Paramedical Sciences and Military Health

P-ISSN: 2423-7507 ISSN:2538-3086

Homepage: htt://jps.ajaums.ac.ir

Health Risk Assessment of PM_{10} and $PM_{2.5}$ Particulate Matter in the Industrial Area of Bandar Abbas

Habib Masihi Taziani[1], Mohsen Dehghani Qhanatghestani[1*], Lobat Taghavi[2], Hossein Parvarash[1]

[1] Department of Environmental Engineering and Management, B.A. C., Islamic Azad University, Bandar Abbas, Iran.

[2] Department of Environmental Science, Faculty of Natural Resources and Environment, S.R. C, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

ARTICLE INFO

Article Type:
Original Article

Article History:
Received: 2025/09/02
Received in revised form: 2025/09/22
Accepted: 2025/09/25
Published:2025/10/02

Corresponding Author:
Mohsen Dehghani Qhanatghestani

Email:
m.dehghani@iau.ac.ir

Abstract

Introduction: Rapid urban development and the expansion of industrial activities in recent years have led to a significant increase in ambient particulate matter concentrations. This study aimed to determine pollution levels and assess the health risks associated with PM_{10} and $PM_{2.5}$ in the industrial zone of Bandar Abbas.

Materials and Methods: To monitor air quality, sampling was conducted at 42 stations within the study area. Particulate matter concentrations were measured based on standard methods. Moreover, the health risks associated with exposure to PM_{10} and $PM_{2.5}$ were calculated for two population groups of adults and children.

Results: The average annual PM_{10} concentration was estimated at 72.86 µg/m³, and the average annual $PM_{2.5}$ concentration was 35.68 µg/m³.Values which considerably higher than the annual limits recommended by the World Health Organization. The results indicated that there was not any statistically significant difference between seasonal mean concentrations in summer and winter. Health risk analysis showed that PM_{10} contributed the most total risk in adults; whereas, $PM_{2.5}$ was identified as the more influential and hazardous pollutant for children.

Conclusion: According to the findings, particulate matter pollution in the industrial area of Bandar Abbas represents a serious environmental and public health concern. Continuous and effective air pollution control strategies targeting industrial emissions in this region are urgently required.

Keywords: Air pollution, Particulate matter, Industrial activities, Health risk assessment, Bandar Abbas.

Cite this article: Masihi Taziani H, Dehghani Ghanatghestani M, Taghavi L, Parvarash H. Health Risk Assessment of PM10 and PM2.5 Particulate Matter in the Industrial Area of Bandar Abbas. Paramedical Sciences and Military Health 2025; 20 (3) :42-51.

© Author(s) retain the copyright.

:https://doi.org/10.22034/JPSMH.20.3.42

Publisher: Aja University of Medical Sciences

علوم پیراپزشکی و بهداشت نظامی
شاپای چاپی: ۷۵۰۷-۲۴۲۳ شاپای الکترونیکی: ۳۰۸۶-۲۵۳۸
Homepage: htt://jps.ajaums.ac.ir

ارزیابی ریسک بهداشتی ذرات معلق PM_{10} و $PM_{2.5}$ در ناحیه صنعتی شهر بندرعباس

حبیب مسیحی تازیانی[۱]، محسن دهقانی قناتغستانی[۱*]، لعبت تقوی[۲]، حسین پرورش[۱]

[۱] گروه مهندسی و مدیریت محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بندرعباس، بندرعباس، ایران.
[۲] گروه علوم و مهندسی محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله
مقاله پژوهشی

سابقه مقاله
دریافت: ۱۱/ ۱۴۰۴/۰۶
ویرایش: ۱۴۰۴/۰۶/۳۱
پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۰۳
انتشار برخط: ۱۰/ ۱۴۰۴/۰۷

*نویسنده مسئول: **محسن دهقانی قناتغستانی**
آدرس الکترونیکی:
m.dehghani@iau.ac.ir

چکیده

مقدمه: توسعه شهری و گسترش فعالیت‌های صنعتی طی سال‌های اخیر منجر به افزایش قابل توجه غلظت ذرات معلق در هوا شده است. هدف این مطالعه، تعیین میزان آلودگی و ارزیابی ریسک بهداشتی ناشی از **ذرات معلق** PM_{10} و $PM_{2.5}$ در ناحیه صنعتی بندرعباس است.

مواد و روش‌ها: به‌منظور پایش کیفیت هوا، نمونه‌برداری از ۴۲ ایستگاه در محدوده مورد مطالعه صورت گرفت. اندازه‌گیری غلظت ذرات معلق مطابق با روش‌های استاندارد انجام شد و ریسک بهداشتی ناشی از مواجهه با ذرات معلق PM_{10} و $PM_{2.5}$ برای دو گروه جمعیتی بزرگسالان و کودکان محاسبه گردید.

یافته‌ها: میانگین غلظت سالانه PM_{10} برابر با ۷۲/ ۸۶ $\mu g/m^3$ و میانگین غلظت سالانه $PM_{2.5}$ معادل ۳۵/۶۸ $\mu g/m^3$ برآورد شد؛ مقادیری که به‌طور قابل ملاحظه‌ای بالاتر از حدود مجاز سالانه تعیین‌شده توسط سازمان جهانی بهداشت هستند. نتایج نشان داد تفاوت میانگین فصلی غلظت ذرات معلق در تابستان و زمستان از نظر آماری معنادار نبود. همچنین تحلیل ریسک بهداشتی بیانگر آن است که در بزرگسالان، PM_{10} بیشترین سهم خطر را به خود اختصاص می‌دهد، در حالی که در کودکان، $PM_{2.5}$ عامل اثرگذارتر و خطرناک‌تری محسوب می‌شود.

نتیجه‌گیری: بر اساس یافته‌ها، آلودگی ناشی از ذرات معلق در ناحیه صنعتی بندرعباس یک چالش جدی زیست‌محیطی و بهداشتی به شمار می‌رود و اجرای برنامه‌های مستمر و مؤثر برای کنترل آلودگی هوا ناشی از فعالیت‌های صنعتی در این ناحیه کاملاً ضروری است.

کلیدواژه‌ها: آلودگی هوا، ذرات معلق، فعالیت‌های صنعتی، ریسک بهداشتی، بندرعباس.

استناد: مسیحی تازیانی حبیب، دهقانی قناتغستانی محسن، تقوی لعبت، پرورش حسین. ارزیابی ریسک بهداشتی ذرات معلق PM10 و PM2.5 در ناحیه صنعتی شهر بندرعباس. علوم پیراپزشکی و بهداشت نظامی. ۱۴۰۴; ۲۰ (۳) : ۴۲-۵۱.

ناشر: دانشگاه علوم پزشکی ارتش.
© نویسندگان.
doi:https://doi.org/10.22034/JPSMH.20.3.42

مقدمه

با گسترش شهرنشینی و صنعتی شدن، چالش‌های مربوط به کیفیت محیط زیست به‌طور فزاینده‌ای تشدید شده‌اند. در میان این مشکلات، آلودگی هوا به دلیل اثرات بلندمدت و قابل توجه آن بر محیط زیست و سلامت عمومی بیش از سایر موارد مورد توجه قرار گرفته است (۱). ذرات معلق (PM) به ویژه ذرات معلق کوچکتر از ۲/۵ میکرومتر مهم‌ترین منبع آلودگی هوا محسوب می‌شوند(۲). این آلاینده حاصل فرآیندهای طبیعی و انسان‌ساخت از جمله: نمک دریا، فعالیت آتش فشان‌ها، آتش سوزی جنگل‌ها، گرد و غبار زمین‌ساختی، احتراق سوخت‌های فسیلی و فعالیت‌های صنعتی و کشاورزی هستند (۳). با این حال گزارشات متعدد تاکید دارد ذرات معلق عمدتاً از منابع انسان‌ساخت مانند حمل و نقل، انتشار صنعتی و احتراق سوخت ناشی می‌شوند (٤). ذرات معلق نه تنها مشکلات محیطی همچون تغییر شرایط جوی و نوری ایجاد می‌کنند، بلکه به دلیل اندازه بسیار کوچک می‌توانند وارد بدن انسان شده و اثر مستقیم بر سلامت بگذارند (۵،۶). اثرات این ذرات به دلیل قابلیت جذب و رسوب آن‌ها در سیستم تنفسی یا گردش خون انسان به‌طور فزاینده‌ای نگران‌کننده است. برخی مطالعات نشان داده‌اند که PM_{10} و $PM_{2.5}$موجود در هوا می‌توانند از طریق گردش خون وارد بدن شده و تأثیر مستقیم بر سیستم تنفسی و عصبی داشته باشند و در نتیجه باعث افزایش بیماری‌ها و مرگ‌ومیر شوند (۷ ، ۸).

ذرات درشت PM_{10} می‌توانند به اعماق دستگاه تنفسی نفوذ کرده و موجب بروز بیماری‌های جدی تنفسی شوند، در حالی که ذرات ریز به دلیل اندازه کوچکتر قادرند از مسیر دستگاه تنفسی عبور کرده و در ریه‌ها تجمع یابند و باعث انواع بیماری‌های تنفسی و حتی سرطان ریه شوند (۹). قرار گرفتن در معرض ذرات معلق هوا می‌تواند اثرات منفی بر گروه‌های آسیب‌پذیر مانند کودکان، سالمندان و افراد مبتلا به بیماری‌های تنفسی داشته باشد (۱۰). طبق گزارش سازمان جهانی بهداشت (WHO) سالانه ۷/۳ میلیون مرگ زودرس در اثر آلودگی هوای بیرونی ناشی از $PM_{2.5}$ ارتباط دارد (۱۱). مطالعات همچنین نشان داده‌اند که غلظت‌های بالای ذرات معلق PM_{10} و $PM_{2.5}$ در تهران و دیگر شهرهای بزرگ ایران می‌تواند منجر به افزایش بروز بیماری‌های تنفسی و قلبی و مرگ‌ومیر شود(۱۲،۱۳) بنابراین در مناطق آلوده، تعیین غلظت جرمی ذرات معلق و اجزای آن‌ها، همچنین بررسی اثرات آن‌ها بر سلامت انسان ضروری است؛ زیرا اجزای خطرناک ذرات معلق مانند کربن آلی، یون‌ها و فلزات سنگین می‌توانند اثرات سرطانزایی و غیر سرطانزایی ذرات را تشدید کند (۱۴).

کیفیت زیست محیطی و بهداشتی ناحیه غرب بندرعباس به دلیل استقرار صنایع کوچک و بزرگ و شهرک‌های صنعتی مطلوب نیست، از همین رو، سازمان حفاظت محیط زیست محدودیت هایی برای بارگذاری صنایع جدید و توسعه صنایع فعلی در این ناحیه وضع کرده است. با وجود آلودگی هوا و انتشار مقادیر قابل توجه ذرات معلق، مطالعات اندکی درباره اثرات بهداشتی PM_{10} و $PM_{2.5}$ در این منطقه انجام شده است. این مطالعه با هدف اندازه گیری غلظت PM_{10} و $PM_{2.5}$ و ارزیابی ریسک بهداشتی ناشی از قرار گرفتن در معرض ذرات معلق در ناحیه صنعتی بندرعباس انجام شد. یافته‌های پژوهش می‌تواند برای افزایش آگاهی عمومی، به ویژه میان مدیران صنایع و متولیان محیط زیست، و اتخاذ اقدامات مؤثر برای کاهش انتشار ذرات معلق در هوا مفید باشد.

مواد و روش‌ها

محدوده مور مطالعه

شهر بندرعباس با جمعیت ۷۲۱,۶۰۰ نفر، در مختصات ۲۷/۱۸۳۲۲۱۶ تا ۵۶/۲۶۶۶۴۵۵ جغرافیایی در مجاورت ناحیه صنعتی قرار دارد. ناحیه صنعتی غرب بندرعباس محل استقرار صنایع متعددی است که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به نیروگاه حرارتی بندرعباس، فولاد هرمزگان، شرکت صبا فولاد، فولاد جنوب کیش، آلومینیوم‌سازی المهدی، کارخانه تولید روی، پالایشگاه نفت بندرعباس، پالایشگاه نفت ستاره خلیج فارس و صنایع کشتی‌سازی فراساحل جنوب اشاره کرد. فرآیندهای صنعتی و مصرف قابل توجه سوخت، منجر به انتشار ذرات معلق در هوا می‌شود.

نمونه برداری

این مطالعه مقطعی در ناحیه صنعتی غرب بندرعباس صورت گرفت. تعداد ۴۲ ایستگاه نمونه‌برداری در منطقه انتخاب گردید که مساحتی حدود ۲۸/۷ کیلومتر مربع را پوشش می‌دهد. مختصات جغرافیایی منطقه نمونه‌برداری ۴۰۵۸۸۲/۰۱ تا ۴۱۳۳۶۵/۰۱ طول شرقی و ۲۹۹۹۸۶۷/۵۹ تا ۳۰۰۷۹۰۷/۰۱ عرض شمالی است. نمونه برداری از ذرات معلق در دو فصل تابستان و زمستان ۱۴۰۳ انجام شد. نمونه برداری دو روز در هفته به‌طور پیوسته به مدت حدود ۲۴ ساعت، با نرخ جریان ۱/۷ مترمکعب در دقیقه و از ساعت ۸ صبح تا ۸ صبح بعد انجام شد. برای جمع‌آوری نمونه‌های ذرات معلق از پمپ Hi-Volume مدل ECHO PM ساخت کمپانی TCR TECORA استفاده شد که بر اساس روش U.S. EPA برای جمع‌آوری و اندازه‌گیری ذرات معلق طراحی شده است. در مجموع ۵۰۴ نمونه معتبر

جمع‌آوری شد. برای جمع‌آوری نمونه‌های ذرات معلق، از فیلترهای تفلونی (PTFE 0.2 µm, Ø 47 mm) استفاده گردید و پس از جمع‌آوری، نمونه‌ها به آزمایشگاه کنترل کیفی و پایش اداره کل محیط زیست هرمزگان منتقل شدند. فیلترها قبل و پس از نمونه‌برداری به مدت ۴۸ ساعت در محیطی با دما ۲۰±۱ °C و رطوبت نسبی ۵۰±۱ ٪ تعادل داده شدند. سپس غلظت جرمی ذرات معلق $PM_{2.5}$ و PM_{10} محاسبه گردید.

محاسبه جرم $PM_{2.5}$ و PM_{10}

برای محاسبه غلظت ذرات معلق PM_{10} و $PM_{2.5}$ از معادله زیر استفاده شد. این معادله به طور گسترده در پایش کیفیت هوا برای اندازه‌گیری میزان آلاینده‌های معلق در هوا استفاده می‌شود (۱۵).

$$PM = \frac{(M_f - M_i) - (M_{FBf} - M_{FBi})}{V_a} \quad (۱)$$

در معاله ۱:

M_i: جرم فیلتر قبل از نمونه‌برداری(µg)

M_f: جرم فیلتر بعد از نمونه‌برداری(µg)

M_{FBi}: جرم فیلتر بلانک قبل از نمونه‌برداری(µg)

M_{FBf}: جرم فیلتر بلانک بعد از نمونه‌برداری(µg)

V_a: حجم هوای عبوری از نمونه‌بردار(m^3)

ارزیابی ریسک بهداشتی $PM_{2.5}$ و PM_{10}

مدل ارزیابی ریسک سلامت، که توسط آژانس حفاظت از محیط زیست ایالات متحده (USEPA) ارائه شده است، به طور گسترده برای ارزیابی میزان مواجهه با آلاینده‌های موجود در گرد و غبار را از طریق مسیر مواجهه استنشاق نشان می‌دهد. فرآیند ارزیابی ریسک سلامت شامل چهار مرحله کلیدی: تخمین داده‌ها، ارزیابی مسیرهای مواجهه، ارزیابی سمیت و ارزیابی کلی ریسک سلامت است (۱۶). مواجهه با آلاینده ها ممکن است منجر به خطرات سرطان‌زا و غیرسرطان‌زا برای سلامت شود (۱۷). طبق مدل ارزیابی ریسک سلامت، عموم مردم ممکن است از طریق استنشاق در معرض آلودگی $PM_{2.5}$ و PM_{10} قرار گیرند. برای محاسبه خطر غیرسرطان‌زا، میانگین دوز روزانه (ADD) از طریق استنشاق با استفاده از معادله ۲ محاسبه شد (۱۸):

$$ADD_{Inh} = C \times \frac{IR_{Inh} \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad (۲)$$

که در آن (C) غلظت $PM_{2.5}$ یا PM_{10} در گرد و غبار، (IRInh) میزان استنشاق، (EF) فراوانی مواجهه، (ED) مدت زمان مواجهه، (BW) میانگین وزن بدن و (AT) میانگین زمان مواجهه است. برای تخمین خطر غیرسرطان‌زایی طول عمر (LADD)، برای کودکان و بزرگسالان از معادله ۳ استفاده شد (۱۹، ۲۰).

$$LADD = \frac{C \times EF}{AT} \times \left(\frac{InhR_{child} \times ED_{child}}{BW_{child}} + \frac{InhR_{adult} \times ED_{adult}}{BW_{adult}} \right) \quad (۳)$$

که در آن $InhR_{child}$ و $InhR_{adult}$ به ترتیب به میزان استنشاق برای کودکان و بزرگسالان و ED_{child} و ED_{adult} به ترتیب به مدت زمان قرار گرفتن در معرض برای کودکان و بزرگسالان اشاره دارند. BW_{child} و BW_{adult} به ترتیب میانگین وزن بدن برای کودکان و بزرگسالان هستند.

ضریب خطر (HQ)، که برای اندازه‌گیری خطر غیرسرطانی برای کودکان و بزرگسالان استفاده می‌شود، نسبت میانگین دوز مواجهه روزانه (ADD) به دوز مرجع خاص (RfD) برای ذرات معلق است(معادله ۴). به‌طورکلی، RfD به‌عنوان تخمینی از مواجهه روزانه با یک ماده خاص عمل می‌کند که بعید است منجر به عوارض جانبی قابل توجهی در طول عمر شود.

$$HQ = \frac{ADD_{Inh}}{RfD_{Inh}} \quad (۴)$$

$$HI = \sum_{i=1}^{n} HQ_i \quad (۵)$$

شاخص خطر (HI)، که شامل خلاصه‌ای از مقادیر HQ است (معادله ۵)، برای ارزیابی خطر تجمعی غیرسرطان‌زا در مسیرهای مواجهه چندگانه برای یک آلاینده معین استفاده می‌شود (۲۱ ، ۲۲). اگر مقدار HI کمتر از ۱ باشد، خطر کم یا ناچیز در نظر گرفته می‌شود. اگر $HI > 1$ باشد، ممکن است دلیلی برای نگرانی در مورد خطر بالقوه غیر سرطان‌زایی وجود داشته باشد (۲۰ ، ۲۳).

آنالیزهای آماری

آزمون ANOVA برای مقایسه ویژگی‌های کیفیت هوا بین ایستگاه‌ها و تغییرات فصلی به کار رفت. داده‌ها با استفاده از میانگین و انحراف معیار توصیف شدند.

یافته‌ها

غلظت $PM_{2.5}$ و PM_{10}

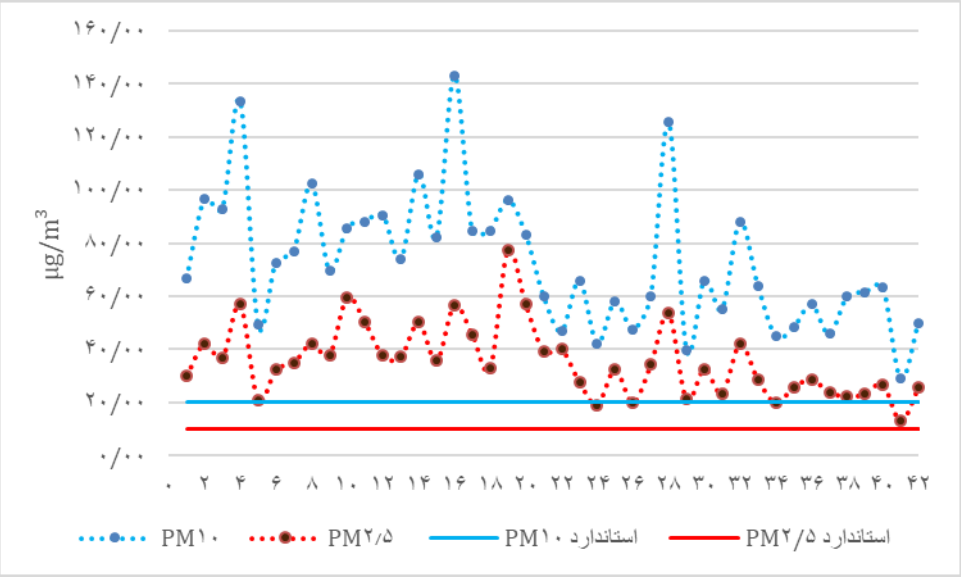
بر اساس نتایج به‌دست‌آمده در ۴۲ ایستگاه مورد مطالعه، ماکزیمم غلظت

روزانه $PM_{2.5}$ برابر با ۲۰۲/۴۲ میکروگرم بر مترمکعب اندازه گیری شده است. این مقدار به‌طور قابل‌توجهی بیش از حد مجاز استاندارد ۲۴ ساعته سازمان جهانی بهداشت (۲۵$\mu g/m^3$) است و نشان‌دهنده‌ی وضعیت نامطلوب کیفیت هوا در روزهای آلوده می‌باشد. با توجه به نتایج جدول شماره ۱، میانگین فصلی غلظت $PM_{2.5}$ در تابستان ۳۷/۶۱ $\mu g/m^3$ و در زمستان ۳۳/۷۷ $\mu g/m^3$ برآورد شد که نشان‌دهنده وضعیت ناسالم کیفیت هوا در هر دو فصل است. انحراف معیار بالا (بیش از ۱۳ $\mu g/m^3$) بیانگر نوسانات مکانی قابل توجه در شدت آلودگی بین ایستگاه‌ها می‌باشد. میانگین فصلی غلظت PM_{10} نیز در تابستان ۷۵/۲۵ $\mu g/m^3$ و در زمستان ۷۰/۴۶ $\mu g/m^3$ محاسبه شد که مشابه $PM_{2.5}$، نشان‌دهنده شرایط ناسالم کیفیت هوا است. نتایج آزمون آماری ANOVA نشان داد که اگرچه میانگین غلظت ذرات معلق در تابستان کمی بیشتر از زمستان است، اما این اختلاف از نظر آماری معنی دار نیست (P> ۰/۰۵). این موضوع بیانگر آن است که عوامل مؤثر بر غلظت $PM_{2.5}$ و PM_{10} در هر دو فصل تأثیر مشابهی بر کیفیت هوا دارند.

همچنین، میانگین غلظت سالانه $PM_{2.5}$ و PM_{10} در کل ایستگاه‌ها به ترتیب ۳۵/۶۸ و ۷۲/۸۶ $\mu g/m^3$ برآورد شد که مقادیر آن به‌مراتب بالاتر از استاندارد سالانه سازمان جهانی بهداشت (۵ و ۱۵ $\mu g/m^3$ به ترتیب برای $PM_{2.5}$ و PM_{10}) است. شکل شماره ۱ نمودار میانگین سالانه غلظت $PM_{2.5}$ و PM_{10} را در ایستگاه‌های نمونه برداری نشان می‌دهد. بیشترین غلظت PM_{10} در ایستگاه شماره ۱۸(محدوده شرکت فولاد هرمزگان جنوب) با ۱۴۳/۱۰ $\mu g/m^3$ و بیشترین غلظت $PM_{2.5}$ در ایستگاه شماره ۲۱ با ۷۷/۴۳ $\mu g/m^3$ به ثبت رسیده است. همانگونه که در شکل نشان داده شده است میانگین سالانه ذرات معلق ۲/۵ و ۱۰ میکرون در تمام ایستگاه ها از استانداردهای سازمان بهداشت جهانی بیشتر است. نتایج آزمون آماری ANOVA نشان داد غلظت هر دو نوع ذرات معلق ($PM_{2.5}$ و PM_{10}) بین ایستگاه ها از نظر آماری معنی دار است (P>۰/۰۵).

جدول ۱ . شاخص‌های آماری غلظت $PM_{2.5}$ و PM_{10} در دو فصل زمستان و تابستان

فصل	$PM_{2.5}$($\mu g/m^3$)				PM_{10}($\mu g/m^3$)			
	حداکثر	حداقل	انحراف معیار	میانگین	حداکثر	حداقل	انحراف معیار	میانگین
زمستان	۷۲/۲۸	۸/٦٤	۱٥/۹۸	۳۳/۷۷	۱۷۰/٦۸	۲۰/۷٤	۳۳/۱٤	۷۰/٤٦
تابستان	۸۹/۴۳	۱۴/۶۳	۱٦/۹۰	۳۷/٦۱	۱٤۸/۹٦	۱٦/۹۱	۲۷/۹٥	۷٥/۲
میانگین سالانه	۷۷/٤۳	۱۲/۹٤	۱۳/٥۷	۳٥/٦۸	۱٤۳/۱۰	۲۸/۹۸	۲۷/۹٥	۷۲/۸٦



نمودار ۱. میانگین سالانه غلظت $PM_{2.5}$ و PM_{10} در ایستگاه‌های نمونه برداری

ارزیابی خطر سلامت ناشی از مواجهه با ذرات معلق

پارامترهای ارزیابی ریسک بهداشتی ذرات معلق برای بزرگسالان و کودکان بر اساس دستورالعمل‌های USEPA و WHO شامل نرخ تنفس روزانه (IR)، مـدت و فرکانس مواجهه (ED و EF)، وزن بـدن (BW)، میانگین زمان مواجهـه (AT)، غلظت مرجع (RfC) و دوز مرجع (RfD) در جدول شماره ۲ ارایه شده است.

جدول ۲. راهنمای ضرایب و پارامترهای معادلات ارزیابی ریسک بهداشتی ذرات معلق

پارامتر	بزرگسالان	کودکان	واحد	منبع/توضیح
IR (Inhalation Rate)	۲۰	۱۰	m^3/day	نرخ تنفس روزانه(USEPA)
EF (Exposure Frequency)	۳۶۵	۳۶۵	day/year	روزهای تماس در سال
ED (Exposure Duration)	۷۰	۶	year	مدت تماس
BW (Body Weight)	۷۰	۱۵	kg	وزن بدن
(Average exposure time)ATnon-cancer	۱۰۹۵۰	۲۱۹۰	days	میانگین زمان مواجهه (روز) برای ریسکهای غیرسرطانی
RfD(reference dose)	۱/۱×۱۰$^{-۳}$	۱/۱×۱۰$^{-۳}$	mg/kg/day	حد مرجعPM_{10} (USEPA/WHO)
RfC(reference concentration)	۰/۰۵	۰/۰۵	mg /m^3	
RfD(reference dose)	۱×۱۰$^{-۳}$	۱×۱۰$^{-۳}$	mg/kg/day	حد مرجع$PM_{2.5}$ (USEPA/WHO)
RfC(reference concentration)	۰/۰۰۵	۰/۰۰۵	mg /m^3	

جـدول ۳ نتایـج خطرات سـلامتی مرتبط بـا استنشـاق ذرات$PM_{2.5}$ و PM_{10} برای بزرگسـالان و کودکان را نشـان می‌دهد. شاخص دوز طول عمر (LADD) برای بررسـی احتمال خطرات سرطان‌زایی طولانی‌مدت اسـتفاده می‌شـود. در کودکان، مقادیر LADD برای PM_{10} و $PM_{2.5}$ بـه ترتیب ۰/۰۰۰۲۴ و ۰/۰۰۰۴۹ mg/kg/day اسـت که نسـبتاً پایین بـوده و خطر مسـتقیم غیرسـرطان‌زایی کـم ارزیابی می‌شـود. این مقدار برای بزرگسـالان در مورد PM_{10} برابـر ۰/۰۰۱۰۲ و برای $PM_{2.5}$ برابر ۰/۰۰۰۵۰ mg/kg/day محاسـبه شـده اسـت. علیرغـم پاییـن بودن LADD بـرای هر دوگروه سـنی بزرگسـالان و کودکان، شـرایط اقلیمی بندرعبـاس و رطوبت بالای هـوا، ترافیک شـهری، فعالیتهای صنعتی و وارونگی دمـا باعث ماندگاری ذرات در لایه‌های پایین جو شـده و مواجهه واقعی ممکن است بیشتر باشد. بنابراین شاخص‌های محاسبه‌شده نسبت به برآورد خطر واقعی محافظه‌کارانه هستند.

جدول ۳. خطرات سلامتی مرتبط با مواجهه استنشاقی با ذرات معلق

گروه سنی	ذرات معلق	عوامل ریسک			
		ADDinh (mg/kg/day)	LADD (mg/kg/day)	HQ_i	HI
کودکان	PM_{10}	۰/۰۰۰۹۵	۰/۰۰۰۴۹	۰/۸۶	۱/۳۲
	$PM_{2.5}$	۰/۰۰۰۴۶	۰/۰۰۰۲۴	۰/۴۶	
بزرگسالان	PM_{10}	۰/۰۰۰۱۹۶	۰/۰۰۱۰۲	۱/۷۸	۲/۷۴
	$PM_{2.5}$	۰/۰۰۰۹۶	۰/۰۰۰۹۶	۰/۹۶	

بر اساس دسـتورالعمل USEPA، مقادیر HQ_i بالاتر از ۱ بیانگر احتمال بروز اثرات نامطلوب غیرسـرطان‌زا مانند التهاب مجاری تنفسـی، تشـدید بیماری‌های قلبی- عروقی و کاهش ظرفیت ریوی اسـت. به عبارتیHQ_i نشـان می‌دهد که مقدار دوز استنشاقی(ADD) نسبت به حد مجاز مرجع (RfD) چقدر اسـت. همچنین HI حاصل جمع HQها برای چند آلاینده است و اگر HI>1 باشد، خطر تجمعی از نظر تنفسی یا قلبی-عروقی تشدید

می‌شود. با توجه به نتایج به دست آمده در این تحقیق HI در کودکان ۱/۳۲ و به این معنی است که مواجهه مزمن می‌تواند منجر به اثرات غیرسرطان‌زا مانند تحریک مجاری تنفسی و افزایش سرفه و علائم آسم شود. کودکان به‌دلیل وزن پایین‌تر و نرخ تنفس بالاتر نسبت به بزرگسالان، حساس‌ترند (۱۰). اگرچه HQ هر آلاینده به تنهایی زیر ۱ است، اثر تجمعی دو آلاینده $PM_{2.5}$ و PM_{10} باعث عبور HI از آستانه خطر شده است. از منظر بهداشتی، لازم است که اقدامات کنترلی برای کاهش مواجهه (به‌ویژه در مدارس و فضاهای باز) صورت گیرد.HI در بزرگسالان ۲/۷۴ برآورد شد که به‌طور قابل‌توجهی بیشتر از ۱ و نشان‌دهنده‌ی خطر قابل‌توجه است. در مقایسه دو گروه ذرات معلق ۲/۵ و ۱۰ میکرون، بیشترین سهم خطر مربوط به ذرات PM_{10} است، زیرا HQ آن نزدیک به ۱/۸ محاسبه شده است؛ این ذرات در مجاری فوقانی تنفسی (بینی و گلو) رسوب کرده و می‌توانند سبب التهاب، سرفه مزمن، برونشیت و کاهش عملکرد ریوی شوند (۹). همچنین ذرات$PM_{2.5}$ اگرچه کوچک‌ترند، ولی به عمق ریه نفوذ می‌کنند و اثرات سیستمیک (قلبی- عروقی و عصبی) دارند (۲۴). در مجموع، مقدار HI= ۲/۷۴ نشان می‌دهد که بزرگسالان دو تا سه برابر حد ایمن در معرض میزان آلودگی قرار دارند. همچنین مقادیر HQ برای میانگین غلظت PM_{10} و $PM_{2.5}$ بیانگر وجود خطر بالقوه‌ی غیرسرطان‌زایی به‌ویژه برای کودکان و گروه‌های حساس است.

بحث و نتیجه‌گیری

در این مطالعه میانگین غلظت $PM_{2.5}$ و PM_{10} به ترتیب ۳۵/۶۸ و ۷۲/۸۶ $\mu g/m^3$ اندازه‌گیری شد که به‌طور قابل توجهی بالاتر از استانداردهای سازمان جهانی بهداشت است. میانگین کلی غلظت ذرات معلق $PM_{2.5}$ بیش از ۳/۵ برابر حد مجاز سالانه سازمان جهانی بهداشت است و نشان‌دهنده‌ی وضعیت نگران‌کننده آلودگی هوای منطقه می‌باشد. مقایسه فصلی نشان داد که در فصل تابستان به‌دلیل افزایش دما، کاهش بارندگی و احتمال افزایش فعالیت‌های صنعتی و احتراقی، میانگین غلظت‌ها اندکی بالاتر از زمستان بوده است. این تفاوت فصلی، بیانگر نقش شرایط اقلیمی و منابع احتراقی در کنترل یا تشدید غلظت ذرات معلق است. نتایج Schikowski و همکاران (۲۰۱۴)، Sanguineti و همکاران (۲۰۲۰) و Hoseinzadeh و همکاران (۲۰۲۲) نیز نشان داده است شرایط اقلیمی و تغییرات فصلی بر میزان غلظت ذرات معلق هوا موثرند(۲۶، ۲۵، ۴). میرعلیزاده و همکاران(۲۰۲۴) میانگین سالانه PM_{10} و $PM_{2.5}$ را در منطقه پونک تهران به ترتیب $\mu g/m$ ۸۱/۵ و ۳۱ به دست آوردند که غلظت PM_{10}اندازه گیری شده از مقادیر تحقیق حاضر بیشتر است(۲۷). آزاده دل و همکاران(۲۰۲۵) میانگین غلظت PM_{10} و $PM_{2.5}$ اندازه‌گیری شده در هوای منطقه صنعتی بندرعباس به ترتیب ۲۹/۷۰ و ۵۶/۱۳ میکروگرم بر متر مکعب و در هوای منطقه غیرصنعتی بندرعباس به ترتیب ۲۹/۴۰ و ۴۶/۱۵ میکروگرم بر متر مکعب گزارش داده اند که از نتایج تحقیق کنونی کمتر هستند(۲۸).

با توجه به مقادیر $PM_{2.5}$+HI (PM_{10}) و $PM_{2.5}$+LADD (PM_{10}) برای بزرگسالان به ترتیب ۲/۷۴ و ۰/۰۰۱۵۲ (mg/kg/day) مواجهه این گروه سنی در محدوده‌ی خطر غیرسرطانی است. مقادیر (HI $PM_{2.5}$+(PM_{10}) و $PM_{2.5}$+LADD(PM_{10}) به ترتیب ۱/۳۲ و ۰/۰۰۰۷۳(mg/kg/day) مواجهه کودکان نشان دهنده وضعیت مرزی خطرناک است. هر چند که دوز طول عمر (LADD) برای کودکان و بزرگسالان پایین بود و خطر مستقیم سرطان‌زایی کم ارزیابی شد، اما شرایط اقلیمی بندرعباس شامل رطوبت بالا، وارونگی دما و ماندگاری ذرات در لایه‌های پایین جو می‌تواند مواجهه واقعی را افزایش دهد. Esmaeili و همکاران (۲۰۲۱) در مطالعه‌ای بر روی جنوب ایران نشان دادند که رخدادهای گردوغبار و افزایش PM_{10} با شرایط پایدار جوی، شرایط اقلیمی و بادهای ضعیف همبستگی بالایی دارند (۲۹).

مطالعات مقایسه‌ای نشان می‌دهد کودکان نسبت به بزرگسالان دوز استنشاقی بیشتری دریافت می‌کنند و آسیب‌پذیری بالاتری دارند. علاوه بر آن، $PM_{2.5}$ در واکنش با گازهای ثانویه مانند NO_2 و SO_2 ذرات ثانویه سمی تشکیل می‌دهد که در رطوبت بالا اثرات سمی آن‌ها تشدید می‌شود (**۳۰**). شرایط پایدار جوی و بادهای کم نیز موجب تجمع آلاینده‌ها می‌شوند، بنابراین خطرات قلبی و تنفسی در این منطقه افزایش می‌یابد. مطالعات آزاده دل و همکاران (۲۰۲۵) وSánchez-Piñero و همکاران (۲۰۲۲) نیز نشان می‌دهد میانگین غلظت ذرات معلق PM_{10} و $PM_{2.5}$ ثبت شده در مناطق صنعتی بالاتر از مناطق غیر صنعتی است و بخشی از بیماری‌های تنفسی ومرگ ومیرها در مناطق آلوده منتسب به ذرات معلق آلودگی هوا می‌باشد(۲۸ ، ۳۱).

شاخص‌های خطر غیرسرطانی HI در کودکان ۱/۳۲ و در بزرگسالان ۲/۷۴ نشان‌دهنده خطر غیرسرطانی قابل توجه ناشی از مواجهه مزمن با ذرات معلق است. کودکان به دلیل وزن کمتر و نرخ تنفس بالاتر حساس‌تر هستند و HI آن‌ها با عبور از آستانه ۱، احتمال بروز اثراتی مانند تحریک مجاری تنفسی، سرفه و تشدید علائم آسم را نشان می‌دهد. در بزرگسالان، بیشترین سهم خطر ناشی از PM_{10} است که سبب التهاب مجاری

فوقانی تنفسی و کاهش عملکرد ریوی می‌شود، در حالی که $PM_{2.5}$ با نفوذ به ریه اثرات سیستمیک قلبی و عصبی ایجاد می‌کند. به‌طور کلی، یافته‌های این بخش بیانگر آن است که قرارگیری مداوم در معرض سطوح بالای $PM_{2.5}$ می‌تواند اثرات منفی بلندمدت بر سلامت انسان، به‌ویژه کودکان، داشته باشد و لزوم پایش دقیق‌تر، کنترل منابع آلاینده و اجرای اقدامات مدیریتی مؤثر در نواحی صنعتی را تأکید می‌کند. دوز تنفسی محاسبه شده برای کودکان و بزرگسالان نشاندهنده مواجهه روزانه بالا است. کودکان به دلیل وزن کمتر، نرخ تنفس بالاتر و و سیستم ایمنی در حال رشد، نسبت به آلاینده‌های هوا و به‌ویژه ذرات معلق حساس‌تر هستند. مطالعات متعددی نشان داده‌اند که مواجهه کودکان با $PM_{2.5}$ منجر به دریافت دوز استنشاقی بالاتر و افزایش خطر غیرسرطانی می‌شود. برای نمونه، در مطالعه‌ای در منطقه آمازون، شاخص خطر غیرسرطانی (RQ) برای کودکان حدود ۲/۲۳ یعنی دو برابر حد ایمن گزارش شده است (۳۲). همچنین Liu و همکاران (۲۰۲۳) نشان داد که مواجهه با $PM_{2.5}$ باعث کاهش معنی‌دار عملکرد ریوی در کودکان می‌شود(۳۳). در پژوهش Edlund و همکاران (۲۰۲۱) نیز ذکر شده است که کودکان به‌دلیل نسبت نرخ تنفس به وزن بدن بالاتر، تقریباً سه برابر بزرگسالان دوز استنشاقی بیشتری دریافت می‌کنند(۳۴). این شواهد به‌خوبی آسیب‌پذیری بیشتر کودکان را در برابر آلودگی هوای بندرعباس توجیه می‌کند. یافته‌های مطالعه میرعلیزاده و همکاران (۲۰۲۴) نشان داد با توجه به مقادیر $PM_{2.5}$ در هوای شهر تهران، خطر ابتلا به سرطان برای همهٔ گروه‌های سنی به ویژه برای کودکان زیر ۳ سال بالا بود. میانگین HQ در همان مطالعهٔ برای $PM_{2.5}$ در بزرگسالان ۰/۴۷ و در کودکان ۰/۴۳ بود که کمی از نتایج این تحقیق کمتر هستند(۲۷). در بزرگسالان، ذرات درشت‌تر (PM_{10}) عمدتاً در مجاری فوقانی دستگاه تنفس ته‌نشین می‌شوند و سبب التهاب، تحریک مخاطی و کاهش ظرفیت ریوی می‌گردند. Schikowski و همکاران (۲۰۱۴) گزارش کردند که افزایش ۱۰ $\mu g/m^3$ در غلظت PM_{10} با افزایش ۲۷٪ در خطر ابتلا به بیماری انسدادی مزمن ریه همراه است (۲۵). همچنین مطالعه‌ای در کره جنوبی نشان داد افزایش PM_{10} باعث کاهش معنی‌دار کیفیت زندگی بیماران آسم بزرگسال می‌شود (۳۳). بنابراین، نتایج این پژوهش که در گروه بزرگسالان، مبنی بر نقش ذرات PM_{10} در شاخص خطر غیرسرطانی، با یافته‌های بین‌المللی همخوانی دارد.

براساس مطالعات آزاده دل و همکاران (۲۰۲۵) مؤلفه منتسب به کل مرگ و میر ناشی از PM_{10} و $PM_{2.5}$ در منطقه صنعتی بندرعباس به ترتیب برابر با ۱۷/۳۱٪ و ۱۴/۹۰٪ و میزان مرگ و میر تنفسی منتسب به همین دو آلاینده به ترتیب ۲۰/۹۸٪ و ۳۷/۲۶٪ است(۲۸). نتایج Fouladi Fard (۲۰۲۱) نشان داد درصد نسبت قابل انتساب (AP٪) و موارد اضافی منتسب (نفر) برای کل مرگ و میر ناشی از PM_{10} در سال ۲۰۱۵ در اراک به ترتیب ۴/۹٪ و ۱۴۸ نفر بود(۳۶). در این مطالعه مشخص شد که بادهای غالب غربی می‌توانند ذرات معلق تولید شده از نیروگاه‌ها، پتروشیمی‌ها و طوفان‌های گرد و غبار غربی را افزایش دهند و منجر به افزایش مرگ و میر و بیماری‌های مرتبط با آلاینده‌های ذرات معلق هوا در اراک شوند.

باید توجه داشت که ذرات معلق ترکیبی از مواد شیمیایی متعدد از جمله فلزات سنگین، ترکیبات آلی فرار، دوده و سولفات‌ها است که در شرایط واقعی می‌تواند اثرات تجمعی و هم‌افزا ایجاد کند؛ بنابراین ارزیابی جامع‌تر به‌ویژه اثرات سرطان زایی آن‌ها با در نظر گرفتن ترکیب شیمیایی ذرات ضروری است (۵،۱۴). به‌طور کلی، نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که در ناحیه صنعتی بندرعباس، مواجهه با PM_{10} و $PM_{2.5}$ می‌تواند خطرات قابل توجهی برای سلامت عمومی، به‌ویژه برای کودکان، سالمندان و افراد مبتلا به بیماری‌های قلبی و ریوی ایجاد کند. از آنجا که مقادیر HQ_i در محدوده‌ی بالا قرار دارند، پیشنهاد می‌شود اقدامات فوری برای کنترل منابع انتشار صنعتی، ارتقای فیلترهای خروجی، بهبود تهویه طبیعی در مناطق مسکونی مجاور، کنترل ترافیک و افزایش پوشش گیاهی در دستور کار قرار گیرد. همچنین پایش مداوم کیفیت هوا، اطلاع رسانی عمومی در مورد روزهای آلوده و اجرای برنامه‌های آموزشی زیست محیطی برای کارگران صنایع و ساکنان منطقه میتواند نقش مؤثری در کاهش مواجهه و ارتقای سلامت جامعه ایفا کند.

References

1. Nirmalkar J, Lee K, Ahn J, Lee J, Song M. Comparisons of spatial and temporal variations in PM2.5 bound trace elements in urban and rural areas of South Korea, and associated potential health risks. Atmosphere. 2023;14:753. doi:10.3390/atmos14040753
2. Guan LF, Geng XK, Shen JM, James Y, Li FW, Du HS, et al. PM2.5 inhalation induces intracranial atherosclerosis which may be ameliorated by omega-3 fatty acids. Oncotarget. 2018;9(3):3765–78. doi:10.18632/oncotarget.23347.
3. Alias NF, Firoz Khan M, Asrina Sairi N, Md Zain S, Suradi H, Ab Rahim H, et al. Characteristics, emission sources, and risk factors of heavy metals in PM2.5 from Southern Malaysia. ACS Earth Space Chem. 2020;4(8):1309–23. doi:10.1021/acsearthspacechem.0c00103.
4. Sanguineti PB, Lanzaco BL, López ML, Achad M, Palancar GG,

Olcese LE, et al. PM2.5 monitoring during a 10-year period: relation between elemental concentration and meteorological conditions. Environ Monit Assess. 2020;192:1–9. doi:10.1007/s10661-020-08288-0.

5. Sawaeng K, Susira B, Somporn C. Health risk assessments and source apportionment of PM2.5-bound heavy metals in the initial eastern economic corridor (EEC): a case study of Rayong Province, Thailand. Atmos Pollut Res. 2024;15(9):102205. doi:10.1016/j.apr.2024.102205.
6. He H, Wang XM, Wang YS, Wang ZF, Liu JG, Chen YF. Formation mechanism and control strategies of haze in China. Bull Chin Acad Sci. 2013;28(3):344–52. Chinese.
7. Hao J, Ge Y, He SY, Lu N, Wang QG. Size distribution characteristics of metal elements in air particulate matter during autumn in Nanjing. China Environ Sci. 2018;38(12):4409–14. Chinese. doi:10.19674/j.cnki.issn1000-6923.2018.0493.
8. Kioumourtzoglou MA, Schwartz JD, Weisskopf MG, Melly SJ, Wang Y, Dominici F, et al. Long-term PM2.5 exposure and neurological hospital admissions in the northeastern United States. Environ Health Perspect. 2016;124(1):23–9. doi:10.1289/ehp.1408973.
9. Park M, Joo HS, Lee K, Jang M, Kim SD, Kim I, et al. Differential toxicities of fine particulate matters from various sources. Sci Rep. 2018;8:1–11. doi:10.1038/s41598-018-35398-0.
10. Peden DB. Respiratory health effects of air pollutants. Immunol Allergy Clin North Am. 2024;44(1):15–33. doi:10.1016/j.iac.2023.07.004.
11. World Health Organization. Ambient (outdoor) air pollution [Internet]. Geneva: WHO; [cited 2023 Jun 29]. Available from: https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health
12. Roostaei V, Abbasi A, Gharibzadeh F, Faridi S, Naddafi K, Yunesian M, et al. Vertical distribution of air particulate matter (PM1, PM2.5, and PM10) in different regions of Tehran. Aerosol Air Qual Res. 2024;24(10):240036. doi:10.4209/aaqr.240036.
13. Yunesian M, Rostami R, Zare A, Fazlzadeh M, Janjani H. Exposure to high levels of PM2.5 and PM10 in the metropolis of Tehran and the associated health risks during 2016–2017. Microchem J. 2019;150:104174.
14. Zhang ZY, Mamat A, Simayi Z. Pollution assessment and health risks evaluation of (metalloid) heavy metals in urban street dust of 58 cities in China. Environ Sci Pollut Res. 2019;26:126–40.
15. Ministry of the Environment (MoE) and National Institute of Environmental Research (NIER). Air Pollution Monitoring Network installation and operation guidelines [Internet]. 2022 [cited 2024 Dec 1]. Available from: https://www.airkorea.or.kr/web/board/3/769/?pMENU_NO=145&page=1
16. Kabir MH, Kormoker T, Islam MS, Khan R, Shammi RS, Tusher TR, et al. Potentially toxic elements in street dust from an urban city of a developing country: ecological and probabilistic health risks assessment. Environ Sci Pollut Res. 2021;28:57126–48.
17. Bartholomew CJ, Li N, Li Y, Dai WS, Nibagwire D, Guo T. Characteristics and health risk assessment of heavy metals in street dust for children in Jinhua, China. Environ Sci Pollut Res. 2020;27:5042–55.
18. Ferreira-Baptista L, Miguel ED. Geochemistry and risk assessment of street dust in Luanda, Angola: a tropical urban environment. Atmos Environ. 2005;39:4501–12.
19. US EPA. Risk Assessment Guidance for Superfund (RAGS); Volume I: Human Health Evaluation Manual. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency; 2011.
20. Zheng N, Liu JS, Wang QC, Liang ZZ. Health risk assessment of heavy metal exposure to street dust in the zinc smelting district, northeast of China. Sci Total Environ. 2010;408:726–33.
21. US EPA. Supplemental Guidance for Developing Soil Screening Levels for Superfund Sites. Washington, DC: Office of Emergency and Remedial Response, U.S. Environmental Protection Agency; 2001.
22. Cai LM, Wang QS, Luo J, Chen LG, Zhu RL, Wang S, et al. Heavy metal contamination and health risk assessment for children near a large Cu-smelter in central China. Sci Total Environ. 2019;650:725–33.
23. US EPA. Supplemental Guidance for Developing Soil Screening Levels for Superfund Sites. Washington, DC: Office of Emergency and Remedial Response, U.S. Environmental Protection Agency; 2002.
24. Domínguez-Rodríguez A, Abreu-Afonso J, Rodríguez S, Juárez-Prera RA, Arroyo-Ucar E, et al. Comparative study of ambient air particles in patients hospitalized for heart failure and acute coronary syndrome. Rev Esp Cardiol (Engl Ed). 2011;64(8):661–6.
25. Schikowski T, Adam M, Kunzli N. Long-term PM10 exposure and chronic obstructive pulmonary disease in women. Environ Health Perspect. 2014;122(4):437–43.
26. Hoseinzadeh A, Karimi H, Rostami R. Meteorological drivers of PM2.5 and PM10 variations in southern Iran. Environ Monit Assess. 2022;194(8):560.
27. Miralizadeh Fard SR, Khoram Nejadian S, Rashidi Y. Health risk assessment of air particulate pollutants (PM10 and PM2.5) in Tehran, a case study of Poonak. J Nat Sci. 2024;76(4):675–87. doi:10.22059/jne.2023.356444.2536.
28. Del Fatemeh A, Dindarloo IK, Alipur V, Ghaffari HR, Dehghani S. Assessment of health risk and mortality caused by exposure to suspended particles (PM10, PM2.5) in industrial and non-industrial areas of Bandar Abbas city, Iran, 2023: a cross-sectional study. Int J Environ Health Res. 2025;35(7):1916–24.
29. Esmaeili M, Broomandi P, Hosseini V. Meteorological analysis of dust events in southern Iran. Atmosphere. 2021;12(10):1350.
30. Chen Y, Li M, Wang T. Cardiopulmonary toxicity of PM2.5 exposure: a comprehensive review. Front Environ Health. 2024;2:11215765.
31. Sánchez-Piñero J, Novo-Quiza N, Moreda-Piñeiro J, Turnes-Carou I, Muniategui-Lorenzo S, López-Mahía P. Multi-class organic pollutants in atmospheric particulate matter (PM2.5) from a Southwestern Europe industrial area: levels, sources and human health risk. Environ Res. 2022;214:114195. doi:10.1016/j.envres.2022.114195.
32. Silva AMC, Mattos IE, Ignotti E. Air pollution and children's health in the Brazilian Amazon. Environ Health. 2012;11:64.

33. Liu J, Wang Q, Zhao L. Effects of PM2.5 exposure on lung function in children: systematic review and meta-analysis. Front Public Health. 2023;11:10183178.

34. Edlund K, Botha R, Burger R. Health risk assessment of inhalation exposure to particulate matter [Internet]. Pretoria: University of Pretoria Repository; 2021.

35. Park HK, Kim YH, Lee JH. Impact of ambient PM10 on quality of life in adult asthma patients. Int J Environ Res Public Health. 2020;17(7):2413.

36. Fouladi Fard R, Dordshaikh Torkamani F, Mahvi AH, Fahiminia M, Koolivand A, Hosseini MR, et al. Health effects from particulate air pollution in one of the industrial cities of Iran. J Air Pollut Health. 2021;6(2):135–48.