Journal of Health and Safety at Work 2025; 15(3): 589-611

ORIGINAL RESEARCH PAPER

Comparative Quantitative and Semi-Quantitative Occupational Risk Assessment of BTEX Compounds and Heavy Metals in a Power Equipment Manufacturing Industry

Azin Najafi[1], Farideh Golbabaei[1], Mohsen Sadeghi Yarandi[1], Mehdi Yaseri[2], Reza Jahani[3], Seyedeh Reyhaneh Shams[4], Saba Kalantary[1*]

[1]Department of Occupational Health Engineering, School of Public Health, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran
[2]Department of Epidemiology and Biostatistics, School of Public Health, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran
[3]Department of Toxicology and Pharmacology, School of Pharmacy, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran
[4]Department of Earth and Atmospheric Sciences, University of Houston, TX, 77004, USA

Received: 3/8/2025 Accepted: 30/8/2025

ABSTRACT

Introduction: Occupational exposure to volatile organic compounds (BTEX) and heavy metals in industrial settings poses significant health concerns. These substances may lead to toxic, carcinogenic, and hematobiochemical effects. This study aimed to assess the health risks associated with exposure to these pollutants in a power equipment manufacturing industry over a 10-year period and to compare the accuracy of quantitative (USEPA) and semi-quantitative (Singapore) risk assessment methods.

Material and Methods: This cross-sectional study was conducted across six occupational groups. Personal air sampling of BTEX and heavy metals was performed according to NIOSH protocols. Carcinogenic and non-carcinogenic risks were estimated using the USEPA method and the Singapore semi-quantitative approach. Additionally, hematological and biochemical indicators of exposed workers were analyzed.

Results: Nickel had the highest cancer risk, and the highest hazard quotient (HQ) values were related to xylene, benzene, and nickel. While the semi-quantitative method classified most risks as negligible to low, the USEPA method identified several cases with definite health risks. Significant effects were observed on SGOT, SGPT, fasting blood sugar, creatinine, and blood pressure among exposed groups.

Conclusion: The USEPA method demonstrated higher sensitivity and reliability in identifying occupational chemical hazards and should be prioritized in future assessments. Furthermore, the findings underscore the importance of preventive measures to reduce chronic exposure to BTEX and heavy metals in similar industrial settings.

Keywords: *Risk assessment, US environmental protection agency method, Singapore semi-quantitative method, BTEX, Metals*

HOW TO CITE THIS ARTICLE

Najafi A., Golbabaei F., Sadeghi Yarandi M., Yaseri M., Jahani R., Shams SR., Kalantary S. Comparative Quantitative and Semi-Quantitative Occupational Risk Assessment of BTEX Compounds and Heavy Metals in a Power Equipment Manufacturing Industry. J Health Saf Work. 2025; 15(3): 589-611.

1. INTRODUCTION

Industrial environments, often expose workers to hazardous substances. BTEX compounds (benzene, toluene, ethylbenzene, and xylenes) are widely used as solvents or intermediates and pose significant health risks due to their volatility and toxicity. Additionally, heavy metals such as chromium, nickel etc. are commonly released during industrial processes like welding, cutting, and coating operations. Chronic exposure to these substances can lead to noncarcinogenic and

* Corresponding Author Email: *s-kalantari@sina.tuma.sc.ir*

Copyright © 2025 The Authors.
Published by Tehran University of Medical Sciences

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

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2026-04-02]

carcinogenic outcomes in exposed workers.

Occupational risk assessment is critical for understanding and managing these health hazards. While the quantitative method developed by the United States Environmental Protection Agency (USEPA) offers detailed estimations of cancer and non-cancer risks, it is often resource-intensive and data-dependent. Alternatively, the semi-quantitative method developed in Singapore provides a more accessible, albeit less precise, approach for estimating chemical risk in workplaces.

This study aimed to assess the occupational exposure to BTEX compounds and heavy metals in a power equipment manufacturing industry over a ten-year period. The objectives were twofold: (1) to determine the extent of exposure and associated health risks using both USEPA quantitative and Singapore semi-quantitative methods, and (2) to compare the effectiveness of these methods.

2. MATERIAL AND METHODS

Study Design

This descriptive cross-sectional study (2012–2021) was conducted in a power equipment manufacturing industry in Tehran, Iran. Workers were grouped into Similar Exposure Groups (SEGs) based on tasks and pollutant exposure.

Air Sampling and Analysis

BTEX compounds were measured using NIOSH method 1501 with charcoal sorbent tubes and SKC pumps (0.2 L/min); samples were desorbed with carbon disulfide and analyzed by GC-FID (Varian CP-3800) using a silica capillary column. GC conditions included helium as carrier gas, injector at 200°C, column at 130°C, and detector at 210°C.

For metals, NIOSH method 7300 was applied. Samples were collected on 37 mm MCE filters (0.8 µm) using SKC PCXR8 pumps (2 L/min). Filters were treated with nitric–perchloric acid, evaporated, and diluted. Metal concentrations were determined by ICP-OES (Perkin-Elmer Analyst 200).

Risk Assessment

Carcinogenic risk assessment based on USEPA method

Nickel, Benzene are classified as a group 1 carcinogen, and ethylbenzene, a group 2B carcinogen by IARC. The cancer risk (CR) is evaluated by utilizing the inhalation unit risk (IUR) values supplied by the EPA and exposure concentration (EC). The CR can be determined using the Equation 1:

$$CR = EC \times IUR \quad (1)$$

Where EC (mg/m^3) is the exposure concentration and IUR $(\mu g/m^3)^{-1}$ represents Inhalation unit intake. The exposure concentration (EC) of Ni, Benzene, and ethylbenzene due to inhalation was obtained using the following Equation:

$$EC = \frac{C \times ET \times EF \times ED}{AT} \quad (2)$$

Where C is the concentration (mg/m^3) in the sampling area. ET represents the exposure time (h/day), EF denotes the exposure frequency (day/year), ED is the exposure duration (years) and AT represents the average time (70 years × 365 days/year× 24 h).

CR value less than 1×10^{-6} is considered to represent a negligible risk. CR values between 1×10^{-6} and 1×10^{-5}, and between 1×10^{-5} and 1×10^{-4}, are regarded as possible and probable risks. However, a CR above 1×10^{-4} is likely definite risk.

Non-carcinogenic risk assessment based on USEPA method

The HQ is calculated by dividing the exposure concentration (EC, mg/m^3) by the inhalation reference concentration (RFC, mg/m^3), as shown in Equation (3):

$$HQ = \frac{EC}{RFC} \quad (3)$$

EC was calculated using Equation (4):

$$EC = \frac{C \times ET \times ED \times EF}{AT} \quad (4)$$

Where C represents the concentration ($mg.m^{-3}$), ET is the exposure time (h/day), EF is the exposure frequency (day/year), ED is the exposure duration (years), and AT is the average lifetime (30 years ×365 days/ year ×24 h). A HQ greater than 1 suggests the potential for carcinogenic, while an HQ less than 0.1 indicates a negligible risk of harmful effects and greater than 0.1 is Probable.

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2026-04-02]

Semi-quantitative risk assessment based on Singapore method

A semi-quantitative health risk assessment method, as outlined by the Ministry of Manpower of Singapore. The risk rate (RR) was calculated using hazard ratings (HR) and exposure ratings (ER) based on the following equation (6):

$$Risk\ Rate = (HR \times ER)^{0.5} \quad (6)$$

The exposure rating (ER) was calculated based on air monitoring results, using Equation 7:

$$E = \frac{M \times D \times F}{W} \quad (7)$$

Where, E is the weekly exposure (mg/m^3), M is the exposure rate (mg/m^3), D is the average of exposure (h), F is the number of exposures in week, and W is the average working hours per week.

Evaluation of hematologic and biochemical parameters

This study investigated the effects of the examined compounds on BMI, White Blood Cells (WBC), Red Blood Cells (RBC), Fasting Blood Sugar (FBS), blood creatinine (Cr), cholesterol (Chol), triglycerides (TG), Aspartate Transaminase (SGOT), Alanine Transaminase (SGPT), Systolic Blood Pressure (SBP), and Diastolic Blood Pressure (DBP), over a ten-year period, comparing the results with a control group.

3. RESULTS AND DISCUSSION

Demographic information

The highest and the lowest mean ages belonged to welder's staff (43.4 ± 3. 5 years) and grinding (35.2 ± 2.6 years), respectively. On the contrary, the highest mean of work experiences was in the assembling (17±2.70 years), and the lowest was in painting, with a mean of 10±0.00 years.

Occupational exposure to BTEXs and Metals

The average concentration of Cr III in all work units, as well as the concentration of benzene in rotor assembly 3, and assembly 1 units, were above their TLV-TWA. However, the average concentration of Ni, except in the gearbox and compressor assembling unit, and Fe_2O_3, toluene, ethyl benzene and xylene in all units were below its TLV-TWA (Table 1). These findings are consistent with previous studies on metal fumes generated in welding and machining processes, where iron oxide and other hazardous metals like manganese, nickel are common.

Carcinogenic risk assessment

For benzene, a high percentage of work units, except for assembly 1 unit, were in the probable risk. For Ni, a percentage of the population in all units studied fell within the definite carcinogenic risk, with the welding and stator assembling 3 units showing the highest levels (Table 2). The high risk associated with benzene in quality control is linked

Table 1: Occupational exposure BTEXs and Heavy Metals

Job title	Average Concentration of Occupational Exposure (ppm or mg/m^3)						
	Benzene (ppm)	Toluene (ppm)	Ethyl Benzene (ppm)	Xylene (ppm)	Cr (III) (mg/m^3)	Fe_2O_3 (mg/m^3)	Ni (mg/m^3)
stator assembling 2	0.02±0.04	0.05±0.08	0.02±0.07	0.64±2.32	-	-	-
gearbox & compressor assembling	-	-	-	-	0.01±0.03	0.07±0.17	6.39±14.61
welding	-	-	-	-	0.03±0.06	0.52±0.76	0.04±0.03
Grinding 2	-	-	-	-	0.11±0.2	0.91±0.89	0.13±0.18
Grinding 3	-	-	-	-	0.06±0.08	0.63±1.08	0.06±0.08
painting	0.05±0.08	0.16±0.26	0.51±0.84	9.81±14.69	-	-	-
quality control	0.06±0.09	0.19±0.28	0.31±0.59	1.77±2.61	-	-	-
Assembling 2	0.01±0.01	0.02±0.02	0.03±0.08	0.03±0.03	-	-	-
Assembling 3	0.02±0.03	0.18±0.21	4.01±10.60	13.82±33.62	-	-	-
stator assembling 3	-	-	-	-	0.01±0.02	0.12±0.17	0.16±0.15
rotor assembly 3	0.36±0.52	2.32±3.49	0.45±0.58	3.92±6.32	-	-	-
Assembling 1	0.49±0.2	2.11±0.81	0.15±0.04	0.64±0.23	-	-	-
TLV-TWA ACGIH (ppm or mg/m^3) Benzene= 0.5 ppm, Toluene= 20 ppm, Ethyl Benzene= 20 ppm, Xylene= 20ppm Cr (III)= 0.003 mg/m^3, Fe_2O_3= 5 mg/m^3, Ni= 0.2 mg/m^3							

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2026-04-02]

Table 2: Results of the carcinogenic risk assessment of the compounds under Study during 10 years

Compound chemical and Job title	cancer risk (CR) (without unit)	Carcinogenic risk level (percentage)			
		Negligible	Probable	Possible	Definite
		$CR<10^{-6}$	$CR>10^{-6}$	$CR>10^{-4}$	$CR>10^{-2}$
Benzene					
stator assembling 2	1×10^{-5}	30	70	0	0
painting	2×10^{-4}	20	60	20	0
quality control	3×10^{-5}	10	90	0	0
Assembling 2	5×10^{-6}	46	54	0	0
Assembling 3	1×10^{-5}	40	60	0	0
rotor assembly 3	1×10^{-4}	0	70	30	0
Assembling 1	1×10^{-4}	0	10	90	0
Ethylbenzene					
stator assembling 2	4×10^{-6}	70	30	0	0
painting	5×10^{-4}	0	53	27	20
quality control	4×10^{-5}	28	52	20	0
Assembling 2	5×10^{-6}	70	30	0	0
Assembling 3	6×10^{-4}	20	40	30	10
rotor assembly 3	7×10^{-5}	0	70	30	0
Assembling 1	3×10^{-5}	0	100	0	0
Nickle					
gearbox & compressor assembling	4×10^{-2}	40	40	0	20
welding	1×10^{-3}	0	0	40	60
Grinding 2	1×10^{-3}	0	3	67	30
Grinding 3	1×10^{-3}	0	0	70	30
stator assembling 3	1×10^{-3}	0	40	0	60

to the use of penetrant test sprays, which contain benzene for detecting cracks in manufactured products. Similarly, the extensive use of organic solvents like ethylbenzene in painting increases its carcinogenic risk. Carcinogenic risks for Ni were found across various occupational groups, especially in welding, grinding, and cutting operations. The higher risk in welding may be attributed to exposure to welding electrodes containing a significant percentage of Ni.

Non-carcinogenic risk assessment

The highest average of HQ was related to xylene, benzene, and Ni. The highest HQ values were observed in the painting, rotor assembly 3, assembling 1, welding, grinding 2, grinding 3, and stator assembling 3.

Semi-quantitative risk assessment based on Singapore method

The lowest risk level was associated with ethylbenzene across all units studied. The benzene risk was low in all units. The risk of toluene was medium in units painting, rotor assembly 3, and assembling 1. The risk level of xylene was low in all units except for the painting unit, where it was medium. The risk level of metals was low across all units studied. When comparing the two risk assessment methods, the EPA method, which incorporates RFC and IUR, proved to be more detailed and conservative.

Effect of chemical compounds under study on hematologic and biochemical parameters

The exposure to BTEX significantly affected SGOT, SGPT and FBS, with notable differences observed between the exposed and the control group (P-value < 0.05). The effects were more pronounced in the group exposed to metals, where significant differences were noted in WBC, creatinine, cholesterol, triglycerides, SGOT, SGPT, and blood pressure over the past decade (P-value < 0.05).

4. CONCLUSIONS

Both the EPA and Singapore methods are useful for evaluating occupational exposure risks, but the EPA method is preferred for more

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2026-04-02]

cautious and precautionary results. To mitigate these health risks, measures such as improving ventilation, ensuring the use of protective equipment, replacing harmful substances with safer alternatives, and following safety regulations can be implemented. These steps help minimize exposure to BTEX compounds and metals, reducing the likelihood of related health problems.

5. ACKNOWLEDGMENT

The authors of this article would like to express their gratitude and appreciation to Tehran University of Medical Sciences and Health Services and the industry workers who participated in the study.

6. ETHICAL CODE

IR.TUMS.SPH.REC.1402.162

7. FUNDING

This research has been supported by Tehran University of Medical Sciences and Health Services grant (Grant No. 1402-3-99-68003).

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2026-04-02]

ارزیابی ریسک بهداشتی مواجهه شغلی با ترکیبات BTEX و فلزات سنگین: یک مطالعه مقایسه ای در صنعت تولید تجهیزات نیروگاهی

آذین نجفی[۱]، فریده گلبابایی[۱]، محسن صادقی یارندی[۱]، مهدی یاسری[۲]، رضا جهانی[۳]، سیده ریحانه شمس[۴]، صبا کلانتری[۱*]

[۱]گروه مهندسی بهداشت حرفه ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران
[۲]گروه مهندسی اپیدمیولوژی و آمار، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران
[۳]گروه سم شناسی و داروشناسی، دانشکده داروسازی، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران
[۴]گروه علوم زمین و علوم جوی، دانشگاه هیوستون، هیوستون، تگزاس، آمریکا

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۵/۱۲، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۶/۸

چکیده

مقدمه: مواجهه شغلی با ترکیبات آلی فرار (BTEX) و فلزات سنگین در محیطهای صنعتی، نگرانی‌های جدی از منظر سلامت شغلی ایجاد کرده است. این ترکیبات ممکن است منجر به اثرات سمی، سرطان‌زایی، و اختلالات خونی و بیوشیمیایی شوند. هدف این مطالعه، ارزیابی ریسک‌های بهداشتی ناشی از مواجهه با این آلاینده‌ها در یک صنعت تولید تجهیزات نیروگاهی طی یک دوره ۱۰ ساله و مقایسه دقت روش‌های کمی (USEPA) و نیمه‌کمی (سنگاپور) بوده است

روش کار: این مطالعه به‌صورت مقطعی در شش گروه شغلی انجام شد. نمونه‌برداری فردی از ترکیبات BTEX و فلزات سنگین مطابق با روش‌های NIOSH انجام گرفت. سپس ارزیابی ریسک سرطانزایی و غیرسرطانزایی با روش کمی سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا (USEPA) و روش نیمه‌کمی سنگاپور محاسبه شد. علاوه‌براین، شاخص‌های خونی و بیوشیمیایی کارکنان نیز تحلیل گردید.

یافته ها: بیشترین ریسک سرطان‌زایی با نیکل و بالاترین مقدار ضریب خطر (HQ) مربوط به زایلن، بنزن و نیکل گزارش شد. درحالی‌که اکثر ریسک‌ها در روش نیمه‌کمی در سطح پایین طبقه‌بندی شدند، روش USEPA توانست موارد با ریسک قطعی را نیز شناسایی کند. شاخص‌های FBS، SGPT، SGOT، کراتینین و فشار خون نیز نشان دادند کافراد تحت مواجهه با این ترکیبات قرار گرفته اند.

نتیجه گیری: نتایج این مطالعه نشان داد روش USEPA با دقت و حساسیت بالاتر، ابزار مناسب تری برای ارزیابی ریسک مواد شیمیایی در محیطهای کاری محسوب می‌شود. همچنین، توجه جدی به مواجهه مزمن با ترکیبات BTEX و فلزات و انجام اقدامات کنترلی مؤثر در صنایع مشابه مورد تأکید قرار می‌گیرد.

کلمات کلیدی: *ارزیابی ریسک، روش ارزیابی ریسک سازمان حفاظت محیط زیست ایالات متحده (USEPA)، روش ارزیابی ریسک سنگاپور، ترکیبات BTEX، فلزات سنگین*

* پست الکترونیکی نویسنده مسئول مکاتبه: *s-kalantari@sina.tums.ac.ir*

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2026-04-02]

مقدمه

محیط های کاری و صنعتی اغلب منجر به مواجهه کارگران با ترکیبات شیمیایی همچون گازها، بخارات و ذرات می شوند که می توانند منجر به ریسک های بهداشتی جدی همچون بیماریهای تنفسی و سمیت های سیستمیک گردند (۲،۱). در میان این ترکیبات و آلودگی ها، فلزات سنگین و ترکیبات آلی فرار بویژه ترکیبات BTEX (شامل بنزن، تولوئن، اتیل بنزن، و زایلن) نگرانی های عمده ای را بدلیل اثرات سمی و پایداری در محیط زیست نشان می دهند (۴،۳). ترکیبات BTEX به طور معمول در محیط های صنعتی یافت می شوند و ریسک های جدی از نظر آلودگی هوا و محیط زیست و نیز اثرات بر سلامت انسان دارند که منجر به مواردی مانند انواع سرطان ها همچون لوسمی، مشکلات تنفسی و آسیب به سیستم عصبی مرکزی می گردند (۵-۸). این ترکیبات توسط سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا[1] به عنوان آلاینده های دارای اولویت دسته بندی می شوند، و از نظر نیاز به اقدامات مدیریت ریسک مورد تاکید می باشند (۹).

فلزات سنگین، برخلاف آلاینده های آلی دچار استحاله نشده و در بدن تجمع می یابند که منجر به مشکلات سلامتی مزمن می گردند. فعالیتهای صنعتی همچون ذوب فلزات، معدن کاری، و پروسه های فلزکاری منابع اصلی مواجهه با فلزات هستند (۱۰-۱۲). فلزات و اکسیدهای فلزی می توانند منجر به آسیب به ارگان های حیاتی همچون مغز، کلیه ها، کبد و ریه ها شده و باعث اثرات سمی متفاوت همچون سرطانزایی، مشکلات قلبی –عروقی، و علایم مشکلات عصبی شوند (۱۵،۱۴،۳). از آنجاییکه این فلزات در برابر تجزیه زیستی[2] مقاومت می کنند در جریان خون و سایر اندام ها تجمع یافته و همان طور که پیشتر گفته شد تحت تاثیر پارامترهای مختلف همچون سبک زندگی، متغیرهای دموگرافیک، مدت مواجهه و ... منجر به طیف وسیعی از مشکلات سلامتی می گردند (۱۵،۱۳).

سروکار داشتن کارگران با این مواد در پروسه های صنعتی منجر به مواجهه مداوم با این خطرات خواهد شد که آنها را در معرض ریسک های بالاتری قرار خواهد داد. افزایش نگرانی در ارتباط با ایمنی و سلامت محیط های کاری بویژه برای کارگرانی که با ترکیبات BTEX و فلزات مواجهه دارند، ارزیابی ریسک شیمیایی را ضروری می سازد (۱۶). ارزیابی ریسک یک رویکرد فعال برای ارزیابی پتانسیل اثرات سلامتی و تعیین اقدامات پیشگیرانه کافی است (۱۷، ۱۸). مدل ارزیابی ریسک کمی EPA به طور گسترده به عنوان یکی از روش های قابل اطمینان برای ارزیابی ریسک شیمیایی استفاده می شود و سازمان جهانی بهداشت[3] آن را به عنوان رویکردی برای اهداف نظارتی توصیه می کند (۱۹). بهرصورت هنگامیکه داده های کمی در دسترس نیست، روش های کیفی یا نیمه کمی مانند روش توسعه یافته بوسیله دپارتمان شغلی سنگاپور[4] نیز می تواند مورد استفاده قرار گیرد (۲۰).

این مطالعه با هدف ارزیابی ریسک های سرطانزایی و غیرسرطانزایی ترکیبات BTEX و فلزات در میان کارگران مواجهه یافته در یک صنعت تولید تجهیزات نیروگاهی در یک دوره ده ساله به دور روش کمی و نیمه کمی و مقایسه این دو روش صورت گرفت.

روش کار

طراحی مطالعه

این مطالعه مقطعی –توصیفی در یک صنعت تولید تجهیزات نیروگاهی در تهران برای یک دوره ده ساله (۱۴۰۰-۱۳۹۰) انجام گرفت. کارگران براساس نوع وظایف و مواجهه به گروههای کاری مشابه[5] تقسیم شدند (۲۱). پنج گروه شغلی شامل جوشکاری، سنگزنی، مونتاژ، رنگ کاری و کنترل کیفیت (۶۲ نفر) انتخاب شدند. معیارهای ورود به مطالعه شامل غیرسیگاری بودن و حداقل ده سال تجربه کاری در گروههای شغلی تعیین شده بود.

به منظور انجام ارزیابی ریسک شیمیایی مواجهه، براساس بررسی های میدانی صورت گرفته و براساس

1. U.S. Environmental Protection Agency (USEPA)
2. Biodegradation
3. World Health Organization (WHO)
4. Singapore's Occupational Health Department
5. Similar Exposure Groups (SEGs)

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2026-04-02]

نتایج بررسی های میدانی و نیز ارزیابی اطلاعات موجود، سه فلز سنگین شامل کروم ۳ ظرفیتی، آهن، نیکل و نیز ترکیبات BTEX انتخاب شدند. به‌کارگیری پروتکل‌های استاندارد، کالیبراسیون منظم تجهیزات، و اقدامات کنترل کیفیت، موجب اطمینان از پایایی و روایی داده‌ها گردید. کلیه مراحل پژوهش مطابق با دستورالعمل‌های هلسینکی انجام و کلیه اصول اخلاقی در تمام مراحل گردآوری و تحلیل داده‌ها رعایت شد و رضایت‌نامه آگاهانه از تمامی شرکت‌کنندگان اخذ گردید.

نمونه برداری و آنالیز نمونه ها

نمونه برداری و آنالیز ترکیبات BTEX

نمونه برداری فردی از ناحیه تنفسی کارگران در هر یک از گروههای شغلی منتخب از ترکیبات BTEX و فلزات مطابق با روش های NIOSH 1501 وNIOSH 7300 صورت گرفت (۲۲،۲۴). قابل ذکر است که، با توجه به طول مدت مطالعه که دروه ۱۰ ساله بوده است اطلاعات مربوط به میزان مواجهه در سال آخر اندازه گیری شده و در مورد سال های قبل تر از اطلاعات موجود استفاده گردید.

براساس روش NIOSH 1501 برای نمونه برداری فردی از ترکیبات BTEX در منطقه تنفسی کارگران از لوله های جاذب زغال فعال و پمپ نمونه بردار فردی با دبی ۰/۲ لیتر بر دقیقه (SKC, 44XR-224, United Kingdom) که قبلا در آزمایشگاه توسط فلومتر حباب صابون کالیبره شده استفاده گردید. سپس نمونه ها کدگذاری شده و در ظروف ایزوله مناسب با دمای پایین (حاوی یخ خشک به منظور جلوگیری از تبخیر ترکیبات) و بلافاصله در همان روز به آزمایشگاه منتقل گردید. ترکیبات مورد مطالعه با استفاده از ۱ میلی لیتر دی سولفید کربن از روی جاذب با استفاده از حمام اولتراسونیک استخراج شدند. پس از ۳۰ دقیقه عمل اختلاط، آنالیز نمونه ها با استفاده از دستگاه کروماتوگرافی گازی(GC, Varian, CP-3800, USA) با ستون مویین (با قطر داخلی ۰/۵۳ میلی‌متر، طول ۵۰ متر، و ضخامت لایه ۰/۲۵ میکرومتر) مجهز به آشکارساز یونش شعله (FID) انجام شد. از گاز حامل هلیوم با دبی ۳۰ میلی‌لیتر بر دقیقه استفاده گردید. دمای تزریق ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد تنظیم و دمای اولیه ستون ۵۰ درجه سانتی گراد بود که پس از ۲ دقیقه و به میزان ۲۰ درجه سانتی گراد در دقیقه تا ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد افزایش یافت. دمای آشکارساز ۲۱۰ درجه سانتی‌گراد بود. منحنی‌های کالیبراسیون با استفاده از محلول استاندارد مادر ترکیبات بنزن، تولوئن، اتیل بنزن و زایلن تهیه شد (R^2 >0.988) (۲۵،۱). غلظت‌ها بر اساس معادله ۱ محاسبه گردید:

$$C = \frac{m}{Q_x \times t} \times 10^6 \qquad (۱)$$

در این معادله، C نشان‌دهنده غلظت ترکیباتBTEX بر حسب میکروگرم بر متر مکعب ($\mu g/m^3$)؛

m جرم ترکیبات آنالیت شناسایی‌شده در حلال استخراج‌کننده برحسب میکروگرم؛

Qx نرخ برداشت[1] هر یک از ترکیبات بر روی لوله زغال فعال با مش ۳۵–۵۰ را نشان می‌دهد که به‌ترتیب برابر است با: ۰/۰۷۸ لیتر بر دقیقه برای بنزن، ۰/۰۷۲ لیتر بر دقیقه برای تولوئن، ۰/۰۶۷ لیتر بر دقیقه برای اتیل‌بنزن، و ۰/۰۶۹لیتر بر دقیقه برای زایلن؛

t زمان مواجهه برحسب دقیقه است.

نمونه برداری و آنالیز ترکیبات فلزی

به منظور نمونه برداری از ترکیبات فلزی براساس روش NIOSH 7300، از فیلتر استرسلولزی با پورسایز ۰/۸ میکرون و قطر ۳۷ میلی متر استفاده شد. پس از کالیبراسیون پمپ نمونه بردار فردی (SKC, 44XR-224, United Kingdom)، و توزین فیلترها، نمونه برداری با دبی ۲ لیتر بر دقیقه و به مدت ۳ ساعت از ناحیه تنفسی کارگران صورت گرفت (۲۴-۲۲، ۶۴). به منظور استخراج نمونه ها، فیلتر در یک بشر قرار گرفت و ۸۰۰ میلی لیتر اسید نیتریک و ۲۰۰ میلی لیتر اسید پرکلریک به آن

1. Uptake rate

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2026-04-02]

اضافه گردید. سپس نمونه ها حرارت داده شد تا ۰/۵ میلی لیتر از حلال آن باقی بماند. این مرحله مجددا با ۲ میلی لیتر حلال تکرار گردید. محلول شفاف بدست آمده به بالن ژوژه منتقل و با اسید حلال به حجم رسانده شد. محلول نهایی با استفاده از طیف‌سنج نشری پلاسمای جفت‌شده القایی (ICP-OES, (Perkin-Elmer Analyst 200 و در طول موج‌های مختلف جهت تعیین غلظت فلزات مورد تجزیه قرار گرفت (۲۷،۲۶،۲۰).

ارزیابی ریسک مواجهه شغلی با ترکیبات BTEX و فلزی

ارزیابی ریسک سرطانزایی براساس روش EPA

با در نظر گرفتن سرطانزایی ترکیبات BTEX، بنزن براساس دسته بندی آژانس بین المللی سرطان[1] در گروه یک مواد سرطان‌زا (سرطان‌زای قطعی برای انسان) و اتیلن بنزن به عنوان (احتمالاً برای انسان سرطان‌زا است (گروه 2B) شناخته شده‌اند. و در میان ترکیبات فلزی، براساس دسته بندی IARC نیکل به عنوان گروه یک (قطعا سرطانزا)دسته بندی شده است (۲۹،۲۸). در این مطالعه، خطر سرطان‌زایی ناشی از مواجهه شغلی با این مواد با استفاده از روش ارزیابی ریسک سازمان حفاظت محیط زیست ایالات متحده (USEPA) و پایگاه دادهIRIS (سامانه یکپارچه اطلاعات ریسک) مورد ارزیابی قرار گرفت (۳۰). شاخص ریسک سرطان‌زایی[2] که احتمال ابتلا به سرطان ناشی از مواجهه طولانی‌مدت با مواد سرطان‌زا را اندازه‌گیری می‌کند، برای برآورد ریسک در طی سال‌های متوالی مواجهه شغلی به‌کار گرفته شد (۳۱،۸).

شاخص ریسک سرطان‌زایی با استفاده از مقادیر ریسک واحد جذب تنفسی[3] ارائه‌شده توسط سازمان حفاظت محیط زیست ایالات متحده (EPA) و میزان مواجهه[4] محاسبه گردید. شاخص CR از طریق معادله (۲) قابل محاسبه است:

$$CR = EC \times IUR \qquad (۲)$$

1. International Agency for Research on Cancer (IARC)
2. Cancer Risk (CR)
3. Inhalation Unit Risk (IUR)
4. Exposure Concentration (EC)

EC میزان مواجهه برحسب mg/m^3

و IUR واحد جذب تنفسی برحسب $(\mu g/m^3)^{-1}$است.

میزان مواجهه (EC) برای نیکل، بنزن و اتیل‌بنزن ناشی از مسیر تنفسی، با استفاده از معادله زیر به‌دست آمد (۱۰):

$$EC = \frac{C \times ET \times EF \times ED}{AT} \qquad (۳)$$

C غلظت برحسب mg/m^3

ET میزان مواجهه برحسب h/day

EF فرکانس مواجهه برحسب day/year

ED دوره مواجهه برحسب years

AT میانگین زمان مواجهه برحسب years (۷۰ سال × ۳۶۵ رو ×۲۴ ساعت) است.

مقادیر شاخص ریسک کمتر از مقدار10^{-6} به عنوان ریسک ناچیز تلقی می‌شود. مقادیر بین10^{-6} تا 10^{-5}به‌عنوان ریسک امکان پذیر و مقادیر بین 10^{-5} تا 10^{-4} به‌عنوان ریسک احتمالی در نظر گرفته می‌شوند و از منظر مقرراتی حائز اهمیت هستند. با این حال، مقدار CRبیشتر از 10^{-4} نشان‌دهنده خطر قطعی برای سلامت انسان (سرطانزایی قطعی) بوده و نیاز به اقدامات اصلاحی و کنترلی وجود دارد (۳۰).

ارزیابی ریسک غیرسرطانزایی براساس روش EPA

به منظور محاسبه ریسک غیر سرطانزایی ناشی از مواجهه با ترکیبات غیرسرطان زا در مطالعه حاضر از روش شاخص ضریب خطر[5]استفاده شد. شاخص خطر با مقایسه سطح میزان مواجهه با یک ماده و غلظت مرجع تنفسی[6] میزان اهمیت و پیامدهای مواجهه را مشخص می‌سازد. غلظت مرجع تنفسی نشان‌دهنده سطح مواجهه استنشاقی بلندمدت با یک ماده است که در طول عمر انسان منجر به اثرات زیان‌بار غیرسرطان‌زا نمی‌شود. مقدار HQاز تقسیم غلظت مواجهه استنشاقی(EC)، بر حسب mg/m^3بر غلظت مرجع استنشاقی(RFC)، بر حسب mg/

5. Hazard Quotient (HQ)
6. Reference concentration (RFC)

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2026-04-02]

جدول ۱: پارامترهای استفاده‌شده جهت محاسبه ی ریسک سرطان زایی و غیر سرطان زایی ترکیبات مورد مطالعه

پارامتر	تعریف	واحد	مقدار	منبع
IUR	واحد جذب تنفسی	بنزن=۰/۰۰۰۰۰۷۸ اتیلن بنزن=۰/۰۰۰۰۰۲۵ نیکل=۰/۰۰۰۲۴	$(\mu g/m^3)^{-1}$	IRIS, USEP (2005)
C	غلظت	-	$mg/\ m^{-3}$	TWA_8, from sampling
ET	میزان مواجهه	برحسب نوع شغل متغیر است	h/day	پرسشنامه
EF	فرکانس مواجهه	۳۰۰	day/year	پرسشنامه
ED	دوره مواجهه	۳۰	سال	پرسشنامه
AT	میانگین متوسط مواجهه (متوسط طول عمر)	برای ترکیبات سرطانزا=۷۰ سال × ۳۶۵ روز/سال ×۲۴ ساعت برای ترکیبات غیر سرطانزا=۳۰ سال × ۳۶۵ روز/سال ×۲۴ ساعت	ساعت	WHO
RFC	غلظت مرجع تنفسی	بنزن=۰/۰۳ تولوئن=۵ اتیل بنزن=۱ زایلن=۰/۱ اکسید آهن=۱ نیکل=۰/۰۰۰۲ کروم=۰/۱	$mg/\ m^{-3}$	USEP (2005)

m^3، مطابق با معادله۴ بەدست می‌آید (۳۲):

$$HQ = \frac{EC}{RFC} \qquad (۴)$$

برای تعیین میزان شاخص ضریب خطر ابتدا باید مقدار میزان مواجهه (EC) را براساس رابطه ۵ تعیین کرد:

$$EC = \frac{(CA \times ET \times ED \times EF)}{AT} \qquad (۵)$$

CA غلظت برحسب mg/m^3

ET میزان مواجهه برحسب h/day

EF فرکانس مواجهه برحسب day/year

ED دوره مواجهه برحسب سال

AT متوسط طول عمر برحسب ساعت (۳۰ سال × ۳۶۵ روز ×۲۴ ساعت) است.

مقدار HQ بیشتر از ۱ نشان‌دهنده احتمال بروز اثرات زیان‌بار سلامت غیرسرطان‌زا در انسان است، در حالی‌که مقدار HQ کمتر از ۰/۱ به‌عنوان ریسک ناچیز تلقی می‌شود و مقادیر بزرگ‌تر از ۰/۱ نشان‌دهنده ریسک محتمل می‌باشند(۳۳). جدول ۱ خلاصه‌ای از تمامی پارامترهای مورد استفاده در این مطالعه جهت محاسبه ریسک‌های سرطانزایی و غیرسرطانزایی را ارائه می‌دهد.

ارزیابی ریسک نیمه کمی به روش سنگاپور

در این مطالعه به منظور ارزیابی مواجهه شغلی از یک روش نیمه‌کمی ارزیابی ریسک نیز استفاده شد که توسط وزارت منابع انسانی سنگاپور تدوین شده است. میزان ریسک[1] با استفاده از ضریب مخاطره[2] و درجه مواجهه[3] و مطابق با معادله (۶) محاسبه گردید:

$$Risk\ Rate = (HR \times ER)^{0.5} \qquad (۶)$$

ضریب مخاطره (HR) برای مواد مختلف با استفاده از اطلاعات ارائه‌شده توسط کنفرانس آمریکایی متخصصان بهداشت صنعتی دولتی[4]، برنامه ملی سم‌شناسی ایالات متحده[5] و رده‌بندی آژانس بین‌المللی تحقیقات سرطان

1. Risk Rate (RR)
2. Hazard Rating (HR)
3. Exposure Rating (ER)
4. American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH)
5. National Toxicology Program (NTP)

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2026-04-02]

جدول۲: تعیین درجه مواجهه

E/PEL	ER
۰/۱>	۱
۰/۱-۰/۵	۲
۰/۵-۱	۳
۱-۲	۴
۲<	۵

(IARC)تعیین گردید. درجه مواجهه (ER) نیز بر اساس نتایج پایش هوای محیط کار و با استفاده از معادله (۷) محاسبه شد.

$$E = \frac{M \times D \times F}{W} \quad (۷)$$

E میزان مواجهه هفتگی بر حسب میلی گرم بر متر مکعب یا پی پی ام

F فرکانس مواجهه در هفته،

M میزان مواجهه بر حسب میلی گرم بر متر مکعب یا پی پی ام

D میانگین مدت زمان هر مواجهه بر حسب ساعت

W میانگین ساعات کاری در هفته بر حسب ساعت می باشد.

لازم به ذکر است مطابق با موارد پیش گفت، پارامتر مقدار مواجهه تنفسی افراد در هر دو روش، طی نمونه برداری از منطقه تنفسی افراد محاسبه گردید. سپس مقدار مواجهه هفتگی بدست آمده از معادله بالا با مقادیر مواجهه مجاز بلند مدت [1]مقایسه شده و طبق جدول ۲ درجه مواجهه تعیین گردید.

در نهایت مقادیر نرخ ریسک ۱/۷-۱ در ناحیه ریسک قابل چشم پوشی، ۲/۸-۱/۷ در ناحیه ریسک کم، ۳/۵-۲/۸ در ناحیه ریسک متوسط، ۴/۵-۳/۵ در ناحیه ریسک بالا و بیشتر از ۴/۵ نیز در ناحیه ریسک بسیار بالا (قطعی) تقسیم بندی گردید.

ارزیابی پارامترهای بیو شیمیایی و خونی

در این مطالعه، اثرات ترکیبات مورد بررسی بر شاخص‌های خونی، فشار خون، شاخص توده بدنی(BMI) و آنزیم‌های کبدی در یک دوره ده‌ساله نیز مورد بررسی قرار گرفت و نتایج با گروه کنترل (کارکنان اداری) مقایسه شد. پارامترهای ارزیابی‌شده شامل شاخص توده بدنی(BMI) ، شاخص های خونی شامل:گلبول‌های سفید(WBC) ، گلبول‌های قرمز(RBC) ، قند خون ناشتا(FBS) ، کراتینین خون(Cr) ، کلسترول(Chol) ، تری‌گلیسرید(TG) ، شاخص های کبدی شامل: آسپارتات ترانس‌آمیناز(SGOT) ، آلانین ترانس‌آمیناز(SGPT) ، و فشار خون سیستولیک (SBP) و فشار خون دیاستولیک (DBP) بودند. داده‌های مورد نیاز از پرونده‌های پزشکی شرکت‌کنندگان در مطالعه، طی ۱۰ سال استخراج گردید.

آنالیز آماری

برای تحلیل داده‌ها، از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۶، IBM) SPSS Statistics for Windows)استفاده شد. آمار توصیفی شامل میانگین، انحراف معیار(SD) ، فراوانی و درصد بود. به‌منظور بررسی نرمال بودن توزیع داده‌ها، آزمون کلموگروف–اسمیرنوف اجرا گردید که نتایج آن نشان داد داده‌ها از توزیع نرمال پیروی نمی‌کنند (P-value < 0.05)). بنابراین، از آزمون‌های ناپارامتریک برای تحلیل استفاده گردید. جهت مقایسه سطوح مواجهه، ریسک‌های سرطانزایی و غیرسرطانزایی، و ترکیبات نیمه‌کمی در گروه‌های مختلف مطالعه، از آزمون کروسکال–والیس استفاده گردید. همچنین، برای بررسی روند مواجهه و مقایسه مقادیر ریسک طی دوره ده‌ساله در هر گروه، از آزمون اسپیرمن بهره گرفته شد. مقدار P-value < 0.05 برای تمامی آزمون‌ها به‌عنوان سطح معنی‌داری آماری در نظر گرفته شد.

1. Permissible Exposure Limit (PEL)

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2026-04-02]

جدول ۳: اطلاعات جمعیت‌شناختی واحدهای مختلف عملیاتی

واحد عملیاتی	سن (سال)	سابقه کار(سال)	BMI	میزان تحصیلات (٪)		
	میانگین±انحراف معیار	میانگین±انحراف معیار	میانگین±انحراف معیار	زیر دیپلم	دیپلم	بالاتر از دیپلم
مونتاژ استاتور ۲	۴۰/۱±۳/۱	۲±۱۲/۱	۳۰/۲±۲/۸	-	۵۰	۵۰
مونتاژ گیربکس و کمپرسور	۴۰/۲±۵/۴	۱۳/۲±۷/۸	۲۶/۱±۶/۲	-	-	۱۰۰
جوشکاری	۴۳/۳±۴/۵	۱۵/۳±۹/۵	۲۵/۱±۴/۹	-	۵۳/۳	۴۶/۷
رنگزنی و شستشو	۳۸/۱±۷/۳	۱۰/۰±۰/۰	۲۵/۰±۶/۹	-	۱۰۰	-
سنگزنی ۲	۳۵/۲±۳/۶	۱۱/۱±۳	۳۱/۴±۹/۱	۶۶/۷	۳۳/۳	-
سنگزنی ۳	۰±۴۲/۹	۱۴/۳±۷/۹	۲۷/۲±۳/۱	-	۳۳/۳	۶۶/۷
کنترل کیفیت	۴۰/۲±۸/۵	۱۶/۲±۷/۵	۲۸/۴±۵/۹	-	۱۶/۷	۸۳/۳
مونتاژ ۲	۴۲/۴±۱/۷	۱۴/۴±۳/۳	۲۷/۳±۴/۷	-	-	۱۰۰
مونتاژ ۳	۴۲/۳±۷/۳	۱۶/۴±۳/۲	۲۶/۲±۹/۱	-	-	۱۰۰
مونتاژ استاتور ۳	۴۳/۲±۳/۳	۲±۱۷/۷	۲۶/۰±۴/۷	-	-	۱۰۰
مونتاژ روتور ۳	۴±۴۰/۷	۱۳/۲±۴/۹	۲۶/۳±۶/۲	-	۱۴/۳	۸۵/۷
مونتاژ کاری ۱	۱±۴۳/۵	۱۵/۱±۷/۸	۲۶/۱±۶/۳	-	-	۱۰۰

جدول ٤: مواجهه شغلی با ترکیبات BTEX و فلزات سنگین

واحد عملیاتی	میانگین غلظت مواجهه شغلی (ppm) یا(mg/m^3)						
	بنزن (ppm)	تولوئن (ppm)	اتیل بنزن (ppm)	زایلن (ppm)	کروم ۳ ظرفیتی (mg/m^3)	Fe_2O_3 (mg/m^3)	نیکل (mg/m^3)
مونتاژ استاتور ۲	۰/۰۲±۰/۰۴	۰/۰۵±۰/۰۸	۰/۰۲±۰/۰۷	۰/۶۴±۲/۳۲	-	-	-
مونتاژ گیربکس و کمپرسور	-	-	-	-	۰/۰۱±۰/۰۳	۰/۰۷±۰/۱۷	۶/۳۹±۱۴/۶۱
جوشکاری	-	-	-	-	۰/۰۳±۰/۰۶	۰/۵۲±۰/۷۶	۰/۰۴±۰/۰۳
رنگزنی و شستشو	۰/۰۵±۰/۰۸	۰/۱۶±۰/۲۶	۰/۵۱±۰/۸۴	۹/۸۱±۱۴/۶۹	-	-	-
سنگزنی ۲	-	-	-	-	۰/۱۱±۰/۲	۰/۹۱±۰/۸۹	۰/۱۳±۰/۱۸
سنگزنی ۳	-	-	-	-	۰/۰۶±۰/۰۸	۰/۶۳±۱/۰۸	۰/۰۶±۰/۰۸
کنترل کیفیت	۰/۰۶±۰/۰۹	۰/۱۹±۰/۲۸	۰/۳۱±۰/۵۹	۱/۷۷±۲/۶۱	-	-	-
مونتاژ ۲	۰/۰۱±۰/۰۱	۰/۰۲±۰/۰۲	۰/۰۳±۰/۰۸	۰/۰۳±۰/۰۳	-	-	-
مونتاژ ۳	۰/۰۲±۰/۰۳	۰/۱۸±۰/۲۱	۴/۰۱±۱۰/۶۰	۱۳/۸۲±۳۳/۶	-	-	-
مونتاژ استاتور ۳	-	-	-	-	۰/۰۱±۰/۰۲	۰/۱۲±۰/۱۷	۰/۱۶±۰/۱۵
مونتاژ روتور ۳	۰/۳۶±۰/۵۲	۲/۳۲±۳/۴۹	۰/۴۵±۰/۵۸	۳/۹۲±۶/۳۲	-	-	-
مونتاژ ۱	۰/۴۹±۰/۲	۲/۱۱±۰/۸۱	۰/۱۵±۰/۰۴	۰/۶۴±۰/۲۳	-	-	-
TLV-TWA ACGIH (ppm or mg/m^3)							
بنزن= ۰/۵ ppm، تولوئن= ۲۰ppm، اتیل بنزن= ۲۰ ppm، زایلن= ۲۰ppm							
کروم ۳ ظرفیتی= ۰/۰۰۳ mg/m^3، نیکل= ۰/۲ mg/m^3، اکسید آهن ۳ ظرفیتی = ۵ mg/m^3							

یافته ها

اطلاعات دموگرافیک

ویژگی‌های جمعیت‌شناختی مشاغل مورد بررسی در واحدهای مختلف در جدول ۳ نشان داده شده است. بیشترین و کمترین میانگین سنی به‌ترتیب مربوط به کارکنان بخش جوشکاری (۳/۵ ± ۴۳/۴ سال) و بخش سنگ‌زنی (۲/۶ ± ۳۵/۲ سال) بود. در مقابل، بیشترین میانگین سابقه کار در بخش مونتاژ مشاهده شد (۲/۷ ± ۱۷ سال) و کمترین میانگین سابقه مربوط به بخش رنگ‌کاری (۰/۰۰ ± ۱۰ سال) بوده است.

مواجهه شغلی با ترکیبات BTEX و فلزی

میانگین غلظت ۸ ساعته وزنی-زمانی(TWA-8h) ترکیبات BTEX و فلزات در واحدهای مختلف کاری طی دوره ۱۰ ساله در جدول ۴ ارائه شده است. میانگین غلظت کروم سه‌ظرفیتی (Cr III) در تمامی واحدهای

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2026-04-02]

جدول ۵: نتایج ارزیابی ریسک سرطان‌زایی ترکیبات مورد مطالعه طی دوره ۱۰ ساله

واحد عملیاتی	ریسک سرطانزایی (بدون واحد)	شاخص ریسک (٪)			
		ناچیز	محتمل	ممکن	قطعی
		$CR<10^{-6}$	$10^{-6}<CR<10^{-5}$	$10^{-5}<CR<10^{-4}$	$CR>10^{-4}$
بنزن					
مونتاژ استاتور ۲	1×10^{-5}	۳۰	۷۰	۰	۰
رنگزنی و شستشو	2×10^{-4}	۲۰	۶۰	۲۰	۰
کنترل کیفیت	3×10^{-5}	۱۰	۹۰	۰	۰
مونتاژ ۲	5×10^{-6}	۴۶	۵۴	۰	۰
مونتاژ ۳	1×10^{-5}	۴۰	۶۰	۰	۰
مونتاژ روتور ۳	1×10^{-4}	۰	۷۰	۳۰	۰
مونتاژ ۱	1×10^{-4}	۰	۱۰	۹۰	۰
اتیل بنزن					
مونتاژ استاتور ۲	4×10^{-6}	**۷۰**	**۳۰**	۰	۰
رنگزنی و شستشو	5×10^{-4}	۰	۵۳	۲۷	۲۰
کنترل کیفیت	4×10^{-5}	۲۸	۵۲	۲۸	۰
مونتاژ ۲	5×10^{-6}	۷۰	۳۰	۰	۰
مونتاژ ۳	6×10^{-4}	۲۰	۴۰	۳۰	۱۰
مونتاژ روتور ۳	7×10^{-5}	۰	۷۰	۳۰	۰
مونتاژ ۱	3×10^{5}	۰	۱۰۰	۰	۰
نیکل					
مونتاژ گیربکس و کمپرسور	4×10^{-2}	۴۰	۴۰	۰	۲۰
جوشکاری	1×10^{-3}	۰	۰	۴۰	۶۰
سنگزنی ۲	1×10^{-3}	۰	۳	۶۷	۳۰
سنگزنی ۳	1×10^{-3}	۰	۰	۷۰	۳۰
مونتاژ استاتور ۳	1×10^{-3}	۰	۴۰	۰	۶۰

کاری، و همچنین غلظت بنزن در واحدهای مونتاژ روتور ۳ و مونتاژ ۱، بالاتر از حدود آستانه مجاز مواجهه شغلی (TLV-TWA)بود. با این حال، میانگین غلظت نیکل(Ni) به‌جز در واحدهای مونتاژ گیربکس و کمپرسور و همچنین غلظت اکسید آهن(Fe_2O_3) ، تولوئن، اتیل‌بنزن و زایلن در تمامی واحدها، کمتر از مقادیر TLV-TWA آن‌ها گزارش شد.

ارزیابی ریسک سرطانزایی

میانگین ریسک بالقوه سرطان‌زایی ناشی از مواجهه استنشاقی با بنزن، اتیل‌بنزن و نیکل طی یک دوره ۱۰ ساله با استفاده از روش سازمان حفاظت محیط زیست ایالات متحده (EPA) ارزیابی گردید؛ نتایج آن در جدول ۵ ارائه شده است.

در مورد بنزن، درصد بالایی از واحدهای کاری به‌جز واحد مونتاژ ۱ در بازه ریسک سرطانزای محتمل قرار داشتند. برای نیکل، درصدی از جمعیت در تمامی واحدهای مورد بررسی در سطح ریسک سرطانزای قطعی قرار گرفتند که بالاترین میزان این ریسک در واحدهای جوشکاری و مونتاژ استاتور ۳ مشاهده شد.

ارزیابی ریسک غیرسرطانزایی

مقادیر شاخص خطر (HQ) برای مشاغل مختلف در جدول ۶ ارائه شده است. بالاترین میانگین HQ مربوط به زایلن، بنزن و نیکل بود. در ادامه، بیشترین مقادیر محاسبه‌شده HQ به‌ترتیب در واحدهای رنگ‌کاری، مونتاژ روتور ۳، مونتاژ ۱، جوشکاری، سنگ‌زنی ۲، سنگ‌زنی ۳، و مونتاژ استاتور ۳ مشاهده شد.

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2026-04-02]

جدول ٦: نتایج ارزیابی ریسک غیرسرطان‌زایی ترکیبات مورد مطالعه طی دوره ۱۰ ساله

واحد عملیاتی	ترکیب شیمیایی	شاخص خطر (میانگین±انحراف معیار)	شاخص ریسک		
			ناچیز	محتمل	قطعی
			HQ<۰/۱	۰/۱<HQ<۱	HQ>۱
مونتاژ استاتور ۲	بنزن	۰/۰±۵۵/۱۵	۹۵	۵	۰
	تولوئن	۰/۰±۰۰۱/۰۰۲	۱۰۰	۰	۰
	اتیل بنزن	۰/۰±۰۰۳/۰۰۹	۱۰۰	۰	۰
	زایلن	۰/۳±۹۴/۴۵	۷۵	۲۰	۰
رنگزنی و شستشو	بنزن	۱/۲±۱۹/۰۳	۲۳	۵۷	۰
	تولوئن	۰/۰±۰۲/۰۴	۸۷	۱۳	۰
	اتیل بنزن	۰/۰±۵۲/۸۷	۵۳	۲۷	۲۰
	زایلن	۰/۰±۵۲/۸۷	۰	۲۰	۸۰
کنترل کیفیت	بنزن	۰/۰±۲۱/۳۲	۷۰	۳۰	۰
	تولوئن	۰/۰±۰۰۴/۰۰۷	۱۰۰	۰	۰
	اتیل بنزن	۰/۰±۰۴/۰۸	۸۰	۲۰	۰
	زایلن	۲/۳±۶۶/۸۸	۲۰	۳۰	۵۰
مونتاژ ۲	بنزن	۰/۰±۰۳/۰۵	۸۰	۲۰	۰
	تولوئن	۰/۰±۰۰۰۴/۰۰۰۵	۱۰۰	۰	۰
	اتیل بنزن	۰/۰±۰۰۴/۰۰۱	۱۰۰	۰	۰
	زایلن	۰/۰±۰۴۸/۰۴۳	۹۰	۱۰	۰
مونتاژ ۳	بنزن	۰/۰±۰۶/۱	۸۰	۲۰	۰
	تولوئن	۰/۰±۰۰۴/۰۰۵	۱۰۰	۰	۰
	اتیل بنزن	۰/۱±۰۵۹/۵۷	۶۰	۳۰	۱۰
	زایلن	۲۰/۴۹±۵۳/۹۶	۳۰	۳۰	۴۰
مونتاژ روتور ۳	بنزن	۱/۱±۳۲/۹	۶۰	۱۰	۳۰
	تولوئن	۰/۰±۰۵/۰۹	۷۰	۳۰	۰
	اتیل بنزن	۰/۰±۰۶/۰۸	۷۰	۳۰	۰
	زایلن	۵/۹±۸۳/۳۸	۲۰	۱۰	۷۰
مونتاژ ۱	بنزن	۲/۱۱±۶۷/۱	۰	۱۰	۹۰
	تولوئن	۰/۰±۰۸/۰۳	۶۰	۴۰	۰
	اتیل بنزن	۰/۰±۰۳/۰۰۹	۱۰۰	۰	۰
	زایلن	۱/۰±۴۳/۵۰	۰	۱۰	۹۰
مونتاژ گیربکس و کمپرسور	اکسید آهن ۳ ظرفیتی	۰/۰±۰۱۴/۰۳	۹۳	۷	۰
	نیکل	۲۱۸۹/۵۰۰۵±۹/۵	۴۰	۱۰	۵۰
	کروم ۳ ظرفیتی	۰/۰±۰۱/۰۶	۹۸	۲	۰
جوشکاری	اکسید آهن ۳ ظرفیتی	۰/۰±۱۶/۲۳	۳۷	۶۳	۰
	نیکل	۷۱/۴۵±۷۴/۱۲	۰	۰	۱۰۰
	کروم ۳ ظرفیتی	۰/۰±۱۱/۲۱	۶۵	۳۰	۵
سنگزنی ۲	اکسید آهن ۳ ظرفیتی	۰/۰±۰۳۱/۰۳	۱۰۰	۰	۰
	نیکل	۷۶±۵۷/۸۳	۰	۰	۱۰۰
	کروم ۳ ظرفیتی	۰/۰±۰۹/۱۷	۸۰	۲۰	۰
سنگزنی ۳	اکسید آهن ۳ ظرفیتی	۰/۰±۱۰/۱۷	۸۰	۲۰	۰
	نیکل	۵۰/۷۱±۲۹/۹۳	۰	۰	۱۰۰
	کروم ۳ ظرفیتی	±۰۸/۰/۱۱	۷۷	۲۳	۰
مونتاژ استاتور ۳	اکسید آهن ۳ ظرفیتی	۰/۰±۰۱۱/۰۱۷	۱۰۰	۰	۰
	نیکل	۸۱/۷۸±۱۷/۵۶	۰	۰	۱۰۰
	کروم ۳ ظرفیتی	۰/۰±۰۱۳/۰۱۵	۱۰۰	۰	۰

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2026-04-02]

جدول ۷: نتایج ارزیابی نیمه‌کمی ریسک ترکیبات مورد مطالعه طی دوره ۱۰ ساله

واحد عملیاتی	ترکیب شیمیایی	ضریب مخاطره	درجه مواجهه (میانگین±انحراف معیار)	میزان ریسک (میانگین±انحراف معیار)	شاخص ریسک				
					قابل چشم پوشی	کم	متوسط	بالا	بسیار بالا
مونتاژ استاتور ۲	بنزن	۵	۰±۱/۰	۲/۰±۲۳/۰	۰	۱۰۰	۰	۰	۰
	تولوئن	۳	۱/۰±۶/۹	۲/۰±۰۸/۵۴	۰	۱۰۰	۰	۰	۰
	اتیل بنزن	۲	۰±۱/۰	۱/۰±۴۱/۰	۱۰۰	۰	۰	۰	۰
	زایلن	۳	۱/۰±۳/۹	۱/۰±۹۴/۵۱	۰	۱۰۰	۰	۰	۰
رنگزنی و شستشو	بنزن	۵	۰±۱/۰	۲/۰±۲۳/۰	۰	۱۰۰	۰	۰	۰
	تولوئن	۳	۳/۱±۶/۱	۳/۰±۲۴/۵۳	۰	۰	۱۰۰	۰	۰
	اتیل بنزن	۲	۰±۱/۰	۱/۰±۴۱/۰	۱۰۰	۰	۰	۰	۰
	زایلن	۳	۳/۱±۸/۴	۳/۰±۳۱/۷۱	۰	۰	۰	۰	۰
کنترل کیفیت	بنزن	۵	۰±۱/۰	۲/۰±۲۳/۰	۰	۱۰۰	۰	۰	۰
	تولوئن	۳	۲/۱±۳/۴	۲/۰±۵۱/۷۵	۰	۱۰۰	۰	۰	۰
	اتیل بنزن	۲	۰±۱/۰	۱/۰±۴۱/۰	۱۰۰	۰	۰	۰	۰
	زایلن	۳	۲/۱±۴/۴	۲/۰±۵۹/۷	۰	۱۰۰	۰	۰	۰
مونتاژ ۲	بنزن	۵	۰±۱/۰	۲/۰±۲۳/۰	۰	۱۰۰	۰	۰	۰
	تولوئن	۳	۱/۰±۳/۵	۱/۰±۹۴/۳۳	۰	۱۰۰	۰	۰	۰
	اتیل بنزن	۲	۰±۱/۰	۱/۰±۴۱/۰	۱۰۰	۰	۰	۰	۰
	زایلن	۳	۰±۱/۰	۱/۰±۷۳/۰	۰	۱۰۰	۰	۰	۰
مونتاژ ۳	بنزن	۵	۰±۱/۰	۲/۰±۲۳/۰	۰	۱۰۰	۰	۰	۰
	تولوئن	۳	۲/۱±۵/۷	۲/۰±۵۸/۸۹	۱۰۰	۰	۰	۰	۰
	اتیل بنزن	۲	۱/۰±۱/۰	۱/۰±۴۷/۸۷	۱۰۰	۰	۰	۰	۰
	زایلن	۳	۲/۱±۶۱/۷	۲/۰±۶۴/۹	۰	۱۰۰	۰	۰	۰
مونتاژ روتور ۳	بنزن	۵	۰±۱/۰	۲/۰±۲۳/۰	۰	۱۰۰	۰	۰	۰
	تولوئن	۳	۳/۱±۷/۲	۳/۰±۲۸/۵۷	۰	۰	۱۰۰	۰	۰
	اتیل بنزن	۲	۰±۱/۰	۱/۰±۴۱/۰	۱۰۰	۰	۰	۰	۰
	زایلن	۳	۲/۱±۸/۳	۲/۰±۲۳/۰	۰	۱۰۰	۰	۰	۰
مونتاژ ۱	بنزن	۵	۰±۱/۰	۲/۰±۲۳/۰	۰	۱۰۰	۰	۰	۰
	تولوئن	۳	۰±۵/۰	۳/۰±۸۷/۰	۰	۰	۰	۰	۰
	اتیل بنزن	۲	۰±۱/۰	۱/۰±۴۱/۰	۱۰۰	۰	۰	۰	۰
	زایلن	۳	۲/۰±۵/۷	۲/۰±۷/۴۱	۱۰۰	۱۰۰	۰	۰	۰
مونتاژ گیربکس و کمپرسور	اکسید آهن ۳ ظرفیتی	۳	۰±۱/۰	۱/۰±۷۳/۰	۱۰۰	۱۰۰	۰	۰	۰
	نیکل	۳	۰±۱/۰	۱/۰±۷۳/۰	۱۰۰	۱۰۰	۰	۰	۰
	کروم ۳ ظرفیتی	۳	۰±۱/۰	۱/۰±۷۴/۱۱	۰	۱۰۰	۰	۰	۰
جوشکاری	اکسید آهن ۳ ظرفیتی	۳	۰±۱/۰	۱/۰±۷۳/۰	۰	۱۰۰	۰	۰	۰
	نیکل	۳	۰±۱/۰	۱/۰±۷۳/۰	۰	۱۰۰	۰	۰	۰
	کروم ۳ ظرفیتی	۳	۱/۰±۳/۶	۱/۰±۹۳/۳۷	۰	۱۰۰	۰	۰	۰
سنگزنی ۲	اکسید آهن ۳ ظرفیتی	۳	۱/۰±۱/۰	۱/۰±۸/۲۱	۰	۱۰۰	۰	۰	۰
	نیکل	۳	۰±۱/۰	۱/۰±۷۳/۰	۰	۱۰۰	۰	۰	۰
	کروم ۳ ظرفیتی	۳	۱/۰±۲/۴	۱/۰±۸۷/۲۹	۰	۱۰۰	۰	۰	۰
سنگزنی ۳	اکسید آهن ۳ ظرفیتی	۳	۱/۰±۲/۴	۱/۰±۸۷/۲۹	۰	۱۰۰	۰	۰	۰
	نیکل	۳	۰±۱/۰	۱/۰±۷۳/۰	۰	۱۰۰	۰	۰	۰
	کروم ۳ ظرفیتی	۳	۱/۰±۲/۴	۱/۰±۸۷/۲۹	۰	۱۰۰	۰	۰	۰
مونتاژ استاتور ۳	اکسید آهن ۳ ظرفیتی	۳	۰±۱/۰	۱/۰±۷۳/۰	۰	۱۰۰	۰	۰	۰
	نیکل	۳	۰±۱/۰	۱/۰±۷۳/۰	۰	۱۰۰	۰	۰	۰
	کروم ۳ ظرفیتی	۳	۰±۱/۰	۱/۰±۷۳/۰	۰	۱۰۰	۰	۰	۰

ارزیابی نیمه‌کمی ریسک براساس روش سنگاپور

نتایج حاصل از ارزیابی ریسک به روش سنگاپور که در جدول ۷ ارائه شده است، نشان داد که پایین‌ترین سطح ریسک مربوط به اتیل‌بنزن در تمامی واحدهای مورد مطالعه بوده و در سطح ناچیز قرار داشت. سطح ریسک بنزن در تمامی واحدها پایین بود. سطح ریسک تولوئن در واحدهای رنگ‌کاری، مونتاژ روتور ۳، و مونتاژ ۱ در سطح متوسط قرار داشت. سطح ریسک زایلن در تمامی

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2026-04-02]

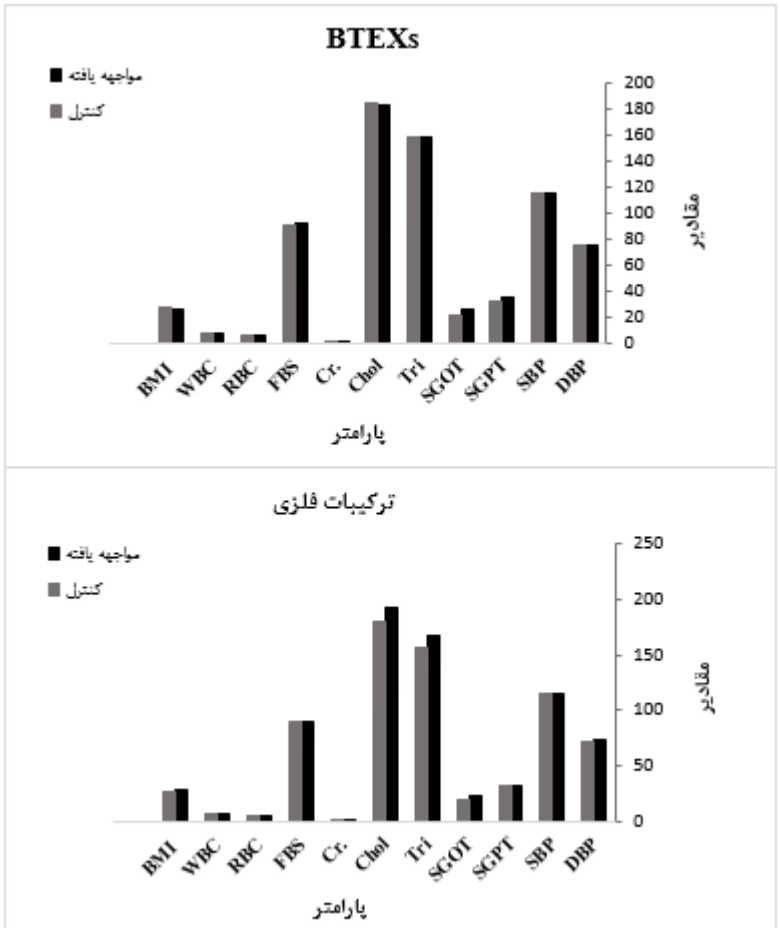
واحدها پایین ارزیابی شد، به‌جز در واحد رنگ‌کاری که در سطح متوسط بود. همچنین، سطح ریسک بخارات فلزی در تمامی واحدهای مورد مطالعه پایین گزارش شد.

تأثیر ترکیبات شیمیایی مورد مطالعه بر پارامترهای بیوشیمیایی و خونی

مواجهه با ترکیبات BTEX تأثیر معناداری بر آنزیم‌های کبدی(SGOT) ، (SGPT) و قند خون ناشتا (FBS)داشت، به‌گونه‌ای که تفاوت‌های قابل توجهی بین گروه مواجهه‌یافته و گروه کنترل مشاهده شد(P-value< 0.05)، همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است. این اثرات در گروهی که در معرض فیوم فلزی قرار داشتند، برجسته‌تر بود؛ به‌طوری که تفاوت‌های معنی‌داری در شاخص‌هایی نظیر گلبول‌های سفید(WBC) ، کراتینین خون، کلسترول، تری‌گلیسرید، آنزیم‌های کبدی(SGOT)، (SGPT) و فشار خون (سیستولیک و دیاستولیک) طی دهه گذشته مشاهده گردید(P-value < 0.05). شکل‌های ۲ و ۳ تغییرات سال‌به‌سال این شاخص‌ها را در اثر مواجهه با ترکیبات BTEX و بخارات فلزی نمایش می‌دهند.

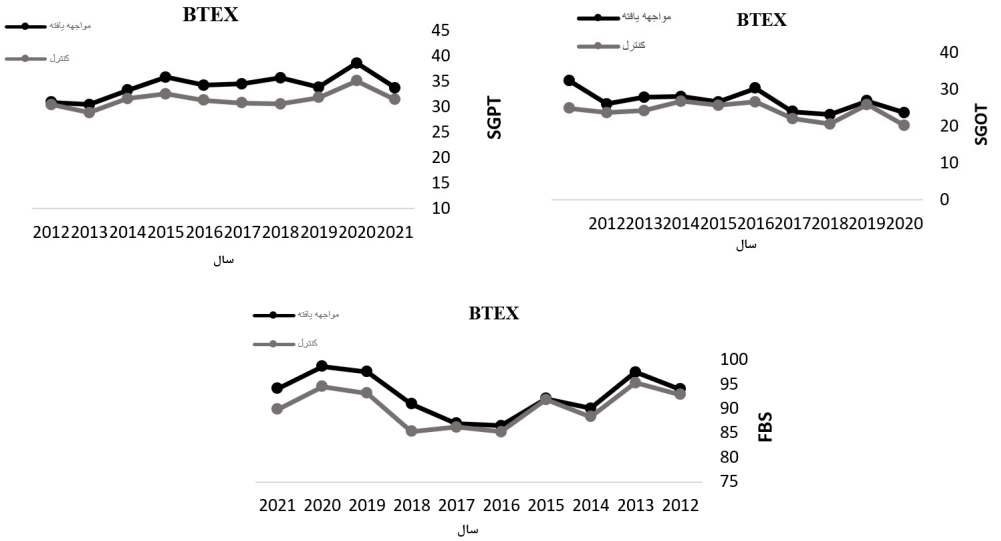
بحث

در این مطالعه، ریسک‌های ناشی از مواجهه با ترکیبات BTEX و بخارات فلزی در یک صنعت تولید تجهیزات نیروگاهی با استفاده از دو روش مورد ارزیابی قرار گرفت: روش کمی سازمان حفاظت محیط زیست ایالات متحده (EPA) برای محاسبه ریسک‌های سرطان‌زا

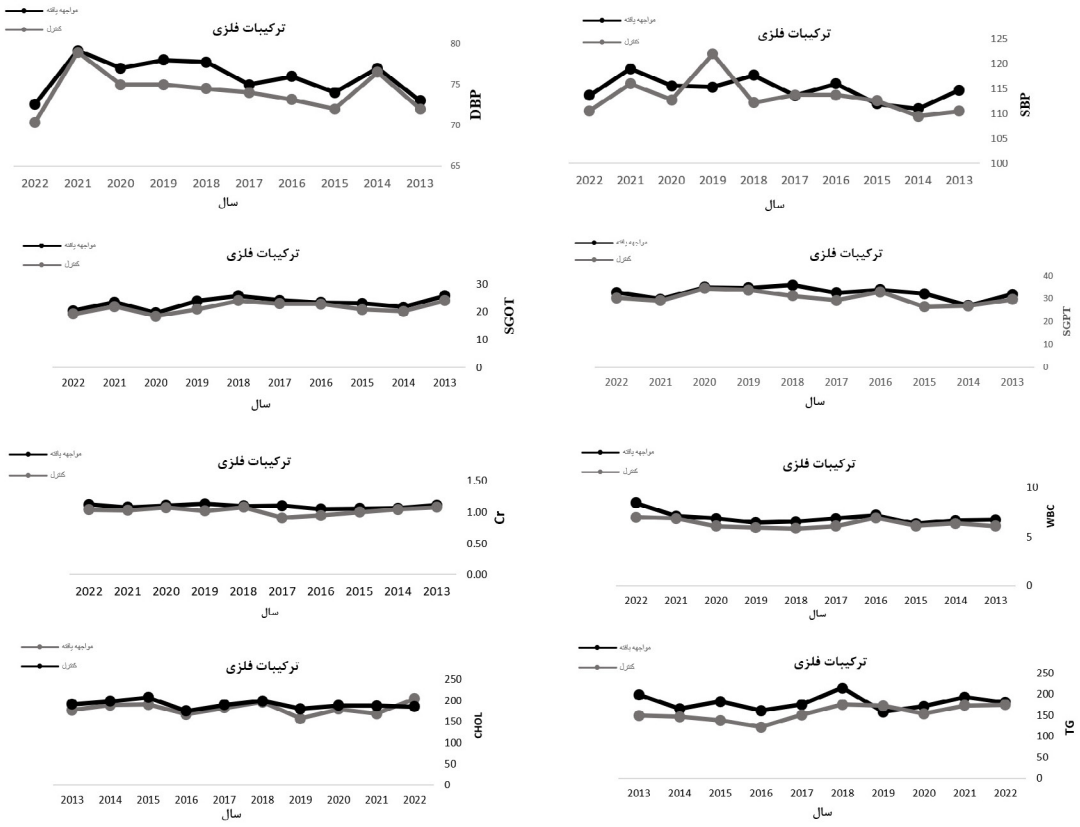


شکل ۱: تأثیر مواجهه با ترکیبات BTEX و فلزات بر پارامترهای مورد بررسی در گروه‌های مواجهه‌یافته و کنترل طی یک دوره ده‌ساله

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2026-04-02]



شکل ۲: روند سال‌به‌سال تغییرات پارامترهای تحت تأثیر مواجهه با ترکیبات BTEX



شکل ۳: روند سال‌به‌سال تغییرات پارامترهای تحت تأثیر مواجهه با فلزات

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2026-04-02]

و غیرسرطان‌زا و روش نیمه‌کمی سنگاپور. نتایج نشان داد که غلظت فلزات در میان گروه‌های شغلی مختلف دارای تفاوت‌های قابل توجهی است. غلظت کروم ۳ ظرفیتی در چندین شغل به‌طور چشمگیری بالاتر از مقدار معمول(۰۰۳/ ۰میلی گرم بر مترمکعب) بود و در بازه‌ای بین ۰/۰۱ تا۰/۱۱ میلی گرم برمترمکعب قرار داشت. همچنین، غلظت نیکل در برخی واحدها مانند مونتاژ گیربکس و کمپرسور، سنگ‌زنی و مونتاژ استاتور از حد آستانه مواجهه مجاز (۰/۲ میلی گرم بر مترمکعب) فراتر بود و در محدوده‌ای بین ۰/۰۴ تا ۶/۳۹ میلی گرم بر مترمکعب اندازه‌گیری شد. به‌طور مشابه، میزان Fe_2O_3 در عملیات جوشکاری و سنگ‌زنی نیز به‌طور معناداری از حد مجاز مواجهه شغلی تعیین‌شده توسط ACGIH (معادل ۵ میلی گرم بر مترمکعب) بیشتر بود. این یافته‌ها با نتایج مطالعات پیشین درباره بخارات فلزی حاصل از فرآیندهای جوشکاری و ماشین‌کاری مطابقت دارد، که در آن‌ها اکسید آهن و فلزات خطرناک دیگری نظیر منگنز، کروم، نیکل و کادمیوم نیز بالاتر از حدمجاز گزارش شده است (۳۴-۳۷). سایر ترکیبات اندازه‌گیری‌شده، نظیر تولوئن، اتیل‌بنزن، زایلن و نیکل (به‌جز در واحد سنگ‌زنی)، در محدوده مجاز مواجهه شغلی قرار داشتند. در مقابل، غلظت بنزن در واحدهایی مانند نقاشی، کنترل کیفیت، مونتاژ روتور و مونتاژ ۱ به‌طور قابل‌توجهی بالا بود. این موضوع احتمالاً ناشی از ناکارآمدی اقدامات کنترلی در این واحدهای کاری از جمله تهویه نامناسب، استفاده ناکافی یا نادرست از تجهیزات حفاظت فردی، و ضعف در اجرای دستورالعمل‌های کاری است که نیاز به بررسی های دوره ای و نظارت بر اقدامات کنترلی صورت گرفته را به صورت دقیق نشان می دهد. رعایت مقررات ایمنی، از جمله نصب دتکتورهای تشخیص بخارات BTEX و شیوه‌های عملیاتی مناسب، به حفظ سطح قرار گرفتن در معرض کمتر از حد مجاز کمک می‌کند (۲۳،۳۱).

ریسک سرطان‌زایی ناشی از مواجهه با بنزن، اتیل‌بنزن و نیکل نیز مورد ارزیابی قرار گرفت. بیشترین ریسک سرطان‌زایی برای بنزن در واحد کنترل کیفیت با مقدار ۳×۱۰^{-۵} مشاهده شد، در حالی‌که بیشترین ریسک برای اتیل‌بنزن در واحد نقاشی با مقدار ۵×۱۰^{-۴} به دست آمد. مواجهه با نیکل در واحد مونتاژ جعبه‌دنده و کمپرسور بالاترین ریسک را داشت (۴×۱۰^{-۲}). ریسک بالای بنزن در واحد کنترل کیفیت احتمالاً مربوط به استفاده از اسپری‌های آزمون نفوذ (penetrant test) حاوی بنزن برای شناسایی ترک‌های موجود در محصولات تولیدی مرتبط است. همچنین، استفاده گسترده از حلال‌های آلی مانند اتیل‌بنزن در واحد نقاشی، منجر به افزایش ریسک سرطان‌زایی آن شده است. در مطالعات بسیاری مقادیر ریسک سرطانزایی بنزن مورد بررسی قرار گرفته است. برای مثال، در مطالعه محبی و همکاران در سال ۲۰۲۴ که در سالن‌های زیبایی انجام شد نتایج نشان داد که تقریباً نیمی از تکنسین‌ها با سطوح بالای بنزن که بالاتر از حد مجاز بوده است مواجهه داشته اند و اثرات نامطلوب سلامتی را گزارش کرده‌اند. (۳۸). به طور مشابه، تحقیقات در پالایشگاه های نفت در ایران نشان داده است که غلظت بنزن اغلب از حد مجاز فراتر می رود، که منجر به افزایش خطر ابتلا به سرطان مادام العمر (LCR) بیشتر از $۱۰^{-۴}$ می شود (۳۹). امکان بالای ریسک سرطانزایی بنزن در این گروه شغلی، با مطالعه ی Badjagbo و همکاران که به منظور تعیین تراکم BTEX در گاراژهای تعمیر اتومبیل انجام گرفت همخوانی داشت. نتایج مطالعه مذکور نشان داد که تراکم ترکیبات اندازه گیری شده شامل تولوئن، اتیل بنزن و زایلن کم تر از مقدار مجاز مواجهه شغلی تعیین شده برای این ترکیبات است و تنها در چند گاراژ ریسک سرطان زایی بنزن بیشتر از مقدار توصیه شده توسط EPA است و بالا بودن مقدار بنزن در این چند مکان باعث بالاتر بودن ریسک در این گاراژها نیز گردیده بود (۴۰). هم چنین در مطالعه ای دیگر که توسط Larner و همکاران در کشور آرژانتین انجام گرفت از بین ترکیبات شناسایی شده میانگین غلظت بنزن در واحد رنگ با ۰/۷۷ پی پی ام بیش ترین مقدار بود. علاوه بر این، بالا بودن غلظت اتیل بنزن در بخش تعمیرات منجر به بالاتر بودن ریسک نسبی سرطان در دو بخش

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2026-04-02]

رنگ و تعمیرات شده بود (۴۱).

نکته حائز اهمیت این است که علی رغم مواجهه با غلظت های به مراتب پایین تر از حدود مجاز، اکثریت مقادیر ریسک سرطانزایی بدست آمده در محدوده ریسک امکان و احتمال قرار دارد. دلیل این امر می تواند درجه خطر بالای ترکیب بنزن باشد که باعث شده است، نسبت به سایر هیدروکربن های فرار واحد جذب تنفسی (IUR) بالاتری داشته باشد. واحد جذب تنفسی در واقع احتمال افزایش یافته ابتلا به سرطان است که در نتیجه قرارگیری طولانی‌مدت (مانند طول عمر) در مواجهه با یک ماده شیمیایی موجود در هوا با غلظت ۱ میکروگرم بر متر مکعب رخ می‌دهد. در واقع محدوده ای است که در آن احتمال ایجاد پاسخ به ازای مصرف یک واحد ماده شیمیایی در طول عمر، وجود دارد (۴۲). این یافته‌ها بر نیاز فوری به نظارت و اقدامات کنترلی مداوم در محل‌های کاری که ترکیبات BTEX در می تواند در هوای تنفسی افراد وجود داشته باشد، علی رغم پایین بودن میزان مواجهه تنفسی در طی شیفت های کاری، تأکید می‌کند (۴۳).

ریسک سرطان‌زایی ناشی از نیکل نیز در گروه‌های شغلی مختلف، به‌ویژه در عملیات جوشکاری، سنگ‌زنی و برش، مشاهده شد. در جوشکاری، این ریسک می‌تواند ناشی از مواجهه با الکترودهای جوشکاری حاوی درصد قابل‌توجهی نیکل باشد. همچنین، در واحد مونتاژ ۱ نیز ریسک بالا مشاهده شد که احتمالاً به دلیل استفاده از اسپری‌های آزمون نفوذ بوده که حاوی ترکیبات خطرناک است (۴۴،۳۱). برخلاف نتایج بدست آمده در مطالعه حاضر، یافته های پژوهش انجام شده توسط اسماعیلی و همکاران در سال ۲۰۲۴ در یک صنعت فلزی نشان داد که ریسک سرطانزایی مواجهه تنفسی با نیکل در کلیه موارد قابل قبول بوده که از جمله دلایل آن می توان به عدم تفاوت در جنس آلیاژ و الکترود های مورد استفاده در دو صنعت تحت بررسی اشاره نمود (۳۱).

بررسی های بیشتر نشان داد که ریسک بهداشتی ناشی از مواجهه با تولوئن در هیچ‌یک از گروه‌های شغلی به‌صورت قطعی مشاهده نشد، هرچند بالاترین میزان ریسک در واحد مونتاژ ۱ با مقدار ۴۰٪ گزارش گردید. این نتایج با مطالعات مشابه انجام‌شده توسط اسماعیلی و همکاران (۲۰۲۴) و کلته و همکاران (۲۰۲۰) همخوانی دارد که بر این نکته تأکید داشتند که حتی مواجهه با غلظت‌های پایین ترکیبات سرطان‌زا و غیرسرطان‌زا نیز نباید نادیده گرفته شود (۴۴،۳۱).

نتایج ارزیابی ریسک نیمه‌کمی نشان داد که اغلب ترکیبات مورد مطالعه در گروه‌های شغلی مختلف در بازه ریسک قابل چشم‌پوشی تا پایین قرار دارند. با مقایسه دو روش ارزیابی ریسک، مشخص شد که روش آژانس حفاظت محیط زیست آمریکا (EPA) که از غلظت مرجع استنشاقی (RFC) و ریسک واحد جذب تنفسی(IUR) بهره می‌گیرد، از دقت و محافظه‌کاری بیشتری برخوردار است. روش EPA عواملی نظیر مدت زمان مواجهه، وزن بدن و نرخ استنشاق را با در نظر گرفتن تفاوت‌های سنی تعدیل می‌کند و توانایی شناسایی ریسک‌ها حتی در غلظت‌های پایین را دارد. این موضوع منجر به طبقه‌بندی محافظه‌کارانه‌تر ریسک، حتی در مواجهه‌های حداقلی با مواد شیمیایی خطرناک، می‌شود. در مقابل، روش نیمه‌کمی سنگاپور از طبقه‌بندی‌ها و پارامترهای ساده‌تری استفاده می‌کند که ممکن است به ارزیابی‌های خفیف‌تری از ریسک، به‌ویژه در مواجهه‌های سطح پایین، منجر شود. این تفاوت‌ها، حساسیت بیشتر و رویکرد احتیاط‌آمیزتر روش EPA را برجسته می‌سازد(۴۵-۴۷).

مواجهه شغلی با فلزات و ترکیبات BTEX تأثیر قابل‌توجهی بر شاخص‌های خونی و بیوشیمیایی دارد و موجب افزایش خطر بروز اختلالات خونی، کبدی و کلیوی می‌شود. مطالعات متعدد Zhang و همکاران (۲۰۲۲)؛ Cokmakو همکاران، (۲۰۲۰)؛ Xu و همکاران (۲۰۲۰) تأیید کرده‌اند که مواجهه طولانی‌مدت با این ترکیبات، شاخص‌های خونی را کاهش داده و استرس اکسیداتیو را افزایش می‌دهد(۴۸-۵۰). این یافته‌ها بر ضرورت اجرای اقدامات ایمنی سخت‌گیرانه، از جمله آموزش مستمر، استفاده از تجهیزات حفاظت فردی و پایش‌های پزشکی

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2026-04-02]

منظم تأکید دارند تا اثرات سوء اولیه بر سلامت شناسایی و از بروز بیماری‌های مزمن شغلی پیشگیری شود (۵۱).

از جمله محدودیت های این مطالعه عدم در نظر گیری اثر ترکیبی و تعاملات سم شناسی ناشی از مواجهه تنفسی با بخارات ترکیبات شیمیایی مختلف با یکدیگر است که پیشنهاد می گردد مطالعات آتی بر روی ارزیابی اثرات تجمعی و هم افزایی مواجهه با ترکیبات BTEX و فلزات سنگین متمرکز شود. علاوه براین، روش‌های تحقیقاتی مانند مدل‌های ارزیابی مواجهه شغلی چند بعدی می‌توانند تعاملات بین این آلاینده‌ها و تأثیر جمعی آن‌ها بر سلامت را کمی بهتر کنند. ایجاد الگوریتم مدیریت ریسک جامع و ایجاد چرخه های مدیریت ریسک مواجهه با مواد شیمیایی با تکیه بر استفاده از روش های ارزیابی دقیق تر و متناسب با شرایط محیطی مشاغل مختلف نیز می تواند منجر به بهبود اقدامات پیشگیرانه و تضمین پایداری در کل سیستم گردد.

نتیجه گیری

ترکیبات BTEX و فلزات، خطرات جدی برای سلامت کارکنان دارند که از جمله آن‌ها می‌توان به آثار سرطانزای آن‌ها اشاره کرد. مطالعه حاضر نشان می‌دهد که حتی در مواردی که میزان مواجهه کمتر از حدود مجاز اعلام‌شده است، همچنان احتمال بروز مشکلات سلامتی در میان کارکنان وجود دارد. هر دو روش ارزیابی ریسک (روش کمی EPA و روش نیمه‌کمی سنگاپور) ابزارهای مفیدی برای بررسی مخاطرات شغلی محسوب می‌شوند، اما روش EPA به دلیل ماهیت محافظه‌کارانه و دقت بالاتر در برآورد ریسک، ارجحیت دارد. به منظور کاهش این مخاطرات، اجرای اقداماتی نظیر بهبود تهویه، استفاده مؤثر از تجهیزات حفاظت فردی، جایگزینی مواد مضر با گزینه‌های ایمن‌تر، و پایبندی به دستورالعمل‌های ایمنی ضروری است. این اقدامات می‌توانند مواجهه با ترکیبات BTEX و فلزات را کاهش داده و احتمال بروز بیماری‌های ناشی از آن‌ها را به حداقل برسانند.

تشکر و قدردانی

این مقاله بخشی از پایان نامه و طرح مصوب دانشگاه علوم پزشکی تهران با کد طرح ۶۸۰۰۳ و کد اخلاق IR.TUMS.SPH.REC.1402.162 می باشد که با حمایت دانشگاه علوم پزشکی تهران انجام شده است.

REFERENCES

1. Molaei I, Khezri SM, Sekhavatjou MS, Karbassi A, Hosseni Alhashemi A. Health risk assessment of heavy metals, BTEX and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the workplace in a secondary oil re-refining factory. J Adv Environ Health Res. 2020;8(2):79-94.
2. Ali N. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in indoor air and dust samples of different Saudi microenvironments; health and carcinogenic risk assessment for the general population. Sci Total Environ. 2019;696:133995.
3. Qu CS, Ma ZW, Yang J, Liu Y, Bi J, Huang L. Human exposure pathways of heavy metals in a lead-zinc mining area, Jiangsu Province, China. PLoS One. 2012;7(11):e46793.
4. Kalantary S, Khadem M. Occupation groups and Covid-19. J Health Saf Work. 2020;10(2):118-31.
5. Cerón Bretón JG, Cerón Bretón RM, Vivas Ucan F, Barceló Baeza C, Espinosa Fuentes MD, Ramírez Lara E, et al. Characterization and sources of aromatic hydrocarbons (BTEX) in the atmosphere of two urban sites located in Yucatan Peninsula in Mexico. Atmosphere. 2017;8(6):107.
6. Kalantary S, Golbabaei F, Latifi M, Shokrgozar MA, Yaseri M. Evaluation resistance levels of the PCL/Gt nanofiber mats during exposure to PAHs for use in the occupational setting. SN Appl Sci. 2019;1(9):1042.
7. Davey NG, Bell RJ, Gill CG, Krogh ET. Mapping

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2026-04-02]

the geospatial distribution of atmospheric BTEX compounds using portable mass spectrometry and adaptive whole air sampling. Atmos Pollut Res. 2020;11(3):545-53.

8. Yaghmaien K, Hadei M, Hopke P, Gharibzadeh S, Kermani M, Yarahmadi M, et al. Comparative health risk assessment of BTEX exposures from landfills, composting units, and leachate treatment plants. Air Qual Atmos Health. 2019;12(4):443-51.
9. US Environmental Protection Agency. Integrated risk information system (IRIS). 2014. Available from: http://www.epa.gov/iris/index.html
10. Sah D, Verma PK, Kumari KM, Lakhani A. Chemical fractionation of heavy metals in fine particulate matter and their health risk assessment through inhalation exposure pathway. Environ Geochem Health. 2019;41(3):1445-58.
11. Stihi C, Bancuta A, Popescu IV, Virgolici M, Cimpoca V, Gugiu M, et al. Air pollution studies using PIXE and ICP Methods. J Phys Conf Ser. 2006;41(1):33-40.
12. Wang S, Kalkhajeh YK, Qin Z, Jiao W. Spatial distribution and assessment of the human health risks of heavy metals in a retired petrochemical industrial area, south China. Environ Res. 2020;188:109661.
13. Wongsasuluk P, Tun AZ, Chotpantarat S, Siriwong W. Related health risk assessment of exposure to arsenic and some heavy metals in gold mines in Banmauk Township, Myanmar. Sci Rep. 2021;11(1):22843.
14. Singh M, Thind PS, John S. Health risk assessment of the workers exposed to the heavy metals in e-waste recycling sites of Chandigarh and Ludhiana, Punjab, India. Chemosphere. 2018;203:426-33.
15. Li PH, Yu J, Bi CL, Yue JJ, Li QQ, Wang L, et al. Health risk assessment for highway toll station workers exposed to PM2.5-bound heavy metals. Atmos Pollut Res. 2019;10(4):1024-30.
16. Leelapongwattana S, Bordeerat NK. Induction of genotoxicity and mutagenic potential of heavy metals in Thai occupational workers. Mutat Res Genet Toxicol Environ Mutagen. 2020;856-857:503231.
17. Jalali M, Jalali S, Motlagh M, Negahban R, Faraji V, Jahangiri M. Health risk assessment of occupational exposure to BTEX compounds in petrol refueling stations in the Mashhad city. J Neyshabur Univ Med Sci. 2014;1(1):15-25.
18. Omidi F, Fallahzadeh RA, Dehghani F, Harati B, Chamgordani SB, Gharibi V. Carcinogenic and non-carcinogenic risk assessment of exposure to volatile organic compounds (BTEX) using Monte-Carlo simulation technique in a steel industry. J Health Saf Work. 2018;8(3):223-32.
19. Foroughi P, Golbabaei F, Sadeghi-Yarandi M, Yaseri M, Fooladi M, Kalantary S. Occupational exposure, carcinogenic and non-carcinogenic risk assessment of formaldehyde in the pathology labs of hospitals in Iran. Sci Rep. 2024;14(1):12006.
20. Moshiran VA, Karimi A, Golbabaei F, Yarandi MS, Sajedian AA, Koozekonan AG. Quantitative and semiquantitative health risk assessment of occupational exposure to styrene in a petrochemical industry. Saf Health Work. 2021;12(3):396-402.
21. Sadeghi-Yarandi M, Karimi A, Ahmadi V, Sajedian AA, Soltanzadeh A, Golbabaei F. Cancer and non-cancer health risk assessment of occupational exposure to 1,3-butadiene in a petrochemical plant in Iran. Toxicol Ind Health. 2020;36(12):960-70.
22. Dehghani F, Omidi F, Fallahzadeh RA, Pourhassan B. Health risk assessment of occupational exposure to heavy metals in a steel casting unit of a steelmaking plant using Monte-Carlo simulation technique. Toxicol Ind Health. 2021;37(7):431-40.
23. National Institute for Occupational Safety and Health. NIOSH Manual of Analytical Methods (NMAM). 5th ed. 2014. Available from: https://www.cdc.gov/niosh/docs/2003-154/pdfs/7300.pdf
24. National Institute for Occupational Safety and Health. NIOSH Manual of Analytical Methods (NMAM). 5th ed. 2014. Available from: https://www.cdc.gov/niosh/docs/2003-154/pdfs/1501.pdf
25. Heibati B, Pollitt KJ, Karimi A, Charati JY, Ducatman A, Shokrzadeh M, et al. BTEX exposure assessment and quantitative risk assessment among petroleum product distributors. Ecotoxicol Environ Saf. 2017;144:445-9.
26. Abbaslou H, Ahmadi Jalaldehi P, Kalantary S,

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2026-04-02]

Azam K, Zanjani E, Shahtaheri SJ, et al. Health risk assessment of occupational exposure to heavy metals among green space Workers in Iran. Toxicol Ind Health. 2024;40(7):353-65.
27. Pourhassan B, Beigzadeh Z, Nasirzadeh N, Karimi A. Application of multiple occupational health risk assessment models for metal fumes in welding process. Biol Trace Elem Res. 2024;202(3):811-23.
28. Majewski G, Klik B, Rogula-Kozłowska W, Rogula-Kopiec P, Rybak J, Radziemska M, et al. Assessment of heavy metal inhalation risks in urban environments in Poland: A case study. J Ecol Eng. 2023;24(11):340-53.
29. Mohebbi M, Jafari AJ, Gholami M, Baghani AN, Shahsavani A, Kermani M. Measurement and health risks assessment of BTEX compounds exposure in beauty Lahijan City salons. Sci Rep. 2024;14(1):23515.
30. Al-Harbi M, Alhajri I, Whalen JK. Characteristics and health risk assessment of heavy metal contamination from dust collected on household HVAC air filters. Chemosphere. 2021;277:130276.
31. Esmaeili R, Ebrahimpour K, Esmaeili SV, Karimi A, Kamranifar M, Pour MN, et al. Chemical Health Risk Assessment of Exposure to Metal Fumes among Employed Workers in a Metal Manufactory with an Electric Arc Furnace. Int J Environ Health Eng. 2024;13(1):18-26.
32. Rezayani N, Mir Mohammadi M, Mehrdadi N. Determination of selected heavy metals in air samples and human health risk assessment in Tehran city, Iran. Iran J Chem Chem Eng. 2022;41(8):2745-56.
33. Zhao S, Zhang X, Wang J, Lin J, Cao D, Zhu M. Carcinogenic and non-carcinogenic health risk assessment of organic compounds and heavy metals in electronic cigarettes. Sci Rep. 2023;13(1):16046.
34. Dehghani F, Golbabaei F, Zakerian SA, Omidi F, Mansournia MA. Health risk assessment of exposure to volatile organic compounds (BTEX) in a painting unit of an automotive industry. Saf Health Work. 2018;9(1):55-64.
35. Mehrifar Y, Mohebian Z, Bidel H. Exploring the risk of welders' exposure to the gases and metal fumes in a shipbuilding industry: a case study. J Health Saf Work. 2020;10(2):15-28.
36. Mohammadian M, Babanezhad E, Esfandiari Y, Ramzani S. Concentration evaluation and health risk assessment of welders' exposure to total fumes and manganese during welding at metal industry. J Health Res Commun. 2020;5(4):45-56.
37. Parent ME, Turner MC, Lavoué J, Richard H, Figuerola J, Kincl L, et al. Lifetime occupational exposure to metals and welding fumes, and risk of glioma: a 7-country population-based case-control study. Environ Health. 2017;16(1):90.
38. Mohebbi M, Jafari AJ, Gholami M, Baghani AN, Shahsavani A, Kermani M. Measurement and health risks assessment of BTEX compounds exposure in beauty Lahijan City salons. Sci Rep. 2024;14(1):23515.
39. Jalilian S, Sabzalipour S, Mohammadi Rouzbahani M, Rajabzadeh Ghatrami E, Ibrahimy Ghavamabadi L. Health risk assessment of occupational exposure of refinery unit site workers to BTEX in an oil refinery company. J Health Sci Surveill Syst. 2022;10(1):134-41.
40. Badjagbo K, Loranger S, Moore S, Tardif R, Sauve S. BTEX exposures among automobile mechanics and painters and their associated health risks. Hum Ecol Risk Assess. 2010;16(2):301-16.
41. Lerner JC, Sanchez EY, Sambeth JE, Porta AA. Characterization and health risk assessment of VOCs in occupational environments in Buenos Aires, Argentina. Atmos Environ. 2012;55:440-7.
42. Du Z, Mo J, Zhang Y. Risk assessment of population inhalation exposure to volatile organic compounds and carbonyls in urban China. Environ Int. 2014;73:33-45.
43. Das A, Giri BS, Manjunatha R. Systematic review on benzene, toluene, ethylbenzene, and xylene (BTEX) emissions; health impact assessment; and detection techniques in oil and natural gas operations. Environ Sci Pollut Res Int. 2025;32(1):1-22.
44. Kalteh S, Rastkari N, Shamsipour M, Alimohammadi M, Yunesian M. Health risk assessment of

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2026-04-02]

polycyclic aromatic hydrocarbons via dietary intake of leafy vegetables. Int J Environ Anal Chem. 2022;102(18):6858-73.

45. Sadeghi-Yarandi M, Karimi A, Sajedian AA, Ahmadi V. Comparative assessment of carcinogenic risk of respiratory exposure to 1,3-Butadiene in a petrochemical industry by the US Environmental Protection Agency (USEPA) and Singapore Health Department methods. J Health Saf Work. 2019;10(3):237-50.
46. Zhu J, Su S, Wen C, Wang T, Xu H, Liu M. Application of multiple occupational health risk assessment models in the prediction of occupational health risks of n-Hexane in the air-conditioned closed workshop. Front Public Health. 2022;10:1017718.
47. Xu J, Zhao M, Pei L, Liu X, Wei L, Li A, et al. Effects of heavy metal mixture exposure on hematological and biomedical parameters mediated by oxidative stress. Sci Total Environ. 2020;705:134865.
48. Zhang Z, Liu X, Guo C, Zhang X, Zhang Y, Deng N, et al. Hematological effects and benchmark doses of long-term co-exposure to benzene, toluene, and xylenes in a follow-up study on petrochemical workers. Toxics. 2022;10(9):502.
49. Cakmak S, Cole C, Hebbern C, Andrade J, Dales R. Associations between blood volatile organic compounds, and changes in hematologic and biochemical profiles, in a population-based study. Environ Int. 2020;145:106121.
50. Xu Q, Yu F, Li F, Zhou H, Zheng K, Zhang M. Quantitative differences between common occupational health risk assessment models. J Occup Health. 2020;62(1):e12164.
51. Salem GM, Shaboun S, Algamodei YM, Almalyan MF, Althwadi EM, Zaid AA, et al. Effect of occupational exposure on hematological and biochemical parameters in workers at oil and gas companies. Mediterr J Pharm Pharm Sci. 2024;2(1):95-102.

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2026-04-02]