسک (مشکل ارگونومیک) در محیط‌های درمانی می‌تواند باعث پخش آئروسول‌های حاوی عوامل عفونی یا شیمیایی در هوا شود و خطر مواجهه برای بیمار و پرسنل را افزایش دهد.                                                     |
| ۶  | Shailesh Malonde و همکاران (۲۰۱۶)  | طراحی و ساخت دستگاه سمپاشی چندمنظوره آفت‌کش‌ها                                                                                                             | طراحی ارگونومیک ابزارها و تجهیزات برای کاهش تماس با مواد شیمیایی                     | تعداد نمونه در مطالعه ذکر نشده است. | طراحی سم‌پاش پیشرفته با حذف تماس مستقیم کاربر با مخزن سم و کاهش پاشش غیرهدفمند، مواجهه افراد با مواد شیمیایی را به‌طور چشمگیری کاهش می‌دهد و از خطرهای سلامتی می‌کاهد.                                                      |
| ۷  | Peng-fei Guo و همکاران (۲۰۱۹)      | بررسی مواجهه شخصی با مواد شیمیایی در چین با استفاده از مانیتورهای آلاینده هوای پوشیدنی: یک مطالعه با اندازه‌گیری مکرر در بزرگ‌سالان مسن سالم در جینان، چین | طراحی ارگونومیک ابزارها و تجهیزات برای کاهش تماس با مواد شیمیایی                     | ۸۴ نفر                              | عوامل ارگونومیک (چه در سطح طراحی ابزار پایش و چه در سطح محیط و رفتار کاربر) می‌توانند صحت، دقت و کیفیت داده‌های مواجهه شیمیایی را تحت‌تأثیر قرار دهند.                                                                      |
| ۸  | Haibin Liu و همکاران (۲۰۲۵)        | حسگرهای پوشیدنی برای نظارت بر مواجهه با مواد شیمیایی در محیط کار در مدیریت بهداشت حرفه‌ای                                                                  | طراحی ارگونومیک ابزارها و تجهیزات برای کاهش تماس با مواد شیمیایی                     | تعداد نمونه در مطالعه ذکر نشده است. | حسگرهای پوشیدنی شیمیایی پتانسیل زیادی در پایش هم‌زمان مواجهه شیمیایی و عوامل ارگونومیک دارند.                                                                                                                               |
| ۹  | Annie Guillemette و همکاران (۲۰۱۴) | تأثیر و ارزیابی دو روش با هدف کاهش آلودگی محیطی داروهای خطرناک: متمرکز کردن پرایمینگ لوله‌های IV در داروخانه                                               | ارزیابی ارگونومیک سیستم‌های انتقال بسته برای کاهش بار آلودگی شیمیایی در بیمارستان‌ها | ۲۲۵ نمونه سطحی                      | اگرچه تمرکز عملیات پرایمینگ در داروسازی آلودگی شیمیایی برای پرستاران را کاهش داد، نوع جدیدی از مواجهه ترکیبی (فشار ارگونومیک - شیمیایی) ایجاد کرد که لزوم ارزیابی هم‌زمان این دو عامل در مداخلات کنترل خطر را آشکار می‌کند. |
| ۱۰ | Gonzalo Lamas-Salazar و همکاران    | مدل مدیریت ایمنی مبتنی بر استانداردسازی                                                                                                                    | کاربرد سیستم ۵S در                                                                   | تعداد نمونه در مطالعه               | استفاده از ۵S نه تنها باعث کاهش مواجهه شیمیایی                                                                                                                                                                              |

|                                                                                    |                 |               |                                                                                                                                                                                  |
|------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|---------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| فرایندها و S5 برای کاهش میزان مسمومیت در شرکت‌های کوچک و متوسط در بخش مواد شیمیایی | ارگوتوکسیکولوژی | ذکر نشده است. | (مسمومیت) در کارگران صنایع شیمیایی می‌شود، بلکه از طریق بهبود نظم فضای کاری، کاهش زمان جست‌وجوی ابزار و افزایش بهره‌وری، بار ارگونومیکی و استرس شغلی کارکنان را نیز کاهش می‌دهد. |
|------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|---------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

## بحث

مطالعه حاضر با هدف کاربرد ارگوتوکسیکولوژی در فناوری‌های نوین در کاهش ریسک مواجهه با مواد شیمیایی در محیط کار انجام شد. باوجود محدودیت مقالات مستقیم با کلیدواژه ارگوتوکسیکولوژی، تعداد قابل توجهی از مطالعات به‌صورت غیرمستقیم به کاربرد این علم و فناوری‌های نوین آن در کاهش ریسک مواجهه با مواد شیمیایی در محیط کار می‌پردازند. در زمینه روش‌های انجام کار برای کاهش مواجهه با مواد سمی با رویکرد ارگوتوکسیکولوژی، مطالعات در خارج از کشور در مقایسه با مطالعات داخلی بسیار بیشتر است، به‌طوری که در مطالعات خارجی به حذف و جایگزینی خطر در منبع، کنترل‌های مهندسی و اداری و تجهیزات حفاظت فردی با رویکرد ارگونومی اشاره شده است [۹، ۲۰، ۵۶]. بنابراین، مهم‌ترین یافته این مطالعه تغییر نگرش از رویکردهای سنتی مبتنی بر تجهیزات حفاظت فردی (PPE) به سوی راهکارهای سیستماتیک و مهندسی است.

مطالعات موردی خارجی به‌وضوح نشان می‌دهند که تمرکز صرف بر تجهیزات حفاظت فردی استراتژی‌ای شکست‌خورده است؛ چراکه این تجهیزات اغلب به‌دلیل رعایت نکردن ارگونومی، ایجاد ناراحتی و تداخل با فعالیت کاری، به‌طور کامل یا صحیح استفاده نمی‌شوند. در مقابل، راه‌حل پایدار، که در مقالات بر آن تأکید شده، تغییر در روش‌های کار و محیط کار از طریق حذف و جایگزینی خطر در منبع، کنترل‌های مهندسی و طراحی ارگونومیک است. این تغییر نگرش، هسته اصلی رویکرد ارگوتوکسیکولوژی را تشکیل می‌دهد که در آن، به‌جای مقابله با پیامد مواجهه، به‌گونه‌ای به طراحی سیستم کار پرداخته می‌شود که امکان مواجهه از اساس کاهش یابد.

از دیدگاه ارگوتوکسیکولوژی، انتخاب رسیپراتور و ماسک با طراحی مناسب برای افراد با ویژگی‌های آناتومیک متفاوت صورت اهمیت ویژه‌ای دارد، به‌طوری که تحقیقات نشان می‌دهند تطابق نامناسب رسیپراتور با صورت، حتی در صورت استفاده از فیلترهای با بازدهی زیاد، به افت شدید کارایی

## محافظتی منجر می‌شود [۵۷].

همچنین، استفاده از داده‌های آنترپومتریکی و مدل‌های سه‌بعدی صورت در طراحی و انتخاب رسیپراتورها می‌تواند تطابق اولیه بهتری فراهم آورد و نیاز به تست‌های مکرر تطابق را کاهش دهد، به‌طوری که نه‌تنها باعث کاهش با ترکیبات سمی می‌شود، بلکه با حذف فرایندهای آزمون‌ها، کارایی برنامه‌های حفاظتی را نیز افزایش می‌دهد [۵۸]. Mhamdi و همکاران در سال ۲۰۱۲ مطالعه‌ای با عنوان «بررسی ارگونومیک در وضعیت مواجهه هم‌زمان با حلال‌ها و سروصدا در چاپ بسته‌بندی» انجام داده بودند که از روش‌های کیفی، شامل مشاهده مستقیم، مصاحبه‌های عمیق و تحلیل رفتار واقعی کارگران استفاده نظام‌مند شده است. در این مطالعه، رویکرد کیفی، داده‌های کمی مانند اندازه‌گیری غلظت حلال‌ها و سطح صدا در بافت واقعی کار تفسیر شده و مطالعه با تلفیق این روش‌ها، به درکی جامع از تعامل عوامل فنی، انسانی و سازمانی در ایجاد خطرهای شغلی دست یافته است [۵۹]. این یافته‌ها بر این نکته کلیدی تأکید دارند که کنترل مؤثر خطرهای شیمیایی نیازمند عبور از راهکارهای جزیره‌ای و اتخاذ نگرش سیستمی است. تمرکز صرف بر تجهیزات حفاظت فردی، بدون در نظر گرفتن عوامل زمینه‌ای مانند فشار تولید، طراحی ایستگاه کار و فرهنگ سازمانی، محکوم به شکست است و رویکرد ارگوتوکسیکولوژی با روشن کردن مکانیسم‌های تعاملی، که به مواجهه می‌منجر شوند، زمینه را برای طراحی مداخلات پایدار در سطح منبع خطر فراهم می‌کند.

نتایج حاصل از مطالعات مختلف حاکی از آن است که شرایط ارگونومیک ضعیف، ازجمله پوسچرهای غیرطبیعی [۶۰، ۶۱]، طراحی نامناسب ایستگاه کاری، محیط‌های گرم و پرسروصدا [۶۲] و فرایندهای کاری غیراستاندارد [۵۱]، می‌توانند به‌طور مستقیم احتمال و شدت مواجهه با مواد شیمیایی خطرناک را افزایش دهند. این موضوع از طریق مکانیسم‌هایی همچون افزایش نرخ تبخیر مواد، افزایش جذب پوستی، افزایش زمان مواجهه و تشویق به استفاده نکردن از وسایل حفاظت فردی به‌دلیل ناراحتی رخ می‌دهد. از این

منظر، مداخلات ارگونومیک، مانند بازطراحی ایستگاه‌های کار، استانداردسازی فرایندها و اجرای برنامه‌های استراحت، نه تنها برای پیشگیری از اختلالات اسکلتی عضلانی، بلکه به عنوان نوعی راهبرد کنترلی مؤثر در سلسله مراتب کنترل برای کاهش ریسک‌های سم‌شناختی عمل می‌کنند.

مطالعه *Badea DO* و همکاران در سال ۲۰۲۴ پیشنهاد داد در نظر گرفتن هر دو بعد ارگونومی و سم‌شناسی به طور هم‌زمان برای درک کامل طیف خطرهای و تدوین راهکارهای پیشگیرانه جامع در صنایع، به ویژه در بنگاه‌های کوچک و متوسط، ضروری است. این تحلیل نشان می‌دهد که این دو حوزه نه تنها مرتبط، بلکه جدایی ناپذیرند و رویکردی یکپارچه برای مدیریت آن‌ها ضروری است [۶۳]. یکی از حوزه‌هایی که ارگونومی و سم‌شناسی با هم تلاقی یافته‌اند، طراحی دستگاه‌های پوشیدنی و سیار برای پایش گازهای خطرناک است. همان‌طور که مطالعات مختلف اشاره کرده‌اند [۶۴-۶۶]، این دستگاه‌ها نه تنها باید از نظر حساسیت و دقت فنی قابل اعتماد باشند، بلکه باید از نظر وزنی، اندازه، عمر باتری و سهولت استفاده نیز با نیازهای کاربران سازگاری داشته باشند. ادغام این دو حوزه می‌تواند به توسعه سیستم‌های هوشمند پایش مواجهه منجر شود که هم از جنبه پیشگیری از مسمومیت و هم از جنبه ارگونومیکی قابل قبول هستند.

شایان ذکر است مطالعات یافت‌شده بیشتر بر جنبه‌های فنی متمرکزند و ارزیابی سیستماتیک معیارهای ارگونومیکی (رضایت کاربر، سهولت استفاده، تداخل با فعالیت‌های روزمره) به طور جامع انجام نشده است. نبود مطالعات طولی مدت روی پذیرش کاربر در جمعیت‌های مختلف (سالمندان، بیماران، کارگران) و فقدان چهارچوب استاندارد برای ارزیابی ارگونومی دستگاه‌های پوشیدنی محیط، مطالعات بیشتر را در این زمینه الزامی می‌کند. علاوه بر پایشگرهای پوشیدنی، ارگونومی و سم‌شناسی در طراحی تجهیزات ایمنی، مانند سم‌پاش‌های کشاورزی، دخالت دارند؛ طراحی سم‌پاش‌های کشاورزی نقطه تلاقی مهمی بین ارگونومی (محافظت از کاربر) و سم‌شناسی (کاربرد ایمن سموم) است [۶۷، ۴۰]. دستگاه‌های جدید با حذف بار فیزیکی، کاهش مواجهه مستقیم با سموم و بهبود یکنواختی پاشش، گام مهمی در جهت کشاورزی پایدار و سلامت شغلی کشاورزان برداشته‌اند.

با توجه به مطالعات انجام‌شده، می‌توان دریافت که ارگونومی و سم‌شناسی دو روی یک سکه هستند و طراحی ارگونومیک مناسب مواجهه کاربر با مواد سمی را به حداقل می‌رساند [۶۸، ۴۱، ۳۸]. نکته جالب این است که بهبود شرایط فیزیکی کار (مانند حذف کوله‌پشتی سمپاش) نه تنها خستگی را کاهش

می‌دهد، بلکه احتمال انتقال آلودگی را نیز کم می‌کند. همچنین، مطالعات نشان می‌دهند پاشش ذرات سمی تا فاصله بیش از ۷ متر گسترش می‌یابد که بر اهمیت طراحی فضای کار تأکید دارد. در نهایت، بهترین راهکار، ادغام کنترل‌های مهندسی و ارگونومی قبل از استفاده از تجهیزات حفاظت فردی است. با این حال، هنوز چالش‌هایی چون وابستگی به شرایط محیطی، یکنواختی پاشش و هزینه‌ها باقی است که به پژوهش‌های آینده در حوزه‌های مهندسی، سم‌شناسی و ارگونومی نیاز دارد. نتایج حاصل از مطالعات حاکی از آن است که ارگونومی در میزان مواجهه با آلاینده‌های شیمیایی و سم‌شناسی نقش بسیار مهمی دارد [۵۰-۴۸]. طراحی ارگونومیک ضعیف به نشت و پاشش دارو منجر می‌شود و مواجهه با مواد سمی را افزایش می‌دهد. همچنین، سیستم‌های بسته با طراحی ارگونومیک مناسب باعث پذیرش بهتر توسط کاربر و کاهش خطا می‌شوند و در نتیجه، آلودگی سطوح و مواجهه کاهش می‌یابد. مشکلات ارگونومیک مانند تعادل فشار نامناسب یا ایجاد ذرات، مستقیماً غلظت محیطی داروهای خطرناک را افزایش می‌دهد و برای پرسنل ریسک مواجهه ایجاد می‌کند. ارگونومی بهینه از طریق کاهش مدت مواجهه، پیشگیری از خطا و افزایش پیروی از پروتکل‌ها، در کاهش بار مواجهه با آلاینده‌ها در محیط کار نقش مستقیم دارد.

### نتیجه گیری

ادغام دانش ارگونومی (به ویژه ارگونومی شناختی و فیزیکی) با سم‌شناسی شغلی در قالب رویکرد ارگوتوکسیکولوژی، نه تنها انتخاب، بلکه برای ایجاد محیط‌های کاری سالم و ایمن ضروری است. حرکت به سمت پیشگیری در منبع از طریق طراحی ارگونومیک، به کارگیری فناوری‌های نوین پایش و مشارکت دادن کارگران، کلید کاهش مواجهه با مواد شیمیایی و حفظ سلامت شاغلان در بلندمدت است. فواید دیدگاه مقالات مختلف در زمینه ارگوتوکسیکولوژی به ارائه راهکارهایی برای کاهش مواجهه کارگران با مواد شیمیایی، حوادث و افزایش بهره‌وری و ایمنی در صنایع منجر می‌شود. همچنین، در بیمارستان‌ها باعث افزایش مدیریت مواد ضد عفونی کننده و داروهای خطرناک می‌شود.

### تشکر و قدردانی

از کمیته تحقیقات دانشجویی دانشگاه علوم پزشکی اردبیل که به این تحقیق کمک کردند، کمال تشکر و امتنان را داریم.

### تضاد منافع

هیچ تضاد منافی گزارش نشد.

کمیته تحقیقات دانشجویی دانشگاه علوم پزشکی اردبیل  
با کد ۴۰۴۰۰۰۹۳۵ از این مطالعه حمایت مالی کرده است.

این پژوهش از نوع مروری روایتی است و تأییدیه کمیته

اخلاق دانشگاه علوم پزشکی اردبیل را اخذ کرده است.

### سهم نویسندگان

تمام نویسندگان در مطالعه اولیه، تعیین موضوع، اجرای فرایندها، تحلیل داده‌ها، نگارش مقاله و گزارش نهایی مشارکت کرده‌اند.

## REFERENCES

- Harbison RD, Bourgeois MM, Johnson GT. Hamilton and hardy's industrial toxicology. John Wiley & Sons; 2015. DOI:10.1002/9781118834015
- Singh AV, Bhardwaj P, Laux P, Pradeep P, Busse M, Luch A, et al. AI and ML-based risk assessment of chemicals: predicting carcinogenic risk from chemical-induced genomic instability. *Front Toxicol*. ۲۰۲۴;۶:۱۴۶۱۵۸۷. PMID: 39659701 DOI: 10.3389/ftox.2024.1461587
- Kraus N, Malmfors T, Slovic P. Intuitive toxicology: expert and lay judgments of chemical risks. *Risk Anal*. ۱۹۹۲;۱۲(۲):۲۱۵-۳۲. DOI: 10.1111/j.1539-6924.1992.tb00669.x
- Cumbo F, Dhillon K, Joshi J, Raubenolt B, Chicco D, Aygun S, et al. Predicting the toxicity of chemical compounds via hyperdimensional computing. *BioRxiv*. 2025. DOI:10.1101/2025.09.12.675894
- Askari A, Poursadeghiyan M, Alinia A, Sephvand A, Jafarzadeh E, Nasl-Saraji G, et al. Workplace risk factors assessment in North-Azadegan oil field based on harmful agents risk priority index (HARPI). *Iran J Public Health*. ۲۰۲۳;۵۲(۱۰):۲۱۵۷-۶۸. PMID: 37899937 DOI: 10.18502/ijph.v52i10.13854
- MacGregor DG, Fleming R. Risk perception and symptom reporting. *Risk Anal*. 1996;16(6):773-83. PMID: 8972109 DOI: 10.1111/j.1539-6924.1996.tb00828.x
- Askari A, Poursadeghiyan M, Sahl Abadi AS, Mahdinasab L, Farhadi AR. Semi-quantitative risk assessment for workers exposed to occupational harmful agents in an oilfield in Iran. *Work*. 2023;76(1):147-57. PMID: 36872822 DOI: 10.3233/WOR-220077
- Mohammed-Brahim B. Ergotoxicological approach to the prevention of carcinogenic risk in the work environment. In: ETUI (European Trade Union Institute), editor. Cancer and work: understanding occupational cancers and taking action to eliminate them. Brussels: ETUI; 2015. p. 105-۱۳. Link
- Garrigou A, Jackson Filho JM, Simonelli AP. Coping with exposure to toxic substances at work: the utopia of ergotoxicology according to Alain Garrigou. *Rev Bras Saúde Ocup*. 2025;50:e14. DOI:10.1590/2317-6369/25424en2025v50e14
- Garrigou A, Baldi I, Dubuc P. Contribution of ergotoxicology to the determination of actual PPE effectiveness in protecting users from phytosanitary risks. From contamination analysis to the collective whistle-blowing process. *PISTES*. 2008;10-1. DOI:10.4000/pistes.2156
- Yarmohammadi H, Hamidvand E, Abdollahzadeh D, Sohrabi Y, Poursadeghiyan M, Biglari H, et al. Measuring concentration of welding fumes in respiratory zones of welders: An ergo-toxicological approach. *Res J Med Sci*. ۲۰۱۶;۱۰(۳):۱۱۱-۵. Link
- Gulma KA. Health system strategies to reduce global impacts of toxic substance exposure. *Acad Med*. 2025;2(1). DOI:10.20935/AcadMed7562
- Barkhordari A, Poorabadian S, Khoobi J, Karchan M. The study of changes in the serial peak flowmetry test in the workers of car painting workshops in Isfahan. *SJKU*. 2011;15(4):73-80. Link
- Üngüren E, Tekin ÖA. The relationship between workplace toxicity, stress, physical activity and emotional eating. *Int J Occup Saf Ergon*. 2024;30(1):215-23. PMID: 38012073 DOI: 10.1080/10803548.2023.2288779
- Chizallet M, Lafeuillade A-C, Le Guen E, Peña-Jimenez M, Prunier-Poulmaire S, Lemaire C, et al. Developing safe and sustainable work activities in the industries of the future in metal additive manufacturing. A literature review of methods and proposals. *Appl Ergon*. 2025;129:104591. PMID: 40633340 DOI: 10.1016/j.apergo.2025.104591
- Shah IA, Mishra S. Artificial intelligence in advancing occupational health and safety: an encapsulation of developments. *J Occup Health*. 2024;66(1):uiad017. PMID: 38334203 DOI: 10.1093/joccuh/uiad017
- Agarwalla S, Singh SK, Ibrahim MA, Duraiswamy S. Safety management: hazard identification and risk assessment at the workplace. In book: Chemical Engineering Essentials 2. 2025;247-76. DOI:10.1002/9781394372379.ch11
- Smiri M. Ergonomics of workstations and analysis of the risks and diseases associated with occupational poisoning. *Polish J Environ Stud*. 2023;32(4). DOI:10.15244/pjoes/159428
- Whitehead C, Maier MA, Rao MB, Erturki M, Snawder JE, Davis KG. Impact of ergonomic posture on the chemical exposure of workers in the petroleum and chemical industry. *Ann Work Expo Health*. 2022;66(8):1022-32. PMID: 35552627 DOI: 10.1093/annweh/wxac033
- Garrigou A, Baldi I, Le Frius P, Anselm R, Vallier M. Ergonomics contribution to chemical risks prevention: an ergotoxicological investigation of the effectiveness of coverall against plant pest risk in viticulture. *Appl Ergon*. ۲۰۱۱;۴۲(۲):۲۲۱-۳۰. PMID: 20833388 DOI: 10.1016/j.apergo.2010.08.001
- Judon N, Galey L, de Almeida VS-D, Garrigou A. Contributions of participatory ergonomics to the involvement of workers in chemical risk prevention projects. *Work*. 2019;64(3):651-60. PMID: 31658077 DOI: 10.3233/WOR-193001
- Lee W, Jung D, Park S, Kim H, You H. Development of a virtual fit analysis method for an ergonomic design of pilot oxygen mask. *Appl Sci*. 2021;11(12):5332. DOI:10.3390/app11125332
- Arora S, Majumdar A. Face masks to fight against COVID-19 pandemics: a comprehensive review of materials, design, technology and product development. *J Ind Text*. ۲۰۲۲;۵۱(۳\_suppl):۲۶۱۳S-۴۷S. PMID: 38603152 DOI: 10.1177/15280837211069869
- Dorman LE, Havenith G. The effects of protective clothing and its properties on energy consumption during different activities: literature review. Loughborough University; 2007. Link
- Bhuiyan MR, Wang L, Shaid A, Shanks RA, Ding J. Advances and applications of chemical protective clothing system. *J Ind Text*. 49(1):1528083718779426. DOI:10.1177/1528083718779426
- Reis A, Silva V, Joaquim JJ, Valadares L, Matos C, Valeiro C, et al. Health effects of ergonomics and personal protective equipment on chemotherapy professionals. *Curr Oncol*. 2025;32(10):563. PMID: 41149483 DOI: 10.3390/curroncol32100563
- Yasmeen R, Hafeez F. Occupational exposure of the emissions on the respiratory system of the workers belonging to different industries. *Arch Resp Res*. ۲۰۲۳;۲(۱). Link
- Smaellie EK. Recommendations for addressing barriers to respirator fit testing among farmers and agricultural workers. Thesis. The University of Iowa; 2023. Link
- Gibbs JL, Sheridan CE, Duysen E, Danielson E, Tutor R, Anthony TR. Organization of community-based respirator

- fit testing programs for agricultural workers. *Workplace Health Saf.* 2026;**74**(2):89–97. [PMID: 41378699](#) [DOI: 10.1177/21650799251388480](#)
۳۰. Cui X, Jung H, Lee W, Kim SH, Yun R-Y, Kim S-Y, et al. Ergonomics and personalization of noninvasive ventilation masks. *Resp Care.* 2022;**67**(1):87–101. [DOI:10.4187/respcare.08959](#)
۳۱. Kim S. Ergonomics in medical equipment development and system design. *Int J Innov Res Comput Sci Tech.* 2017;**5**(1):181-3. [DOI: 10.21276/ijrcst.2017.5.1.1](#)
۳۲. Yu M. Predicting fit of filtering facepiece respirators through new face anthropometry and 3D face shape acquisition. Dissertation. University of Minnesota; 2024. [Link](#)
۳۳. Knobloch J, Franke G, Knobloch M, Knobling B, Kampf G. Overview of tight fit and infection prevention benefits of respirators (filtering face pieces). *J Hosp Infect.* ۲۰۲۳;**۱۳۴**:۸۹–۹۶. [PMID: 36738992](#) [DOI: 10.1016/j.jhin.2023.01.009](#)
۳۴. Yu M, Griffin L, Durfee WK, Arnold S. Face anthropometry for filtering facepiece respirators: analysis of the association between facial dimensions and respirator fit. *Ann Work Expo Health.* 2024;**68**(3):312–24. [PMID: 38366891](#) [DOI: 10.1093/annweh/wxae005](#)
۳۵. Tjolleng A, Chang J, Park J, Jung K. Designing the shape of a nose clip for a half-face mask using 3D anthropometric face analysis. *Int J Ind Eng Theory Appl Pract.* 2023;**30**(1). DOI: [0.23055/ijietap.2023.30.1.8273](#)
۳۶. Szymendera SD. Occupational safety and health administration (OSHA): emergency temporary standards (ETS) and COVID-19. 2022. [Link](#)
۳۷. Yadav A. Ergonomic assessment methods: tools and techniques for evaluating ergonomic factors in workplaces and recommending improvements. In: Gandotra V, Oberoi K, Sharma P, Yadav A, editors. *Essentials of ergonomics*. New Delhi: Dominant Publishers and Distributors; 2023. p. 73. [Link](#)
۳۸. Ofstead CL, Hopkins KM, Daniels FE, Smart AG, Wetzler HP. Splash generation and droplet dispersal in a well-designed, centralized high-level disinfection unit. *Am J Infect Control.* 2022;**50**(11):1200–7. [PMID: 36244924](#) [DOI: 10.1016/j.ajic.2022.08.016](#)
۳۹. Rawlinson S. The science of cleaning and decontamination. Thesis (Doctoral). UCL (University College London); 2022. [Link](#)
۴۰. Malonde S, Kathwate S, Kolhe P, Jacob R, Ingle N, Khorgade RD. Design and development of multipurpose pesticides spraying machine. *J Adv Eng Glob Tech.* 2016;**4**(3):1945-53. [Link](#)
۴۱. Rakibuzzaman MD, Islam A, Al-Amin M, Mahfujur M, Khan R, Rahman M. Design and fabrication of an agricultural spraying machine using a knapsack sprayer. *IUBAT Rev.* 2023;**6**(1):88-99. [DOI:10.3329/iubatr.v6i1.67234](#)
۴۲. Suryawanshia S, Bhosale D, Vishwakarma S, Patila K, Harwania V, Bhosalec A. A comprehensive survey on smart wearables: real-time health and workplace monitoring, alerting, and analysis in the industrial context. *Int J Eng.* 2024;**37**(12):2473-80. [DOI: 10.5829/ije.2024.37.12c.05](#)
۴۳. Liu H, Wang Z, Zhou G. Wearable sensors for monitoring workplace chemical exposures in occupational health management. *Anal Methods.* 2025;**17**(39):7863–89. [DOI:10.1039/D5AY00961H](#)
۴۴. Guo P, Lin EZ, Koelmel JP, Ding E, Gao Y, Deng F, et al. Exploring personal chemical exposures in China with wearable air pollutant monitors: A repeated-measure study in healthy older adults in Jinan, China. *Environ Int.* ۲۰۲۱;**۱۵۶**:۱۰۶۷۰۹. [PMID: 34153889](#) [DOI: 10.1016/j.envint.2021.106709](#)
۴۵. Raymundo-Pereira PA, Gomes NO, Shimizu FM, Machado SA, Oliveira Jr ON. Selective and sensitive multiplexed detection of pesticides in food samples using wearable, flexible glove-embedded non-enzymatic sensors. *Chem Eng J.* 2021;**408**:127279. [DOI: 10.1016/j.cej.2020.127279](#)
۴۶. Sreedhara A, Zamiri C, Goswami S, Weiser S, Cram M, Christian TR, et al. Challenges of using closed system transfer devices with biological drug products: an industry perspective. *J Pharm Sci.* 2020;**109**(1):22–9. [PMID: 31697946](#) [DOI: 10.1016/j.xphs.2019.10.042](#)
۴۷. Paci MM, Saha T, Djassemi O, Wu S, Chua CYX, Wang J, et al. Smart closed-loop drug delivery systems. *Nat Rev Bioeng.* 2025;**3**(10):816-34. [DOI:10.1038/s44222-025-00328-z](#)
۴۸. Pérez-Minayo MF, Bazán EC, Segurado MH, Moya MÁAM, Torres PP, Martínez FJB. Use of closed systems in the Hospital Pharmacy. *Farm Hosp.* 2016;**40**(2):102–۱۰. [PMID: 26980168](#) [DOI: 10.7399/fh.2016.40.2.9994](#)
۴۹. Bartel SB, Tyler TG, Power LA. Multicenter evaluation of a new closed system drug-transfer device in reducing surface contamination by antineoplastic hazardous drugs. *Am J Health Syst Pharm.* 2018;**75**(4):199–211. [PMID: 29339374](#) [DOI: 10.2146/ajhp160948](#)
۵۰. Guillemette A, Langlois H, Voisine M, Merger D, Therrien R, Mercier G, et al. Impact and appreciation of two methods aiming at reducing hazardous drug environmental contamination: the centralization of the priming of IV tubing in the pharmacy and use of a closed-system transfer device. *J Oncol Pharm Pract.* ۲۰۱۴;**۲۰**(۶):۴۲۶–۳۲. [PMID: 24395542](#) [DOI: 10.1177/1078155213517127](#)
۵۱. Gonzalo Ricardo Lamas-Salazar, Darisa Pezo-Huamán, Martín Collao-Díaz, Juan Quiroz-Flores, Alberto Flores-Perez. Safety management model based on the standardization of processes and 5S to reduce the rate of intoxication in SMEs in the chemical sector. 9th International Conference on Industrial Engineering and Applications, Sanya, China. 2022, p. 303-11. [Link](#)
۵۲. olniak R, Grebski W. The usage of 5 why in Industry 4.0 conditions. *Zesz Nauk Politech Śl Organ Zarz.* ۲۰۲۳;(۱۸۹):۷۳۵–۴۵. [DOI: 10.29119/1641-3466.2023.189.46](#)
۵۳. Jiménez M, Romero L, Domínguez M, del Mar Espinosa M. 5S methodology implementation in the laboratories of an industrial engineering university school. *Saf Sci.* ۲۰۱۵;**۷۸**:۱۶۳–۷۲. [DOI:10.1016/j.ssci.2015.04.022](#)
۵۴. Kanabar B, Piparva KG, Pandya D, Kanabar RB, Piparva K, Kanabar R. The impact and challenges of the implementation of 5S methodology in healthcare settings: a systematic review. *Cureus.* 2024;**16**(7):e64634. [PMID: 39149689](#) [DOI: 10.7759/cureus.64634](#)
۵۵. Randhawa JS, Ahuja IS. 5S implementation methodologies: literature review and directions. *Int J Prod Qual Manag.* 2017;**20**(1):48–74. [DOI:10.1504/IJPMQ.2017.080692](#)
۵۶. Ross JA, Shipp EM, Trueblood AB, Bhattacharya A. Ergonomics and beyond: understanding how chemical and heat exposures and physical exertions at work affect functional ability, injury, and long-term health. *Hum Factors.* 2016;**58**(5):777–95. [PMID: 27125533](#) [DOI: 10.1177/0018720816664547](#)
۵۷. Santandrea A, Chazelet S. Respiratory protective device: one size to fit them all? *J Occup Environ Hyg.* 2023;**20**(5-۶):۲۶۱–۳۹. [PMID: 37084395](#) [DOI: 10.1080/15459624.2023.2205466](#)
۵۸. Makowski K. Aspects of ergonomics in the use of respiratory protective devices. In book: *Nanoaerosols, Air Filtering and Respiratory Protection*. 1st Edition. CRC Press; 2020. p. 141–74. [DOI:10.1201/9781003050070-6](#)
۵۹. Mhamdi A, Ben Amor A, Amri A, Youssef I, Ladhari N, Gharbi R. Ergonomic evaluation of a situation of coexposure to solvents and noise in a printing of flexible packaging. *Work.* 2012;**41**(S1):496–502. [PMID: 22316772](#) [DOI: 10.3233/WOR-2012-0202-496](#)
۶۰. Mork MA, Choi SD. An ergonomic assessment of sample preparation job tasks in a chemical laboratory. *J Chem Health Saf.* 2015;**22**(4):23–32. [DOI: 10.1016/j.jchas.2014.11.003](#)
۶۱. Babu K, Patil A. Ergonomics in the anaesthetic workplace. *Br J Anaesth.* 2024;**133**(2):466. [DOI: 10.1016/j.bja.2024.04.035](#)
۶۲. Shah N, Abbas F, Abbas Y, Haider SA, Khan Q, Asghar N, et al. Assessment of the workplace conditions and health and safety situation in chemical and textile industries of Pakistan. *Sc J Public Health.* 2015;**3**(6):862–۹. [DOI:10.11648/j.sjph.20150306.20](#)
۶۳. Badea DO, Darabont DC, Ivan I, Ciocirlea V, Stepa RA,

- Chivu OR. Workers' exposure to chemical risk in small and medium-sized enterprises: assessment methodology and field study. *Sustainability*. 2024;**16**(15):6308. DOI: [10.20944/preprints202407.0704.v1](https://doi.org/10.20944/preprints202407.0704.v1)
۱۴. Mallires KR, Wang D, Tipparaju VV, Tao N. Developing a low-cost wearable personal exposure monitor for studying respiratory diseases using metal-oxide sensors. *IEEE Sens J*. 2019;**19**(18):8252–61. PMID: [34326709](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34326709/) DOI: [10.1109/jsen.2019.2917435](https://doi.org/10.1109/jsen.2019.2917435)
۱۵. Al-Okby MFR, Neubert S, Roddelkopf T, Thurow K. Mobile detection and alarming systems for hazardous gases and volatile chemicals in laboratories and industrial locations. *Sensors*. 2021;**21**(23):8128. PMID: [34884132](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34884132/) DOI: [10.3390/s21238128](https://doi.org/10.3390/s21238128)
۱۶. Fung AG, Rajapakse MY, McCartney MM, Falcon AK, Fabia FM, Kenyon NJ, et al. Wearable environmental monitor to quantify personal ambient volatile organic compound exposures. *ACS Sens*. 2019;**4**(5):1358-1364. PMID: [31074262](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31074262/) DOI: [10.1021/acssensors.9b00304](https://doi.org/10.1021/acssensors.9b00304)
۱۷. Pal PKS, Pal RR, Prajapati VD, Pandey YR, Shaikh S. Design and fabrication of agricultural sprayer. *Int J Res Appl Sci Eng Technol*. 2022;**10**(4):358–62. DOI: [10.22214/ijraset.2022.41128](https://doi.org/10.22214/ijraset.2022.41128)
۱۸. Raut LP, Jaiswal SB, Mohite NY. Design, development and fabrication of agricultural pesticides sprayer with weeder. *Int J Appl Res Stud*. 2013;**2**(11):1–8. [Link](#)