فصلنامه مدیریت و حقوق محیط زیست 3(1): بهار 1404: 98-83
Journal of Environmental management and law, Vol.3, Issue 1, 83-98

Journal of Environmental Management and Law
فصلنامه مدیریت و حقوق محیط زیست
https://sanad.iau.ir/en/Journal/jeml

Risk assessment of exposure to air pollutants in large-scale outdoor sports spaces in Tehran

Rasoul Sadeghi[1], Hooman Bahmanpour[2*], Farham Aminsharei[3]

[1] *MSc. on HSE, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran*
[2] *Department of HSE, Sha.C., Islamic Azad University, Shahrood, Iran*
[3] *Department of Safety, Health and Environment Engineering, NA.C., Islamic Azad University, Najafabad, Iran*

**Corresponding Author: hbahmanpour@iau.ac.ir*

Original Paper

Received: 2024.11.04
Accepted: 2025.04.30

Keywords:
Exposure risk assessment, carcinogenicity, sports spaces, nitrogen dioxide, sulfur dioxide.

Abstract

Identifying the effects and assessing the risk of exposure to air pollutants such as nitrogen dioxide (NO_2) and sulfur dioxide (SO_2) in sports spaces, especially outdoor sports spaces, is very important in order to reduce the effects of exposure and investigate the carcinogenic and non-carcinogenic risks of these pollutants. This article aims to identify the effects and assess the risk of exposure to these pollutants in large-scale outdoor sports spaces, specifically the Tehran Revolution Club. This research is of an applied type and the data collection method was library-based and direct data collection through the Tehran Air Quality Control Company database. The study period was determined for one year from June 2024 to June 2025. Data related to the concentration of the pollutants under study were obtained from stations in neighboring areas and adjusted using the mathematical averaging method. Then, based on the average measured values of nitrogen dioxide and sulfur dioxide in different seasons of the year, the average daily exposure dose values of these pollutants were calculated for the two age groups of children and adults and from the respiratory, digestive and dermal absorption routes. In the next step, based on the risk assessment formulas provided by the US Environmental Protection Agency (2014), the non-carcinogenic and carcinogenic risk index for these pollutants was obtained. The cumulative non-carcinogenic risk index of exposure to nitrogen dioxide was 2.13×10^{-5} for children and 2.29×10^{-9} for adults. Also, this index was calculated for sulfur dioxide and for children and 4.01×10^{-6} and 2.15×10^{-7} for adults. In the risk assessment for both age groups of children and adults, the amount of digestive exposure was higher than respiratory and dermal absorption. Due to the fact that the hazard index and the cumulative non-carcinogenic hazard index are smaller than one, there is no significant risk from exposure to nitrogen dioxide and sulfur dioxide. There was no carcinogenic or non-carcinogenic risk from exposure to sulfur dioxide and nitrogen dioxide pollutants at the study site.

Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Copyright: © 2023 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the

ارزیابی ریسک مواجهه با آلاینده‌های هوا در فضاهای ورزشی بزرگ مقیاس روباز در شهر تهران

رسول صادقی[1]، هومن بهمن‌پور*[2]، فرهام امین‌شرعی[3]

1- کارشناس ارشد مهندسی ایمنی، بهداشت و محیط زیست (HSE)، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

2- گروه مهندسی ایمنی، بهداشت و محیط زیست (HSE)، واحد شاهرود، دانشگاه آزاد اسلامی، شاهرود، ایران

3- استادیار مهندسی ایمنی، بهداشت و محیط زیست (HSE)، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

* پست الکترونیکی نویسنده مسئول: *hbahmanpour@iau.ac.ir*

نوع مقاله:

علمی-پژوهشی

تاریخچه مقاله:

ارسال: ۱۴۰۳/۰۸/۱۴

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۱۰

کلمات کلیدی:

ارزیابی ریسک مواجهه، سرطان‌زایی، فضاهای ورزشی، دی‌اکسید نیتروژن، دی‌اکسید گوگرد.

چکیده

شناسایی اثرات و ارزیابی ریسک مواجهه با آلاینده‌های هوا نظیر دی‌اکسید نیتروژن (NO_2) و دی‌اکسید گوگرد (SO_2) در فضاهای ورزشی به‌ویژه فضاهای ورزشی روباز به جهت کاهش اثرات مواجهه و بررسی ریسک‌های سرطان‌زایی و غیر سرطان‌زایی بودن این آلاینده‌ها، بسیار مهم است. این مقاله با هدف شناسایی اثرات و ارزیابی ریسک مواجهه با این آلاینده‌ها در فضاهای ورزشی بزرگ مقیاس روباز و اختصاصاً باشگاه انقلاب تهران انجام شده است. این تحقیق از نوع کاربردی بوده و روش‌گردآوری داده‌ها از نوع کتابخانه‌ای و برداشت مستقیم داده‌ها از طریق بانک داده شرکت کنترل کیفیت هوای تهران بوده است. بازه زمانی مورد مطالعه به مدت یک سال از خرداد ماه سال 1403 تا خرداد سال 1404 تعیین شد. داده‌های مربوط به غلظت آلاینده‌های مورد مطالعه، از ایستگاه‌های مناطق همجوار اخذ و با روش میانگین‌گیری ریاضی تطبیق داده شدند. سپس، براساس متوسط مقادیر اندازه‌گیری شده دی‌اکسیدنیتروژن و دی‌اکسید گوگرد در فصول مختلف سال، مقادیر میانگین دوز مواجهه روزانه این آلاینده‌ها برای دو گروه سنی کودکان و بزرگسالان و از مسیرهای تنفسی، گوارش و جذب پوستی محاسبه شد. در مرحله بعد براساس فرمول‌های ارزیابی ریسک ارائه شده توسط آژانس حفاظت محیط‌زیست آمریکا (2014)، شاخص خطر غیرسرطان‌زایی و سرطان‌زایی برای این آلاینده‌ها بدست آمد. شاخص خطر تجمعی غیرسرطان‌زایی مواجهه با دی‌اکسید نیتروژن برای کودکان $2/13 \times 10^{-5}$ و برای بزرگسالان $2/29 \times 10^{-6}$ بوده است. همچنین این شاخص برای دی‌اکسید گوگرد و در مورد کودکان $4/01 \times 10^{-6}$ و برای بزرگسالان $2/15 \times 10^{-7}$ محاسبه شد. در ارزیابی ریسک برای هر دو گروه سنی کودک و بزرگسال، میزان مواجهه گوارشی بیشتر از تنفسی و جذب پوستی بوده است. به علت کوچک‌تر بودن شاخص خطر و شاخص خطر تجمعی غیرسرطان‌زایی از عدد یک، هیچ خطر مهمی در مواجهه با دی‌اکسید نیتروژن و دی‌اکسید گوگرد، وجود ندارد. در سایت مطالعاتی هیچ‌گونه خطر سرطان‌زایی و غیرسرطان‌زایی در مواجهه با آلاینده دی‌اکسید گوگرد و دی‌اکسید نیتروژن وجود نداشته است.

مقدمه

آلودگی هوا یکی از مهم‌ترین عواملی است که کیفیت زندگی انسان را تحت تأثیر قرار می‌دهد و اثرات سوئی بر سلامت انسان می‌گذارد. این اثرات باعث تغییرات بیوشیمیایی و فیزیولوژیکی در بدن می‌گردند که در نهایت به بیماری شدید و حتی مرگ منتهی می‌شود (Arnesano et al., 2016). زندگی در هوای آلوده و انجام فعالیت‌های روزمره و فعالیت‌های ورزشی نگرانی‌های زیادی را برای افراد در معرض آلودگی هوا ایجاد کرده است (Fashi, 2023). در سال ۲۰۱۳ آلودگی هوا و ذرات معلق به عنوان ترکیبات سرطان‌زای درجه ۱ برای انسان طبقه‌بندی شده‌اند (International Agency for Research on Cancer, 2013). آلودگی هوا چهارمین عامل خطر برای مرگ منتسب در دنیا و همچنین هفتمین عامل خطر در ایران است. طبق بررسی‌های انجام شده توسط سازمان بهداشت جهانی، هر سال در اثر آلودگی هوا بیش از چهار میلیون نفر دچار مرگ زودرس می‌شوند (WHO, 2017). بر اساس گزارش بانک جهانی، خطراتی که آلودگی هوا بر سلامت می‌تواند داشته باشد در کشورهای در حال توسعه بیشترین میزان است (W.B.Reports, 2015). فعالیت‌های صنعتی مهم‌ترین علت انتشار آلاینده‌ها به محیط‌زیست هستند و این مسئله پیامدهای مختلفی را به زندگی انسان‌ها تحمیل می‌نماید. یکی از اصلی‌ترین پیامدها، مواجهه گروه‌های مختلف جامعه با انواع آلاینده‌های محیطی است که در دهه‌های اخیر به یکی از دغدغه‌های اصلی جوامع بشری تبدیل شده است. مواجهه انسان با آلاینده‌های محیطی اثرات بهداشتی متعددی را در بردارد. الگوی مواجهه افراد با آلاینده‌های محیطی بسیار متفاوت و وابسته به فرهنگ و عملکرد آن‌ها در جامعه است (Zare Jeddi et al., 2015).

امروزه ورزش در تأمین بهداشت و سلامتی جسمی و روحی انسان‌ها بسیار مؤثر است. بقراط ورزش را بخش تفکیک‌ناپذیر موضوع سلامت و تندرستی می‌داند. یافته‌های علمی حاکی از آن است که انجام فعالیت‌های ورزشی در پیشگیری از انواع بیماری‌ها مؤثر است و هجوم بیماری‌های حاد در دوران پیری را به تأخیر می‌اندازد. بنابراین ورزش و فعالیت‌های بدنی هر روز اهمیت بیشتری می‌یابد و نقش مهمی در برقراری و حفظ سلامت افراد، ایجاد می‌کند (Hosseinpour et al., 2018). ورزشکاران به دلیل تحرک بالا، بیش از افراد عادی آلاینده‌ها را وارد بدن خود می‌کنند. به طوری که خستگی زودهنگام بسیاری از ورزشکاران، ناشی از ورود آلاینده‌ها به جای اکسیژن به دستگاه تنفسی آن‌ها است (Mohaghegh & Hajian, 2013; Florida-James et al., 2004). ورزشکاران به دلیل تحرک بالا، بیش از افراد عادی، آلاینده‌ها را وارد بدن خود می‌کنند و خستگی زودهنگام بسیاری از ورزشکاران ناشی از ورود آلاینده‌ها به جای اکسیژن به دستگاه تنفسی آن‌ها است (Lippi et al., 2008).

تهران شهری است که با مشکلات محیط‌زیستی آلودگی هوا روبه‌روست. از عوامل طبیعی مؤثر در ایجاد این مسئله می‌توان به احاطه‌شدن شهر با کوه‌ها، نبود بادهای مداوم با سرعت مناسب و بارش کم، اشاره کرد (Noorpoor & Sadri Jahanshahi, 2014). سالانه در شهر تهران بیش از 4 هزار و 400 نفر بر اثر آلودگی هوا جان خود را از دست می‌دهند. آمارها نشان می‌دهد که در روزهای تشدید آلودگی هوای تهران، شمار بیماران تنفسی «تا ۶۰ درصد» افزایش می‌یابد (Azizi, 2006). آلودگی هوا نه تنها موجب به خطر افتادن سلامتی و افزایش مرگ و میر بیماران شده، بلکه بر کارکرد ورزشی ورزشکاران نیز تأثیر سوء دارد. مطالعات متعددی نشان داده‌اند که اثرات سوء آلاینده‌های هوا بر انسان با افزایش فعالیت فیزیکی، افزایش یافته و مواجهه با آلاینده‌های هوا در حین ورزش بر کارکرد ریوی و کارایی ورزشکاران تأثیر منفی دارد. با این وجود در خصوص تأثیرات بلندمدت آلودگی هوا برکارآیی ورزشکاران هنوز تحقیقی صورت نگرفته است و مطالعات صورت گرفته صرفاً بر اثرات حاد آلودگی هوا بر کارایی ورزشکاران تأکید دارد. از طرف دیگر با توجه به اهمیت فعالیت فیزیکی و نقش آن در تندرستی عموم افراد جامعه و فراگیر شدن ورزش در میان اقشار مختلف مردم و بیماران ساکن در شهرهای بزرگ، همواره این سؤال برای آنان مطرح بوده که در چه ساعتی از شبانه‌روز به انجام ورزش بپردازند تا کمتر تحت تأثیر اثرات سوء آلاینده‌های هوا قرار گیرند (Mohaghegh & Hajian, 2013).

علاوه بر این، واکنش‌های افراد مختلف به آلاینده‌ها بسته به سن، وضعیت سلامتی، سطح آمادگی بدنی و ژنتیک آن‌ها متفاوت است. به‌ویژه، کودکان و افراد مسن به‌طور معمول حساسیت بیشتری نسبت به آلودگی هوا دارند. هنوز مشخص نیست که چه مقدار از این تفاوت‌ها باید در ارزیابی ریسک سلامت در فضاهای ورزشی لحاظ شود. لذا مدل‌هایی که این تفاوت‌ها را به‌خوبی در ارزیابی‌های خود وارد کنند، محدود هستند. برخی از ورزشکاران و تماشاچیان به‌صورت مکرر در مجموعه‌های ورزشی بزرگ حضور می‌یابند و به‌طور پیوسته در معرض آلودگی هوا قرار می‌گیرند. اثرات بلندمدت مواجهه با آلاینده‌ها در این افراد و رابطه‌ی میان این مواجهه‌ی مکرر و بروز مشکلات جدی سلامتی به‌طور کامل شناخته نشده است. به ویژه برای افرادی که در طولانی‌مدت در معرض این شرایط قرار دارند، پیش‌بینی و ارزیابی دقیق خطرات بسیار مهم است. از آنجا که تمامی فعالیت‌های انسانی با ریسک همراه است، ارزیابی و تعیین میزان ریسک اقدامات و فعالیت‌ها می‌تواند به عنوان ابزاری در برنامه‌ریزی و مدیریت اقدامات آتی به کار آید (Hu et al., 2009). ارزیابی خطر سلامت، فرآیندی است که به کمک آن تأثیرات بالقوه آلاینده‌ها بر سلامت افراد تخمین زده می‌شود.

دی‌اکسید نیتروژن برای سلامت انسان نگران‌کننده است زیرا قابل حل بوده و می‌تواند توسط پوشش مخاطی حفره نازوفارنکس جذب شود، جایی که به‌اسید نیترو و نیتریک تبدیل می‌شود. خاصیت اکسیدکنندگی دی‌اکسید نیتروژن پس از مواجهه حاد با مقدار ۵۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰ قسمت در میلیارد (ppb) می‌تواند باعث بیماری‌های تنفسی مانند تحریک گلو، سرفه و تنگی نفس شود. مقاومت در برابر عفونت‌های تنفسی نیز می‌تواند در مواجهه با دی‌اکسید نیتروژن با مقدار کمتر از 500 ppb کاهش یابد (Carlisle et al., 2001). دی‌اکسید نیتروژن اثر تحریک‌کننده‌ی شدیدی بر دستگاه تنفسی دارد و می‌تواند منجر به بروز آسم، بیماری‌های مجاری تنفسی، تحریک چشم، بینی و گلو و مجاری تنفسی و سرطان ریه شود (Bai et al., 2021). دی‌اکسید نیتروژن در بیماران آسمی و دچار بیماری‌های مزمن انسدادی ریه و کودکان کم سن و سال، سبب اشکال در عملکرد ریوی و افزایش میزان عفونت‌های تنفسی می‌شود. دی اکسید گوگرد گازی سوزاننده است که معمولاً در گذر از بینی حذف می‌شود. برای ایجاد اثرات سوء بر سلامتی انسان، لازم است تنفس دهانی وجود داشته باشد که در فعالیت‌های با شدت متوسط به طور غیر ارادی وجود دارد (Mohaghegh & Hajian, 2013). پارامترهای مواجهه، پارامترهای پایه‌ای هستند که رفتار تماس ساکنان و ویژگی‌های محیطی که در معرض آن قرار دارند را توصیف می‌کنند. این عوامل نقش مهمی در تعیین دقت ارزیابی ریسک سلامت محیطی دارند. اگر آلاینده‌ها بتوانند به‌صورت کمی در اجزای محیطی (هوا، آب، خاک و ...) اندازه‌گیری شوند، هرچه مقدار پارامتر مواجهه به ارزیابی واقعی میزان تماس ساکنان نزدیک‌تر باشد، نتایج ارزیابی مواجهه و ریسک سلامت محیطی، دقیق‌تر خواهد بود. ارزیابی ریسک سلامت، روشی برای سنجش ارتباط میان میزان آلودگی‌های محیط زیستی و سلامت انسان است. این روش با برآورد احتمال بروز اثرات منفی ناشی از تماس با آلاینده‌ها بر ساکنان، امکان ارزیابی تأثیر این تماس‌ها بر سلامت انسان را فراهم می‌سازد (Bai et al., 2021). ارزیابی ریسک محیط زیستی، فرآیند تحلیل کیفی پتانسیل‌های خطر و ضریب بالفعل شدن ریسک‌های بالقوه موجود در منطقه یا پروژه مورد نظر و همچنین حساسیت یا آسیب‌پذیری محیط پیرامونی است. هدف عمده از آنالیز و ارزیابی ریسک، تعیین میزان عدم قطعیت سیستم مورد مطالعه و هزینه ناشی از آن و ارائه راهکارهای کاهش آن و همچنین تجمع هزینه راهکار مربوطه است (Bahmanpour et al., 2020). ارزیابی خطر سلامت در واقع فرآیندی علمی برای شناسایی و تخمین اثرات بالقوه یک عامل شیمیایی، فیزیکی و یا حتی روانشناختی روی یک جمعیت مشخص انسانی، تحت شرایط معین و دریک دوره زمانی خاص است، که این یک روش منطقی برای تعیین اندازه کمی و کیفی خطرات و بررسی پیامدهای بالقوه ناشی از خطرات احتمالی بر روی جمعیت انسانی در معرض است (Shojaee Barjoee et al., 2019).

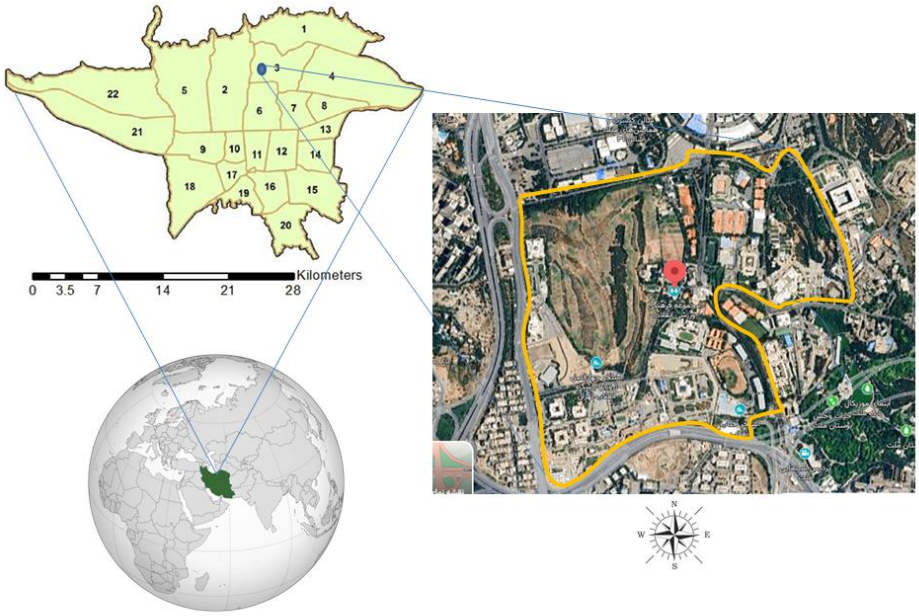
مجموعه‌های ورزشی و یا استادیوم‌های فوتبال بزرگ که در مجاورت مراکز شهری پرتردد احداث شده‌اند و در روزهای متعدد میزبان برگزاری مسابقات هستند نیز یکی دیگر از مراکز انتشار آلاینده‌های هوا به‌شمار می‌روند. در این میان، دو نکته مهم حائز اهمیت است:

اول آن که شرایط استاندارد به لحاظ ایمنی، محیطزیستی و بهداشتی برای حضور تماشاگران فراهم باشد، و دوم آن که، تعداد تماشاگران و طرفداران ورزشی زمینه‌ساز ایجاد مشکلات ثانویه نگردد (Kalooti et al., 2025).

مواد و روش‌ها

معرفی سایت مطالعاتی

در این تحقیق، فضاهای ورزشی بزرگ مقیاس روباز شهری مورد نظر بوده است. بدین منظور اختصاصاً باشگاه انقلاب تهران به عنوان سایت مطالعاتی انتخاب شده است (شکل 1). مجموعه ورزشی انقلاب در شمال غربی منطقه ۳ شهرداری تهران به وسعت ۸۱ هکتار و در محدوده جغرافیایی ۳۵ درجه و ۴۶ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۴۷ دقیقه عرض شمالی و ۵۱ درجه و ۲۳ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۲۵ دقیقه طول شرقی در بخش کوهپایه‌ای شهر تهران واقع شده است. از شمال به مجموعه نمایشگاه بین‌المللی، از ضلع شرقی، به صدا و سیما، از ضلع غربی، به خیابان سئول و از ضلع جنوبی، به بزرگراه آیت‌الله هاشمی رفسنجانی مرتبط است.



شکل 1- موقعیت جغرافیایی باشگاه انقلاب تهران

Fig. 1- Geographical location of Enghelab Sport Complex, Tehran

روش پژوهش

تحقیق حاضر به لحاظ هدف، از نوع کاربردی، به لحاظ زمان، از نوع مقطعی و به لحاظ روش گردآوری داده‌ها، از نوع ترکیبی (کتابخانه‌ای-میدانی) و به لحاظ روش تجزیه و تحلیل داده‌ها، از نوع تطبیقی - تحلیلی است. روش گردآوری داده‌ها در تحقیق حاضر، از نوع کتابخانه‌ای و استفاده از بانک داده شرکت کنترل کیفیت هوای تهران بوده است. بدین صورت که براساس موقعیت ایستگاه‌های سنجش مناطق پیرامونی باشگاه انقلاب تهران، اقدام به استخراج داده‌ها و میانگین‌گیری به روش ریاضی گردید. بازه زمانی مورد مطالعه یک سال بوده است (از خرداد ماه سال 1403 تا خرداد ماه سال 1404).

ارزیابی ریسک سلامت فرآیند چند مرحله است که بر اساس روش ارزیابی ریسک سلامت ارائه شده توسط آژانس حفاظت محیط‌زیست ایالات متحده[1] برای دو طبقه سنی کودک و بزرگسال انجام شده است.

میانگین دوز مواجهه روزانه آلاینده (ADD)

انسان‌ها از طریق سه مسیر اصلی در معرض آلاینده‌ها قرار می‌گیرند: استنشاق[2]، گوارش مستقیم[3] و تماس پوستی[4] که به ترتیب از روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$ADD_{inh} = \frac{C \times R_{inh} \times EF \times ED}{BW \times AT \times PEF}$$

$$ADD_{ing} = \frac{C \times R_{ing} \times EF \times ED \times CF}{BW \times AT}$$

$$ADD_{dermal} = \frac{C \times SA \times SL \times ABS \times EF \times ED \times CF}{BW \times AT}$$

در روابط فوق پارامترهای ADDinh، ADDing، و ADDdermal به ترتیب مقادیر میانگین دوز مواجهه روزانه آلاینده برحسب میلی‌گرم بر کیلوگرم در روز از طریق استنشاق، گوارش و جذب پوستی است.

C: غلظت آلاینده شبیه‌سازی شده برحسب میلی‌گرم بر مترمکعب

BW: وزن متوسط بدن که برای کودکان ۱۵ کیلوگرم و برای بزرگسالان ۷۰ کیلوگرم در نظر گرفته می‌شود.

RInh: نرخ استنشاق که برای کودکان برابر با ۷/۶ و برای بزرگسالان ۲۰ مترمکعب در روز در نظر گرفته می‌شود.

RIng: نرخ گوارش که برای کودکان برابر با ۲۰۰ و برای بزرگسالان برابر با ۱۰۰ میلی‌گرم در روز است.

PEF: بیانگر فاکتور انتشار که برای دو طبقه سنی ۱/۳۶×۱۰۹ برحسب مترمکعب بر کیلوگرم است.

SA: ناحیه‌ای از پوست که در تماس با ذرات هوابرد است و مقدار این پارامتر برای کودکان برابر با ۲۸۰۰ سانتیمتر مربع و برای بزرگسالان، ۵۷۰۰ سانتی‌متر مربع است.

SL: فاکتور چسبندگی پوست که برای کودکان برابر با ۰/۲ میلی‌گرم بر متر مکعب و برای بزرگسالان برابر با ۰/۰۷ میلی‌گرم بر مترمکعب است.

EF: بیانگر فراوانی مواجهه و مقدار آن برابر با ۱۸۰ روز در سال برای هر دو طبقه سنی است.

ED: بیانگر زمان مواجهه که برای کودکان برابر با ۶ ساعت و برای بزرگسالان برابر با ۲۴ ساعت.

AT: بیانگر زمان میانگین که برای ریسک‌های سرطانی برابر با ۳۶۵×۷۰ روز و برای ریسک‌های غیرسرطانی ۳۶۵×ED روز، برای هردو طبقه سنی است.

ABS: فاکتور جذب پوستی که برای هر دو طبقه سنی برابر با ۰/۰۰۱ (بدون واحد) در نظر گرفته می‌شود.

CF: فاکتور تبدیل که مقدار آن برابر ۶-۱۰×۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم است.

شاخص خطر برای اثرات غیر سرطان‌زایی

پس از این که دوز مواجهه روزانه آلاینده محاسبه شد، شاخص خطر غیرسرطان‌زایی (HQ_i) براساس تقسیم دوز مواجهه روزانه از هر یک از مسیرها به یک دوز مرجع خاص (RfD) با استفاده از رابطه زیر محاسبه گردید.

[1] EPA
[2] Inhalation
[3] Ingestion
[4] Dermal

$$HQ_i = \frac{ADD_i}{RfD_i}$$

ADD_i: مقدار میانگین دوز مواجهه روزانه آلاینده از طریق هر یک از سه مسیر تنفس، گوارش و جذب پوستی (میلی‌گرم برکیلوگرم در روز).

RfD_i: دوز مرجع که برآورد حداکثر خطرپذیری در جمعیت انسانی از طریق مواجهه روزانه با آلاینده در طول عمر است و بر حسب میلی‌گرم بر کیلوگرم در روز در نظر گرفته می‌شود.

اگر میانگین جذب روزانه کمتر از جذب مرجع باشد، هیچ اثر نامطلوبی بر سلامتی نخواهد داشت، در غیر این‌صورت اگر مقدار جذب روزانه بالاتر از RfD_i باشد، احتمال دارد باعث اثر نامطلوب بر روی سلامت انسان شود.

اگر $HQ \leq 1$ باشد، با سلامت انسان ناسازگار نیست و اگر $HQ \geq 1$ باشد، اثر نامطلوب و نگران کننده‌ای بر سلامت انسان دارد. مقدار شاخص خطر تجمعی غیر سرطان‌زایی (HI) کل مسیرها برای هر دو گروه کودک و بزرگسال از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$HI = \sum HQ_i$$

شاخص خطر تجمعی غیرسرطان‌زایی (HI) نمایانگر شدت اثرات نامطلوب کل مسیرهای مواجهه انسان با آلاینده است. اگر مقدار $HI \leq 1$ باشد، اعتقاد بر این است که هیچ خطر مهمی برای اثرات خطر تجمعی غیرسرطان‌زایی وجود ندارد و اگر $HI \geq 1$ باشد، به این معنی است که شانس زیادی برای اثرات خطر تجمعی غیرسرطان‌زایی و احتمال افزایش با افزایش مقدار HI وجود دارد.

ارزیابی خطرات سرطان‌زایی

ارزیابی خطر سرطان‌زایی هر یک از مسیرهای سه‌گانه مواجهه با آلاینده با استفاده از رابطه زیر انجام شده است.

$$Carcinogenic\ Risk\ \ CR = \sum ADD_i \times SF_i$$

در رابطه بالا، CR خطر سرطان‌زایی، ADD_i مقدار میانگین دوز مواجهه روزانه آلاینده از هر یک از مسیرهای مواجهه (میلی‌گرم بر کیلوگرم در روز) و SF_i فاکتور احتمال ابتلا به سرطان در هر واحد قرارگیری در معرض آلاینده (میلی‌گرم بر کیلوگرم در روز) است. خطر سرطان‌زایی به احتمال ابتلای یک فرد به هر نوع سرطان در اثر مواجهه مادام‌العمر با عوامل سرطان‌زا اشاره دارد. آژانس حفاظت محیط زیست ایالات متحده (EPA) خطرات سرطان در بازه 10^{-6} (یعنی ۱ نفر از هر 1/000/000 نفر) تا 10^{-4} (یعنی ۱ نفر از هر 10/000 نفر) را به‌طور کلی قابل قبول در نظر گرفته است. خطرات سرطان بالاتر از 10^{-4} ممکن است از نظر حفاظتی کافی تلقی نشوند و در بسیاری موارد نیازمند اقدامات اصلاحی باشند (Bixapathi et al., 2021; Mohammed, 2017).

نتایج

برای ارزیابی خطر سرطان‌زایی و غیرسرطان‌زایی بودن آلاینده‌ها بر اساس روش ارزیابی خطر سلامت ارائه شده توسط آژانس حفاظت محیط‌زیست آمریکا، ابتدا مقادیر میانگین دوز مواجهه روزانه با هر یک از آلاینده‌ها برای هر دو گروه سنی محاسبه شده و سپس با قرارگیری این مقادیر در فرمول‌های ارزیابی ریسک EPA، ارزیابی خطر سلامت صورت گرفت. نتایج حاصل از متوسط غلظت دی‌اکسید نیتروژن و میانگین غلظت آن در جدول 2 آمده است.

جدول 2- میانگین غلظت‌های متوسط NO_2 پراکنش یافته در فصول مختلف

Table 2- Mean Concentrations of Dispersed NO_2 During Different Seasons

متوسط زمانی		متوسط غلظت (ppb)	میانگین غلظت متوسط (ppb)	C (mg/m³)
۲۴ ساعته	پاییز و زمستان	۵۶/۸۵	۵۰/۲۵	۰/۰۹۴
	بهار و تابستان	۴۳/۶۶		

محاسبات مربوط به نتایج مقادیر میانگین دوز مواجهه روزانه دی‌اکسید نیتروژن از همه مسیرها در کودکان برای ریسک‌های سرطان‌زایی به شرح زیر است:

$$ADD_{inh} = \frac{C \times R_{inh} \times EF \times ED}{BW \times AT \times PEF} = \frac{0.094 \times 7.6 \times 180 \times 6}{15 \times 70 \times 365 \times 1.36 \times 10^9} = 1.48 \times 10^{-12}$$

$$ADD_{ing} = \frac{C \times R_{ing} \times EF \times ED \times CF}{BW \times AT} = \frac{0.094 \times 200 \times 180 \times 6 \times 10^{-6}}{15 \times 70 \times 365} = 5.29 \times 10^{-8}$$

$$ADD_{dermal} = \frac{C \times SA \times SL \times ABS \times EF \times ED \times CF}{BW \times AT} = \frac{0.094 \times 2800 \times 0.2 \times 0.001 \times 180 \times 6 \times 10^{-6}}{15 \times 70 \times 365} = 1.48 \times 10^{-10}$$

محاسبات مربوط به نتایج مقادیر میانگین دوز مواجهه روزانه دی‌اکسید نیتروژن از همه مسیرها در کودکان برای ریسک‌های غیرسرطان‌زایی به شرح زیر است:

$$ADD_{inh} = \frac{C \times R_{inh} \times EF \times ED}{BW \times AT \times PEF} = \frac{0.094 \times 7.6 \times 180 \times 6}{15 \times 6 \times 365 \times 1.36 \times 10^9} = 1.72 \times 10^{-11}$$

$$ADD_{ing} = \frac{C \times R_{ing} \times EF \times ED \times CF}{BW \times AT} = \frac{0.094 \times 200 \times 180 \times 6 \times 10^{-6}}{15 \times 6 \times 365} = 6.18 \times 10^{-7}$$

$$ADD_{dermal} = \frac{C \times SA \times SL \times ABS \times EF \times ED \times CF}{BW \times AT} = \frac{0.094 \times 2800 \times 0.2 \times 0.001 \times 180 \times 6 \times 10^{-6}}{15 \times 6 \times 365} = 1.73 \times 10^{-9}$$

محاسبات مربوط به نتایج مقادیر میانگین دوز مواجهه روزانه دی‌اکسید نیتروژن از همه مسیرها در بزرگسالان برای ریسک‌های سرطان‌زایی به شرح زیر است:

$$ADD_{inh} = \frac{C \times R_{inh} \times EF \times ED}{BW \times AT \times PEF} = \frac{0.094 \times 20 \times 180 \times 24}{70 \times 70 \times 365 \times 1.36 \times 10^9} = 3.33 \times 10^{-12}$$

$$ADD_{ing} = \frac{C \times R_{ing} \times EF \times ED \times CF}{BW \times AT} = \frac{0.094 \times 100 \times 180 \times 24 \times 10^{-6}}{70 \times 70 \times 365} = 2.27 \times 10^{-8}$$

$$ADD_{dermal} = \frac{C \times SA \times SL \times ABS \times EF \times ED \times CF}{BW \times AT} = \frac{0.094 \times 5700 \times 0.07 \times 0.001 \times 180 \times 24 \times 10^{-6}}{70 \times 70 \times 365} = 4.22 \times 10^{-10}$$

محاسبات مربوط به نتایج مقادیر میانگین دوز مواجهه روزانه دی‌اکسید نیتروژن از همه مسیرها در بزررگسالان برای ریسک‌های غیرسرطان‌زایی به شرح زیر است:

$$ADD_{inh} = \frac{C \times R_{inh} \times EF \times ED}{BW \times AT \times PEF} = \frac{0.094 \times 20 \times 180 \times 24}{70 \times 24 \times 365 \times 1.36 \times 10^9} = 9.73 \times 10^{-12}$$

$$ADD_{ing} = \frac{C \times R_{ing} \times EF \times ED \times CF}{BW \times AT} = \frac{0.094 \times 100 \times 180 \times 24 \times 10^{-6}}{70 \times 24 \times 365} = 6.62 \times 10^{-8}$$

$$ADD_{dermal} = \frac{C \times SA \times SL \times ABS \times EF \times ED \times CF}{BW \times AT} = \frac{0.094 \times 5700 \times 0.07 \times 0.001 \times 180 \times 24 \times 10^{-6}}{70 \times 24 \times 365} = 1.23 \times 10^{-9}$$

نتایج مقادیر میانگین دوز مواجهه روزانه دی‌اکسید نیتروژن برحسب میلی‌گرم بر کیلوگرم در روز از طریق استنشاق، گوارش و جذب پوستی در جدول 3 ارائه شده است.

جدول 3- مقادیر میانگین دوز روزانه مواجهه (ADD) NO_2 در هر یک از مسیرها برای گروه‌های مواجهه

Table 3- Mean Values of Average Daily Dose (ADD) of NO_2 for Each Route Across Exposure Groups (mg/kg.day)

گروه‌های مواجهه/ طبقه سنی	نوع ریسک	ADD_{inh}	مواجهه ۲۴ ساعته ADD_{ing}	ADD_{dermal}
کودکان	سرطانی	۱/۴۸×۱۰$^{-۱۲}$	۵/۲۹×۱۰$^{-۸}$	۱/۴۸×۱۰$^{-۱۰}$
	غیرسرطانی	۱/۷۲×۱۰$^{-۱۱}$	۶/۱۸×۱۰$^{-۷}$	۱/۷۳×۱۰$^{-۹}$
بزرگسالان	سرطانی	۳/۳۳×۱۰$^{-۱۲}$	۲/۲۷×۱۰$^{-۸}$	۴/۲۲×۱۰$^{-۱۰}$
	غیرسرطانی	۹/۷۳×۱۰$^{-۱۲}$	۶/۶۲×۱۰$^{-۸}$	۱/۲۳×۱۰$^{-۹}$

محاسبات مربوط به نتایج شاخص خطر و شاخص خطر تجمعی غیرسرطان‌زایی از هر یک از مسیرهای مواجهه با دی‌اکسید نیتروژن برای کودکان به شرح زیر است:

$$HQ_i = \frac{ADD_i}{RfD_i}$$

$$HQ_{inh} = \frac{1.72 \times 10^{-11}}{0.029} = 5.93 \times 10^{-10}$$

$$HQ_{ing} = \frac{6.18 \times 10^{-7}}{0.029} = 2.13 \times 10^{-5}$$

$$HQ_{dermal} = \frac{1.73 \times 10^{-9}}{0.029} = 5.96 \times 10^{-8}$$

$$HI = \sum HQ_i = (5.93 \times 10^{-10}) + (2.13 \times 10^{-5}) + (5.96 \times 10^{-8}) = 2.13 \times 10^{-5}$$

محاسبات مربوط به نتایج شاخص خطر و شاخص خطر تجمعی غیر سرطان‌زایی از هر یک از مسیرهای مواجهه با دی‌اکسید نیتروژن برای بزرگسالان به شرح زیر است:

$$HQ_i = \frac{ADD_i}{RfD_i}$$

$$HQ_{inh} = \frac{9.73 \times 10^{-12}}{0.029} = 3.35 \times 10^{-10}$$

$$HQ_{ing} = \frac{6.62 \times 10^{-8}}{0.029} = 2.28 \times 10^{-6}$$

$$HQ_{dermal} = \frac{1.23 \times 10^{-9}}{0.029} = 1.45 \times 10^{-8}$$

$$HI = \sum HQ_i = (3.35 \times 10^{-10}) + (2.28 \times 10^{-6}) + (1.45 \times 10^{-8}) = 2.29 \times 10^{-9}$$

نتایج ارزیابی خطر سلامت مواجهه با دی‌اکسید نیتروژن در گروه‌های مورد بررسی در بازه‌ی زمانی ۲۴ ساعته در جدول 4 نشان داده شده است.

جدول 4- مقادیر شاخص خطر و شاخص خطر تجمعی غیرسرطانی و ریسک سرطانی مواجهه ۲۴ ساعته با NO_2

Table 4. Values of Non-Carcinogenic Hazard Index (HI), Cumulative Non-Carcinogenic Hazard Index (HIC), and Carcinogenic Risk from 24-Hour Exposure to NO_2

R_{total}	HI	HQ_{dermal}	HQ_{ingest}	HQ_{inhal}	گروه مواجهه
-	۲/۱۳×۱۰^-۵	۵/۹۶×۱۰^-۸	۲/۱۳×۱۰^-۵	۵/۹۳×۱۰^-۱۰	کودکان
-	۲/۲۹×۱۰^-۶	۱/۴۵×۱۰^-۸	۲/۲۸×۱۰^-۶	۳/۳۵×۱۰^-۱۰	بزرگسالان

نتایج حاصل از متوسط غلظت دی‌اکسید گوگرد و میانگین غلظت آن در جدول 5 آمده است.

جدول 5- میانگین غلظت‌های متوسط SO_2 پراکنش یافته در فصول مختلف

Table 5- Mean Concentrations of Dispersed SO_2 Across Different Seasons

متوسط زمانی		متوسط غلظت (ppb)	میانگین غلظت متوسط (ppb)	C (mg/m³)
۲۴ ساعته	پاییز و زمستان	۶/۴۵	۵/۳۳	۰/۰۱۴
	بهار و تابستان	۴/۲۲		

محاسبات مربوط به نتایج مقادیر میانگین دوز مواجهه روزانه دی‌اکسید گوگرد از همه مسیرها در کودکان برای ریسک‌های سرطان‌زایی به شرح زیر است:

$$ADD_{inh} = \frac{C \times R_{inh} \times EF \times ED}{BW \times AT \times PEF} = \frac{0.014 \times 7.6 \times 180 \times 6}{15 \times 70 \times 365 \times 1.36 \times 10^9} = 2.20 \times 10^{-13}$$

$$ADD_{ing} = \frac{C \times R_{ing} \times EF \times ED \times CF}{BW \times AT} = \frac{0.014 \times 200 \times 180 \times 6 \times 10^{-6}}{15 \times 70 \times 365} = 7.89 \times 10^{-9}$$

$$ADD_{dermal} = \frac{C \times SA \times SL \times ABS \times EF \times ED \times CF}{BW \times AT} = \frac{0.014 \times 2800 \times 0.2 \times 0.001 \times 180 \times 6 \times 10^{-6}}{15 \times 70 \times 365} = 2.20 \times 10^{-11}$$

محاسبات مربوط به نتایج مقادیر میانگین دوز مواجهه روزانه دی‌اکسید گوگرد از همه مسیرها در کودکان برای ریسک‌های غیرسرطان‌زایی به شرح زیر است:

$$ADD_{inh} = \frac{C \times R_{inh} \times EF \times ED}{BW \times AT \times PEF} = \frac{0.014 \times 7.6 \times 180 \times 6}{15 \times 6 \times 365 \times 1.36 \times 10^9} = 2.57 \times 10^{-12}$$

$$ADD_{ing} = \frac{C \times R_{ing} \times EF \times ED \times CF}{BW \times AT} = \frac{0.014 \times 200 \times 180 \times 6 \times 10^{-6}}{15 \times 6 \times 365} = 9.20 \times 10^{-8}$$

$$ADD_{dermal} = \frac{C \times SA \times SL \times ABS \times EF \times ED \times CF}{BW \times AT} = \frac{0.014 \times 2800 \times 0.2 \times 0.001 \times 180 \times 6 \times 10^{-6}}{15 \times 6 \times 365} = 2.57 \times 10^{-10}$$

محاسبات مربوط به نتایج مقادیر میانگین دوز مواجهه روزانه دی‌اکسید گوگرد از همه مسیرها در بزرگسالان برای ریسک‌های سرطان‌زایی به شرح زیر است:

$$ADD_{inh} = \frac{C \times R_{inh} \times EF \times ED}{BW \times AT \times PEF} = \frac{0.014 \times 20 \times 180 \times 24}{70 \times 70 \times 365 \times 1.36 \times 10^{9}} = 4.97 \times 10^{-13}$$

$$ADD_{ing} = \frac{C \times R_{ing} \times EF \times ED \times CF}{BW \times AT} = \frac{0.014 \times 100 \times 180 \times 24 \times 10^{-6}}{70 \times 70 \times 365} = 1.69 \times 10^{-9}$$

$$ADD_{dermal} = \frac{C \times SA \times SL \times ABS \times EF \times ED \times CF}{BW \times AT} = \frac{0.014 \times 5700 \times 0.07 \times 0.001 \times 180 \times 24 \times 10^{-6}}{70 \times 70 \times 365} = 1.34 \times 10^{-11}$$

محاسبات مربوط به نتایج مقادیر میانگین دوز مواجهه روزانه دی‌اکسید گوگرد از همه مسیرها در بزررگسالان برای ریسک‌های غیرسرطان‌زایی به شرح زیر است:

$$ADD_{inh} = \frac{C \times R_{inh} \times EF \times ED}{BW \times AT \times PEF} = \frac{0.014 \times 20 \times 180 \times 24}{70 \times 24 \times 365 \times 1.36 \times 10^{9}} = 1.45 \times 10^{-12}$$

$$ADD_{ing} = \frac{C \times R_{ing} \times EF \times ED \times CF}{BW \times AT} = \frac{0.014 \times 100 \times 180 \times 24 \times 10^{-6}}{70 \times 24 \times 365} = 4.93 \times 10^{-9}$$

$$ADD_{dermal} = \frac{C \times SA \times SL \times ABS \times EF \times ED \times CF}{BW \times AT} = \frac{0.014 \times 5700 \times 0.07 \times 0.001 \times 180 \times 24 \times 10^{-6}}{70 \times 24 \times 365} = 3.93 \times 10^{-11}$$

نتایج مقادیر میانگین دوز مواجهه روزانه دی‌اکسید گوگرد برحسب میلی‌گرم بر کیلوگرم در روز از طریق استنشاق، گوارش و جذب پوستی در جدول 6 ارائه شده است.

جدول 6- مقادیر میانگین دوز روزانه مواجهه (ADD) SO_2 در هر یک از مسیرها برای گروه‌های مواجهه

Table 6- Mean values of the daily exposure dose (ADD) of SO_2 in each pathway for the exposed groups

گروه‌های مواجهه/ طبقه سنی	نوع ریسک	ADD_{inh}	(mg/kg.day) مواجهه ۲۴ ساعته ADD_{ing}	ADD_{dermal}
کودکان	سرطانی	۲/۲۰×۱۰$^{-۱۳}$	۷/۸۹×۱۰$^{-۹}$	۲/۲۰×۱۰$^{-۱۱}$
	غیرسرطانی	۲/۵۷×۱۰$^{-۱۲}$	۹/۲۰×۱۰$^{-۸}$	۲/۵۷×۱۰$^{-۱۰}$
بزرگسالان	سرطانی	۴/۹۷×۱۰$^{-۱۳}$	۱/۶۹×۱۰$^{-۹}$	۱/۳۴×۱۰$^{-۱۱}$
	غیرسرطانی	۱/۴۵×۱۰$^{-۱۲}$	۴/۹۳×۱۰$^{-۹}$	۳/۹۳×۱۰$^{-۱۱}$

محاسبات مربوط به نتایج شاخص خطر و شاخص خطر تجمعی غیرسرطان‌زایی از هر یک از مسیرهای مواجهه با دی‌اکسید گوگرد برای کودکان به شرح زیر است:

$$HQ_i = \frac{ADD_i}{RfD_i}$$

$$HQ_{inh} = \frac{2.57 \times 10^{-12}}{0.023} = 1.11 \times 10^{-10}$$

$$HQ_{ing} = \frac{9.20 \times 10^{-8}}{0.023} = 4.00 \times 10^{-6}$$

$$HQ_{dermal} = \frac{2.57 \times 10^{-10}}{0.023} = 1.11 \times 10^{-8}$$

$$HI = \sum HQ_i = (1.11 \times 10^{-10}) + (4.00 \times 10^{-6}) + (1.11 \times 10^{-8}) = 4.01 \times 10^{-6}$$

محاسبات مربوط به نتایج شاخص خطر و شاخص خطر تجمعی غیر سرطان‌زایی از هر یک از مسیرهای مواجهه با دی‌اکسید گوگرد برای بزرگسالان به شرح زیر است:

$$HQ_i = \frac{ADD_i}{RfD_i}$$

$$HQ_{inh} = \frac{1.45 \times 10^{-12}}{0.023} = 6.30 \times 10^{-11}$$

$$HQ_{ing} = \frac{4.93 \times 10^{-9}}{0.023} = 2.14 \times 10^{-7}$$

$$HQ_{dermal} = \frac{3.93 \times 10^{-11}}{0.023} = 1.70 \times 10^{-9}$$

$$HI = \sum HQ_i = (6.30 \times 10^{-11}) + (2.14 \times 10^{-7}) + (1.70 \times 10^{-9}) = 2.15 \times 10^{-7}$$

نتایج ارزیابی خطر سلامت مواجهه با دی‌اکسید گوگرد در گروه‌های مورد بررسی در بازه‌ی زمانی ۲۴ ساعته در جدول 7 نشان داده شده است.

جدول 7- مقادیر شاخص خطر و شاخص خطر تجمعی غیرسرطانی و ریسک سرطانی مواجهه ۲۴ ساعته با SO_2

Table 7- Hazard Quotient (HQ), Non-Carcinogenic Cumulative Hazard Index (HI), and Cancer Risk Values for 24-Hour SO_2 Exposure

R_{total}	HI	HQ_{dermal}	HQ_{ingest}	HQ_{inh}	گروه مواجهه
-	$4/01\times10^{-6}$	$1/11\times10^{-8}$	$4/00\times10^{-6}$	$1/11\times10^{-10}$	کودکان
-	$2/15\times10^{-7}$	$1/70\times10^{-9}$	$2/14\times10^{-7}$	$6/30\times10^{-11}$	بزرگسالان

با توجه به نتایج، در هر دو گروه سنی، میزان میانگین دوز مواجهه روزانه گوارشی با دی‌اکسید نیتروژن و دی‌اکسید گوگرد بیشتر از تنفسی و جذب پوستی است. به علت کوچک‌تر بودن شاخص خطر و شاخص خطر تجمعی غیرسرطانی از عدد یک، هیچ خطر مهمی برای سلامت وجود ندارد. همچنین اثر این آلاینده‌ها جزء ریسک‌های سرطانی محسوب نمی‌شود.

بحث و نتیجه گیری

در سراسر جهان بیش از یک‌چهارم بزرگسالان به صورت فیزیکی غیرفعال هستند، به این معنا که حداقل سطح توصیه شده ۱۵۰ دقیقه فعالیت فیزیکی با شدت متوسط یا ۷۵ دقیقه فعالیت شدید در هفته را انجام نمی‌دهند، به طوری که بزرگسالان در کشورهای با درآمد بالا نسبت به کشورهای کم‌درآمد و متوسط فعالیت کمتری دارند. در عین حال، ۹۰ درصد جمعیت جهان در محیط‌هایی زندگی می‌کنند که از مقادیر راهنمای سازمان بهداشت جهانی برای کیفیت هوای محیط فراتر رفته است و کشورهای کم‌درآمد و متوسط بیشترین بار سلامت را متحمل می‌شوند. در سطح جهانی، سازمان بهداشت جهانی تخمین زده است که آلودگی هوای محیطی در سال ۲۰۱۶ باعث مرگ ۴/۲ میلیون نفر شده است، در حالی که عدم فعالیت بدنی در همان سال باعث مرگ ۳/۲ میلیون نفر شده است. هم آلودگی هوا و هم عدم‌فعالیت بدنی به طور علّی و مثبت با مرگ و میر زودرس ناشی از بیماری‌های غیرواگیر مرتبط هستند.

فعالیت بدنی اثرات مفید فوری دارد که به مرور زمان تجمع می‌یابند و در درازمدت خطر ابتلا و مرگ ناشی از بیماری‌های قلبی-عروقی و تنفسی، دیابت نوع ۲، برخی انواع سرطان‌ها و همچنین خطر مرگ و میر کلی را کاهش می‌دهد (Tainio et al., 2021). از اینرو، انجام فعالیت‌های ورزشی به عنوان یک نیاز و ضرورت مطرح است. اما این امر با آلودگی هوای کلانشهرها و مناطق صنعتی دارای تضاد است که همیشه ابهام بزرگی را برای ورزشکاران و مدیران و مربیان ورزشی ایجاد نموده است.

ورزشکاران و تماشاچیان در مجموعه‌های ورزشی بزرگ، به‌ویژه فضاهای باز، در معرض مستقیم آلودگی‌های هوا قرار دارند. این آلودگی‌ها می‌توانند شامل ذرات معلق، دی‌اکسید نیتروژن، منواکسید کربن، دی‌اکسید گوگرد، ازن و دیگر آلاینده‌های مضر باشند که به واسطه ترافیک، فعالیت‌های صنعتی و حتی برخی فعالیت‌های ورزشی تولید می‌شوند (Bahmanpour, 2015). مواجهه مکرر با این آلاینده‌ها، به‌ویژه در هنگام فعالیت‌های ورزشی سنگین، موجب تشدید مشکلات تنفسی و قلبی - عروقی و افزایش خطرات سلامتی در بلند مدت می‌شود. با توجه به این که فعالیت‌های بدنی میزان جذب آلاینده‌ها را افزایش می‌دهد، مدلسازی پراکنش آلاینده‌ها و ارزیابی خطر سلامت، کمک می‌کند تا مجموعه‌های ورزشی ایمن‌تری طراحی شوند و از بروز مشکلات سلامتی پیشگیری شود (Reche et al., 2020).

مطالعات متعدد نشان داده‌اند که اثرات سوء آلاینده‌های هوا بر انسان با افزایش فعالیت فیزیکی افزایش یافته و مواجهه با آلاینده‌های هوا در هنگام ورزش بر کارکرد ریوی و کارآیی ورزشکاران تاثیر منفی دارد (Lippi et al., 2008; Bai et al., 2021; Bono et al., 2010; Campbell et al., 2005). دلیل این امر، افزایش ضربان قلب و تعداد دفعات دم و بازدم به هنگام ورزش کردن است که سبب می‌شود بدن به اکسیژن بیشتری نیاز پیدا کند، این در حالی است که به جای دریافت اکسیژن، آلاینده‌ها با حجم بیشتری وارد ریه ورزشکاران می‌شود (Hasting, 2010; Swain et al., 2014). تأثیر آلاینده‌های هوا بر کاهش کارایی ورزشکاران اثبات شده است (Bahmanpour et al., 2020; Kalooti et al., 2025).

نتایج ارزیابی ریسک مواجهه نشان داد در ارزیابی مخاطرات مواجهه در هر دو گروه سنی، میزان مواجهه گوارشی با هر دو آلاینده دی‌اکسید نیتروژن و دی‌اکسید گوگرد، بیشتر از مواجهه تنفسی و جذب پوستی بوده است که این نتایج با نتایج Nameni و همکاران (۲۰۱۹) در تحقیق ارزیابی ریسک محیط زیستی مجموعه‌های ورزشی مبنی بر این که بررسی و تحلیل لایه‌های اطلاعاتی و نقشه‌های ترسیمی نشانگر آن است که اکثر مجموعه‌های ورزشی موجود در منطقه مطالعاتی به نحوی با آلاینده‌ها در تماس هستند و این که این بستگی به نوع آلاینده دارد، هم‌خوانی داشته است. با افزایش تنفس در حین دویدن، مقدار ضریب خطر برای استنشاق افزایش یافته، اما تماس پوستی و گوارشی ثابت باقی مانده است (Ulutaş, 2023).

نتایج بدست آمده از محاسبه مخاطرات غیرسرطانی برای دی‌اکسید نیتروژن و دی‌اکسید گوگرد بدین صورت بوده که به علت کوچک‌تر بودن شاخص خطر و شاخص خطر تجمعی غیرسرطانی از عدد یک، هیچ خطر مهمی برای سلامت وجود ندارد. این نتایج با نتایج Bai و همکاران (۲۰۲۱) در تحقیق آلودگی هوا و ارزیابی ریسک سلامت در شمال شرق چین مبنی بر این که خطرات غیرسرطانی آلاینده‌ها همگی در محدوده قابل قبول قرار دارند، هم‌خوانی داشته است. همچنین با نتایج Ulutaş (۲۰۲۳) در تحقیق ارزیابی سطح آلودگی در یک زمین ورزشی مبنی بر اینک ه مقدار شاخص خطر تجمعی برای هر دو سناریو کمتر از ۱ بوده و خطری برای سلامتی ایجاد نکرده نیز هم‌خوانی داشته است. همچنین براساس نتایج تحقیق Bixapathi و همکاران (۲۰۲۱)، در تحقیق ارزیابی ریسک سلامت چهار آلاینده مهم هوای محیطی مبنی بر این که مقادیر شاخص خطر (HQ) محاسبه شده برای مواجهه‌های غیرسرطانی به‌طور قابل توجهی کمتر از سطح مجاز ۱ بودند و این که سطح کلی شاخص خطر (HI) مواجهه‌ها، که با جمع کردن مقادیر HQ هر آلاینده تعیین شده بود، الگوی مشابهی داشته و کمتر از ۱ گزارش شده نیز مطابقت دارد.

مقادیر HQ در مناطق شهری، صنعتی و مناطق پس‌زمینه در استان رایونگ کمتر از ۱ بوده است، که نشان‌دهنده عدم وجود خطر است. بالاترین مقادیر HQ برای کودکان و بزرگسالان در فصل زمستان مشاهده شد، در حالی که سطوح HQ برای بزرگسالان در فصول بارانی، زمستان و تابستان بالاتر از کودکان بود. علاوه بر این، مقادیر HQ مربوط به NO_2 برای بزرگسالان در فصل زمستان ۱/۰۹ و تابستان ۱/۱۲ بالاتر از ۱ بوده است که نشان‌دهنده اثرات منفی بر سلامت انسان است. این محل در نزدیکی بازار تاپما و تقاطع بزرگراه واقع شده که دارای تراکم بالای ترافیک است (Sillapapiromsuk et al., 2022).

آلودگی هوا یکی از شایع‌ترین و بارزترین تهدیدهای محیط‌زیستی برای ورزش به‌شمار می‌رود که به شکل‌های گوناگونی جلوه‌گر می‌شود. تحقیقات نشان داده است که آلودگی هوا ممکن است بر برخی زیرمجموعه‌های جمعیت بیشتر از سایرین تأثیرگذار باشد. از

این منظر، ورزشکارانی که در هوای آزاد به تمرین یا مسابقه می‌پردازند ممکن است بیشتر در معرض آلاینده‌های هوا قرار بگیرند و دوز مؤثر [1] بسیار بیشتری را نسبت به افراد عادی یا ورزشکارانی که عمدتاً در داخل سالن به تمرین یا مسابقه می‌پردازند، تجربه کنند. علاوه بر میزان تهویه بیشتر در انجام فعالیت ورزشی، اولین تفاوت آشکار شامل زمان صرف شده در هوای آزاد توسط ورزشکاران است، که اغلب نیز همزمان با زمان‌های اوج سطوح آلودگی است. در محیط‌های شهری، افراد پیاده‌رو، دوندگان و دوچرخه‌سواران همچنین ممکن است در نزدیکی جاده‌های اصلی، جایی که ممکن است مقدار آلاینده‌ها بسیار بالاتر از میانگین سطوح گزارش شده باشد، به انجام فعالیت ورزشی مبادرت ورزند. انجام مطالعات ارزیابی ریسک، کمک شایانی برای مدیران و مربیان و ورزشکاران است تا بتوانند نسبت به جنبه‌های مجهول ناشی از آلودگی‌های محیطی و پیامدهای بهداشتی آن‌ها آگاهی پیدا نمایند تا با اتخاذ تصمیم‌های درست، سلامت خود را تضمین نمایند.

Extended Abstract

Introduction: Air pollution is one of the most critical factors affecting human quality of life and has adverse effects on human health. Air pollution not only jeopardizes the health and increases the mortality of patients but also negatively impacts the athletic performance of sportspeople. Several studies have shown that the adverse effects of air pollutants on humans are amplified by increased physical activity, and exposure to air pollutants during exercise negatively affects pulmonary function and athletic efficiency. According to modern health guidelines, today it is extremely important to identify the effects and assess the risk of exposure to air pollutants in sports environments, particularly in open-air sports facilities, in order to mitigate exposure effects and investigate the carcinogenic and non-carcinogenic risks posed by these pollutants. This article aims to identify the effects and assess the risk of exposure to nitrogen dioxide (NO_2) and sulfur dioxide (SO_2) pollutants in large-scale outdoor sports environments, specifically the Enghelab Sport Complex in Tehran.

Materials and methods: This research is applied in nature. The data collection method included both library research and direct data retrieval from the database of the Tehran Air Quality Control Company. The study period was set for one year, from May/June 2024 (Khordad 1403) to May/June 2025 (Khordad 1404). Data concerning the concentration of the studied pollutants were obtained from stations in adjacent areas and were adjusted using the mathematical averaging method. Subsequently, based on the average measured values of nitrogen dioxide and sulfur dioxide across different seasons, the mean daily exposure doses of these pollutants were calculated for two age groups—children and adults—via the respiratory, ingestion, and dermal absorption routes. In the next stage, the non-carcinogenic and carcinogenic hazard indices for these pollutants were determined based on the risk assessment formulas provided by the United States Environmental Protection Agency.

Results: The cumulative non-carcinogenic hazard index for NO_2 exposure was 2.13×10^{-5} for children and 2.29×10^{-6} for adults. Similarly, this index for SO_2 was calculated to be 4.01×10^{-6} for children and 2.15×10^{-7} for adults. The results of the exposure risk assessment indicated that, in both age groups, the ingestion exposure dose for both NO_2 and SO_2 was higher than the respiratory and dermal absorption exposure doses. Due to the non-carcinogenic hazard index and cumulative hazard index being less than one, there is no significant health risk associated with NO_2 and SO_2 exposure.

Discussion and Conclusion: There was no carcinogenic or non-carcinogenic risk observed from exposure to SO_2 and NO_2 pollutants at the study site. Considering that the International Olympic Committee guidelines, since 2006, have proposed replacing conventional ventilation systems with air filtration systems, this measure is recommended as a solution for all indoor multi-purpose sports facilities. It is suggested that the complex management install a public monitor at the entrance to raise user awareness and provide general information, allowing athletes real-time access to air quality index values and related analyses.

Keywords: Air Pollution, Health Risk Assessment, Sports Environment, Nitrogen Dioxide, Hazard Index.

[1] ED

References

Arnesano, M., Revel, G. M., & Seri, F. (2016). A tool for the optimal sensor placement to optimize temperature monitoring in large sports spaces. *Automation in Construction*, 68, 223-234.

Azizi, G. (2006). Simulation of air pollution in Tehran. Journal of Physical Geography Research, 68. [In Persian]

Bahmanpour, H., Naghibi, SH., & Abdi, H. (2020). Environmental Risk of Carbon Monoxide Pollutant in Tehran Outdoor Sports Spaces and Recreation Sites. *Geographical research*, 35(2), 155-165. [In Persian]

Bahmanpour, H. (2015). *Sport and the environment: For athletes and sports managers*. Office of Environment and Sustainable Development, Ministry of Sport and Youth, 97. [In Persian]

Bai, L., Li, C., Yu, C. W., & He, Z. (2021). Air pollution and health risk assessment in Northeastern China: A case study of Jilin Province. *Indoor and Built Environment*, 30(10), 1857-1874.

Bono, R., Degan, R., Pazzi, M., Romanazzi, V., & Rovere, R. (2010). Benzene and formaldehyde in air of two winter Olympic venues of "Torino 2006". *Environment international*, 36(3), 269-275.

Bixapathi, B., Reddy, V. V., Rao, M. S., & Raghavendra, T. (2021). Health risk assessment of four important ambient air pollutants in Hyderabad. *Nat. Volatiles & Essent. Oils*, 8(5), 9925-9935.

Campbell, M. E., Li, Q., Gingrich, S. E., Macfarlane, R. G., & Cheng, S. (2005). Should people be physically active outdoors on smog alert days?. *Canadian journal of public health*, 96(1), 24-28.

Carlisle, A. J., & Sharp, N. C. C. (2001). Exercise and outdoor ambient air pollution. *British journal of sports medicine*, 35(4), 214-222.

Fashi, Mohamad. (2023). Air Pollution, Exercise, and Inflammation. *Journal Of Gorgan University of Medical Sciences,* 24(4), 1- 9. [In Persian]

Florida-James, G., Donaldson, K., & Stone, V. (2004). Athens 2004: the pollution climate and athletic performance. *Journal of sports sciences*, 22(10), 967-980.

Hasting, Gerome.(2010). *Exercise prescription and medical considerations*. ACSM Resourse Manual for Guidelines for Exercise testing and prescription. 6th ed. Philadelphia: Lippincott Williams.

Hosseinpour, E., Bagheri, G., Ali dost Ghahfarokhi, E., Amiri, M., & Jalali Farahani, M. (2018). Designing Safety model in Sports (Using Grounded Theory); *Iran Occupational Health Journal,* 15(4):34-49 [In Persian]

Hu, A. H., Hsu, C. W., Kuo, T. C., & Wu, W. C. (2009). Risk evaluation of green components to hazardous substance using FMEA and FAHP. *Expert Systems with Applications*, 36(3), 7142-7147.

International Agency for Research on Cancer. (2013). Latest world cancer statistics Global cancer burden rises to 14.1 million new cases in 2012: Marked increase in breast cancers must be addressed. World Health Organization, 12.

Kalooti, M., Fahimi-Nejad, A., Morsal, B., & Bahmanpour, H. (2025). Modeling of Carbon Monoxide Pollutant Emissions Caused by Sports Events in Cities under Multiple Scenarios (Case Study: Azadi Stadium in Tehran). *JRSM*; 15 (29):204-228 [In Persian]

Lippi, G., Guidi, G. C., & Maffulli, N. (2008). Air pollution and sports performance in Beijing. *International journal of sports medicine*, 29(08), 696-698.

Mohaghegh, S., & Hajian, M. (2013). Review Article: Exercise and Air Pollution. *Journal Of Medical Council of I.R.I.*, 31(3), 237-249. [In Persian]

Mohammed, A. M. (2017). *Estimation of PM_{10} Health Impacts on Human within Urban Areas of Makkah city*, KSA.

Nameni, A., Tayebi-Sani, S. M., Fahimi-Nejad, A., & Morsal, B. (2019). Environmental risk assessment of sports complexes in relation to air pollutants (Case study: Northeast Tehran). *New Perspectives in Human Geography*, 11(2), 163–179. [In Persian]

Noorpoor, A., & Sadri Jahanshahi, A. (2014). Evaluation of Health Risk Assessment by Heavy Metals in the Ambient Air of Tehran. *Journal of Environmental Studies*, 39(4), 181-192. [In Persian]

Reche, C., Viana, M., Van Drooge, B. L., Fernández, F. J., Escribano, M., Castaño-Vinyals, G., & Bermon, S. (2020). Athletes' exposure to air pollution during World Athletics Relays: A pilot study. *Science of the Total Environment*, 717, 137161.

Shojaee Barjoee, S., Azimzadeh, H.R., Kuchakzadeh, M.R., Mosleh Arani, A., & Sodaiezadeh, H. (2019). Dispersion and Health Risk Assessment of PM_{10} Emitted from the Stacks of a Ceramic and Tile industry in Ardakan, Yazd, Iran, Using the AERMOD Model. *Iranian South Medical Journal (ISMJ)*, 22(5), 317-332. [In Persian]

Sillapapiromsuk, S., Koontoop, G., & Bootdee, S. (2022). Health risk assessment of ambient nitrogen dioxide concentrations in urban and industrial area in Rayong Province, *Thailand. Trends in Sciences*, 19(11), 4476-4476.

Swain, D. P., Brawner, C. A., & American College of Sports Medicine. (2014). *ACSM's resource manual for guidelines for exercise testing and prescription.* Wolters Kluwer Health/Lippincott Williams & Wilkins.

Tainio, M., Andersen, Z. J., Nieuwenhuijsen, M. J., Hu, L., De Nazelle, A., An, R., & de Sá, T. H. (2021). Air pollution, physical activity and health: A mapping review of the evidence. *Environment international*, 147, 105954.

Ulutaş, K. (2023). Assessment of the pollution level, microscopic structure, and health risk of heavy metals in surface dusts in a sports field. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 29(5), 529-536.

W.B.Reports.(2015). Air Pollution Cost in Global. www.worldbank.org/en/.../air-pollution-deaths-cost-global-economy.

WHO. (2017). Air Quality and Health.11 (2), 164-179. https://www.who.int/.

Zare Jeddi, M., Yunesian, M., Ahmad Khaniha, R., Kashani, H., & Rastkari, N. (2015). Semi-Quantitative and Quantitative Health Risk Assessment of Gas Station Workers Exposure to Benzene. *Iranian Journal of Health and Environment*, 8(3), 391-400. [In Persian].