

Quantification of Health Burden Attributable to PM Emissions from Thermal Power Plants in Tehran: An Integrated AERMOD-GIS-AirQ+ Approach

Fatemeh Hassani¹, Dr. Mostafa Panahi^{2*}, Dr. Nabiollah Mansouri³, Dr. Yousef Rashidi⁴, Dr. Saeed Motesaddi Zarandi⁵

1. Ph.D. student, environmental health engineering, air pollution, Science and Research Branch University
- *2. Assoc. Professor of environmental economics, Science and Research Branch University
3. Professor environmental health engineering, air pollution, Science and Research Branch University
4. Assistant Professor of Environmental Sciences Research Institute, Shahid Beheshti University
5. Professor of environmental health at Shahid Beheshti University of Medical Sciences

*Email Address: mpstudents.2020@gmail.com

Article Info	ABSTRACT
Article Type: Research Paper Article History: Received Date: 2026/09/09 Revised Date: 2026/09/17 Accepted Date: 2026/10/24 Published Date: 2026/10/27 Keywords: AERMOD, AirQ+, PM pollutant, power plant, relative risk.	Air pollution is one of the most important risk factors for mortality and morbidity in urban communities. Quantifying the health effects of specific pollution sources, particularly power plants, is essential for effective policymaking. In this study, concentrations of particulate matter (PM) emitted from five thermal power plants in Tehran during 2015–2019 were simulated using the AERMOD dispersion model. Then, by integrating population layers in a Geographic Information System (GIS) and applying the AirQ+ software, health outcomes including premature mortality, lung cancer, acute lower respiratory infections (ALRI), chronic obstructive pulmonary disease (COPD), ischemic heart disease (IHD), and stroke were estimated. The distribution from the air pollution model shows that the maximum PM concentrations in the studied years were 17.5, 15.1, 23.3, 37, and 41.14 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectively. The highest value occurred in 2019 with a relative risk (RR) of 1.2 (95% CI: 1.13–1.28). However, the lowest RR was related to 2015 with a value of 1.05 (95% CI: 1.03–1.06). These RR values are significant and require action by decision-makers to reduce air pollution. On the other hand, lung cancer, with approximately 112.53 (RR=1.31, 95% CI) in 2019, had the highest rate compared to other diseases. The estimated attributable burden per 100,000 population indicates that lung cancer ranks first, followed by acute lower respiratory infections (ALRI) with approximately 102.76 (RR=1.27, 95% CI) in second place. The lowest rate was for lung cancer in 2019 in the range of 73.76 (RR=1.18, 95% CI). The substantial burden of diseases attributable to PM from power plants in Tehran underscores the urgent need for emission reduction measures, particularly through fuel switching and upgrading pollution control technologies. The integrated AERMOD-GIS-AirQ+ approach provides an efficient tool for quantitative health risk assessment and supports managerial decision-making.
Cite this article:	Fatemeh Hassani, Dr. Mostafa Panahi, Dr. Nabiollah Mansouri, Dr. Yousef Rashidi, Dr. Saeed Motesaddi Zarandi (2026) Quantification of Health Burden Attributable to PM Emissions from Thermal Power Plants in Tehran: An Integrated AERMOD-GIS-AirQ+ Approach, Journal of Environmental Sciences Studies, 11(3), Pages 11360-11371.

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Air pollution is one of the most important environmental health risks, and particulate matter (PM) is strongly associated with mortality and morbidity. Although many studies have assessed air pollution health effects in Iran, few have specifically quantified the health burden attributable to thermal power plants in Tehran using an integrated modeling approach. This study therefore aimed to quantify the health effects of PM emitted from five thermal power plants in Tehran—Rey, Damavand, Besat, Tarasht, and Parand—on the exposed population during 2015–2019 (1394–1398).

Methods

PM emissions from the five power plants were simulated using the AERMOD dispersion model. Input data included stack coordinates, emission rates from the Ministry of Energy, stack height and diameter, exhaust gas velocity and temperature, fuel type, and meteorological data (wind speed, temperature, pressure, and atmospheric stability). AERMET and AERMAP were used for meteorological and terrain preprocessing, and annual average PM concentrations were calculated on a 1×1 km grid. Population exposure was estimated in GIS by intersecting AERMOD concentration layers with population layers for ages 1–75 years across Tehran's 22 municipal districts. People living in areas with PM concentrations above $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ were considered exposed. Health impacts were then estimated with AirQ+, using baseline incidence and relative risk (RR) values, including premature mortality, lung cancer (LC), acute lower respiratory infection (ALRI), chronic obstructive pulmonary disease (COPD), ischemic heart disease (IHD), and stroke.

Results

The modelled maximum PM concentrations for 2015–2019 were approximately 17.5, 15.1, 23.3, 37, and $41.14 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectively. The highest RR was in 2019: $\text{RR} = 1.2$ (95% CI: 1.13–1.28), while the lowest was in 2015: $\text{RR} = 1.05$ (95% CI: 1.03–1.06). In 2019, the exposed population was about 1,003,624, with an estimated 81.66 attributable cases per 100,000 exposed people and about 8,194 attributable cases overall. For 2019, the estimated attributable cases per 100,000 were approximately: lung cancer 112.53 ($\text{RR} = 1.31$), ALRI 102.76 ($\text{RR} = 1.27$), IHD 92.08 ($\text{RR} = 1.24$), COPD 85.39 ($\text{RR} = 1.21$), stroke 81.73 ($\text{RR} = 1.20$), and another cancer/tumor category 73.76 ($\text{RR} = 1.18$). Lung cancer had the highest attributable burden, followed by ALRI. Emissions and attributable health cases showed an increasing trend from 2015 to 2019, although 1395/2016 had lower values, likely due to fuel switching and cleaner fuel measures.

Conclusion

The study found a substantial health burden attributable to PM emissions from Tehran's thermal power plants. The results highlight the need for urgent emission-reduction measures, especially fuel switching and upgrading pollution-control technologies. The integrated AERMOD–GIS–AirQ+ approach was shown to be an effective tool for spatially explicit, quantitative health-risk assessment and can support managerial decision-making and priority-setting for air pollution control in Tehran.



کمی سازی بار سلامت منتسب به انتشار PM از نیروگاه های حرارتی تهران: رویکرد تلفیقی AERMOD، GIS و AirQ+

فاطمه حسنی^۱، دکتر مصطفی پناهی^{۲*}، دکتر نبی الله منصوری^۳، دکتر یوسف رشیدی^۴،
دکتر سعید متصدی زرنندی^۵

۱- دانشجوی دکتری، مهندسی بهداشت محیط، آلودگی هوا، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات

۲* - دانشیار اقتصاد محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات

۳- استاد مهندسی بهداشت محیط، آلودگی هوا، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات

۴- استادیار پژوهشکده علوم محیطی، دانشگاه شهید بهشتی

۵- استاد دانشکده بهداشت محیط، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی

*ایمیل نویسنده مسئول: mpstudents.2020@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله علمی پژوهشی	مقدمه: آلودگی هوا یکی از مهمترین عوامل خطر مرگ و میر و عوارض بیماری در جوامع شهری محسوب می شود. تعیین کمی آثار بهداشتی ناشی از منابع خاص آلاینده، به ویژه نیروگاه ها، برای سیاست گذاری مؤثر، ضروری است. روش شناسی: در این مطالعه، غلظت ذرات معلق (PM) ناشی از فعالیت پنج نیروگاه حرارتی شهر تهران در بازه زمانی ۱۳۹۴ تا ۱۳۹۸ با استفاده از مدل پراکندگی AERMOD شبیه سازی شد. سپس، با تلفیق لایه های جمعیتی در سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) و به کارگیری نرم افزار AirQ+، پیامدهای سلامت شامل مرگ زود هنگام، سرطان ریه، عفونت حاد تنفسی تحتانی (ALRI)، بیماری مزمن انسدادی ریه (COPD)، بیماری ایسکمیک قلبی (IHD) و سکته مغزی برآورد گردید. یافته ها: توزیع حاصل از مدل آلودگی هوا نشان می دهد که بیشترین آلودگی ذرات معلق در سال های مورد مطالعه به ترتیب برابر با ۱۷/۵، ۱۵/۱، ۲۳/۳، ۳۷ و ۴۱/۱۴ میکروگرم بر مترمکعب بوده است. بیشترین مقدار در سال ۱۳۹۸ با خطر نسبی (RR) معادل ۱/۲ (با فاصله اطمینان ۹۵٪: ۱/۱۳ تا ۱/۲۸) به دست آمد. با این حال، کمترین مقدار RR مربوط به سال ۱۳۹۴ با مقدار ۱/۰۵ (با فاصله اطمینان ۹۵٪: ۱/۰۳ تا ۱/۰۶) بود. این مقادیر RR قابل توجه هستند و باید توسط تصمیم گیرندگان برای کاهش آلودگی هوا اقداماتی صورت گیرد. از سوی دیگر، سرطان ریه با حدود ۱۱۲/۵۳ (RR=1.31) با فاصله اطمینان ۹۵٪) در سال ۱۳۹۸ در مقایسه با سایر بیماری ها بیشترین میزان را دارد. که سرطان ریه در رتبه اول و عفونت حاد تنفسی تحتانی (ALRI) با حدود ۱۰۲،۷۶ (RR=1.27) با فاصله اطمینان ۹۵٪) در مرحله دوم قرار دارند. کمترین میزان مربوط به سرطان ریه در سال ۱۳۹۸ در محدوده ۷۳،۷۶ (RR=1.18) با فاصله اطمینان ۹۵٪) بود. نتیجه گیری: بار قابل توجه بیماری های منتسب به ذرات معلق نیروگاه ها در تهران، ضرورت اقدامات فوری برای کاهش انتشار، از طریق تغییر سوخت و ارتقای فناوری کنترل آلاینده ها را نشان می دهد. رویکرد تلفیقی AERMOD-GIS-AirQ+ ابزاری کارآمد برای ارزیابی کمی خطرات بهداشتی و پشتیبانی از تصمیم گیری ها ارائه می کند.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۶/۱۸	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۶/۲۶	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۸/۰۲	
تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۸/۰۵	
کلید واژه ها: AERMOD، AirQ+، آلاینده (PM)، نیروگاه، خطر نسبی	

۱- مقدمه

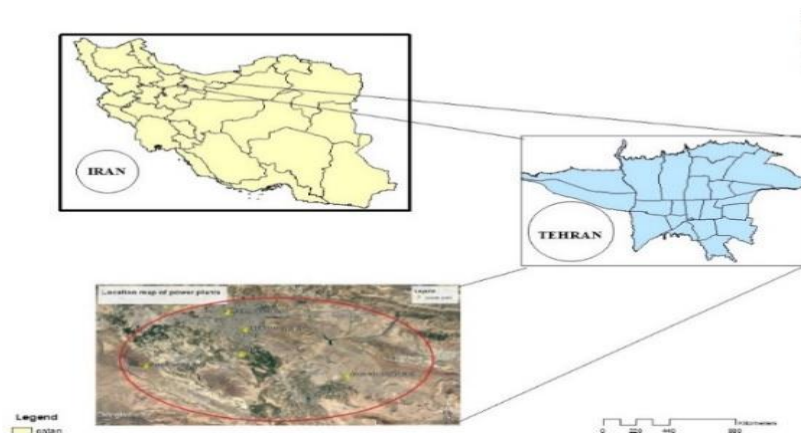
آلودگی هوا به عنوان یکی از چالش برانگیزترین مسائل زیست محیطی در مقیاس محلی، منطقه‌ای و همچنین جهانی مطرح است (Guerreiro et al., 2018) (Yunesian et al., 2019). آلودگی هوای محیط، یکی از علل اصلی زیست محیطی بیماری‌ها و مرگومیر در سراسر جهان است. ذرات معلق (PM) پنجمین عامل خطر بزرگ برای مرگومیر جهانی در مطالعه بار جهانی بیماری‌ها، صدمات و عوامل خطر (GBD) در سال ۲۰۱۵ محسوب می‌شود (haniabadi et al., 2017). بر اساس گزارش سازمان بهداشت جهانی (WHO) منتشر شده در سال ۲۰۱۲، تعداد مرگومیر ناشی از آلودگی هوای بیرون از منزل ۳ میلیون نفر، در مقایسه با حدود ۶۰۵ میلیون مرگ مرتبط با آلودگی هوای داخل و بیرون از منزل گزارش شده است (WHO et al., 2016). مطالعه‌ای توسط فلاحزاده و همکاران (۲۰۲۱) در مورد اثرات بهداشتی PM₁₀ در شهر یاسوج، نشان داد که خطر بیشتری برای علائم تنفسی (بروز علائم آسم در کودکان آسمی)، شیوع برونشیت در کودکان، بروز برونشیت مزمن در بزرگسالان و مرگومیر نوزادان پس از دوره نوزادی به دلیل مواجهه با PM₁₀ به ترتیب با خطر نسبی ۱/۰۳، ۱/۱، ۱/۱۲ و ۱/۰۴ وجود دارد. مطالعات متعددی در ایران به ارزیابی اثرات بهداشتی آلاینده‌ها با استفاده نسخه‌های پیشین ابزار AirQ پرداخته‌اند (Asl et al., 2018). (Ghozikali et al., 2016) (Hadei et al., 2017) نسخه جدید AirQ+ که توسط WHO توسعه یافته، قابلیت برآورد پیامدهای سلامت برای آلاینده‌های هوا از جمله PM₁₀، PM_{2.5}، O₃، کربن سیاه (BC) و NO₂ بر سلامت انسان در یک شهر خاص و در یک دوره زمانی معین، با استفاده از روش جدول‌های زندگی (life-tables) و بر اساس خطر نسبی (RR) برآورد شده از مطالعات کوهرت، طراحی کرده (Fattore et al., 2011) (Khomenko et al., 2021). یافته‌های ۴۷۶ مطالعه (با ۱۵۰۵ میلیون شرکت کننده) از ۱۲۳ کشور (که ۹۹ مورد حدود ۸۰٪) به عنوان کشورهای کم درآمد و با درآمد متوسط طبقه‌بندی شدند) معیارهای ورود را داشتند. آلودگی هوای داخل منزل با آسم ۱/۱۱ تا ۱/۳۶ (RR 1.23)، با فاصله اطمینان ۹۵٪ ارتباط مثبت داشت (kuan ken et al., 2020). در پرتغال، داده‌های مربوط به نرخ مرگومیر منتسب به آلودگی هوای داخل و خارج از منزل به دلیل کوتاهی و نامنظم بودن سری داده‌های موجود گزارش نشده است. برای تحلیل داده‌ها از مدل‌های ترکیبی خطی استفاده شد و توزیع مکانی نسبت مرگومیر قابل انتساب به NO₂، PM_{2.5} و O₃ تفاوت‌های قابل توجهی را بین مکان‌ها نشان داد (Brito et al., 2022). آلودگی هوا تعداد قابل توجهی از مرگومیر و عوارض بیماری را به جامعه تحمیل می‌کند و بنابراین، تعیین میزان اثرات آن بر سلامت در هر جامعه‌ای بسیار مهم است (Jalili naghan et al., 2022). رعایت دستورالعمل‌های سازمان بهداشت جهانی در مورد آلودگی هوا می‌توانست از ۵۱/۲۱۳ مرگ (با فاصله اطمینان ۹۵٪: ۳۴۰۰۳۶ تا ۶۸۰۶۸۲) در سال برای مواجهه با PM_{2.5} و ۹۰۰ مرگ (۰ تا ۲۴۷۶) در سال برای مواجهه با NO₂ جلوگیری کند (Khaniabadi et al., 2017) (Khaniabadi et al., 2017). (et al., 2017) آلودگی هوای ذرات معلق به عنوان یک عامل خطر اصلی برای بیماری ایسکمیک قلبی (IHD) و سکته مغزی شناخته شده است. این مطالعه با هدف برآورد مرگومیر زودهنگام ناشی از IHD و سکته مغزی منتسب به مواجهه طولانی مدت با PM_{2.5} در ۱۰ شهر ایران از اسفند ۱۳۹۱ تا اسفند ۱۳۹۳ با استفاده از مدل AirQ+ انجام شد (Hadei et al., 2020). با وجود این پیشینه، کمتر مطالعه‌ای به طور خاص به اثرات بهداشتی منتسب به نیروگاه‌ها در تهران با تلفیق مدل پراکندگی، GIS و AirQ+ پرداخته است. لذا هدف این تحقیق، کمی‌سازی اثرات ذرات معلق خروجی از پنج نیروگاه حرارتی تهران (ری، دماوند، بعثت، طرشت و پرند) بر سلامت ساکنین در معرض، در بازه ۱۳۹۴ تا ۱۳۹۸ می‌باشد.

۲- روش‌شناسی

موضوع آلودگی هوا آمیخته با زندگی مدرن بوده و پدیده‌ای جدید نیست. آلودگی هوا تعداد قابل توجهی از مرگومیر و عوارض بیماری‌ها را بر جامعه تحمیل می‌کند و بنابراین، تعیین میزان اثرات آن بر سلامت در هر جامعه‌ای بسیار مهم است. این مطالعه به دنبال ارزیابی غلظت و مرگومیر اضافی کوتاه مدت و بلند مدت منتسب به ذرات معلق مشاهده شده از نیروگاه‌ها (مانند ری، دماوند، بعثت، طرشت و پرند) در تهران بود.

• منطقه مورد مطالعه و منابع انتشار

منطقه مطالعه و منابع انتشار شهر تهران با جمعیت حدود ۹-۱۰ میلیون نفر در طول دوره مطالعه، در جنوب دامنه البرز واقع شده و شرایط توپوگرافی و اقلیمی آن مستعد انباشت آلاینده‌هاست. پنج نیروگاه حرارتی فعال در محدوده و حومه تهران شامل نیروگاه‌های ری، دماوند، بعثت، طرشت و پرند به عنوان منابع نقطه‌ای انتشار ذرات معلق انتخاب شدند. در این مطالعه، آلودگی ذرات معلق ناشی از فعالیت نیروگاه‌های شهر تهران از طریق مدل سازی آلودگی هوا بررسی شد و اثرات بهداشتی با تحلیل نتایج خروجی مدل AERMOD و به کمک مدل AirQ+ انجام گردید. موقعیت منطقه مطالعه و نیروگاه‌ها در شکل ۱ ارائه شده است:



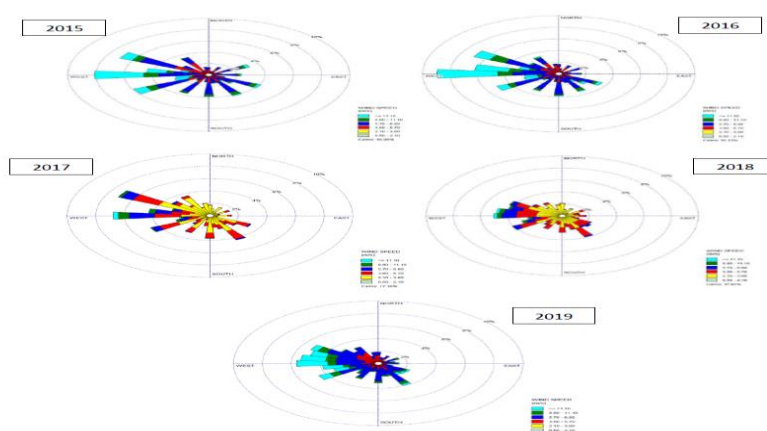
شکل ۱: موقعیت نیروگاه‌ها در شهر تهران

بنابراین، اطلاعات مورد نیاز و مراحل تحقیق به شرح زیر است:

• مدل سازی پراکندگی آلودگی هوا (AERMOD)

کمیته بهبود مدل نظارتی سازمان هواشناسی آمریکا و سازمان حفاظت محیط زیست (AERMIC) با هدف ارائه مفاهیم پیشرفته مدل سازی به مدل های کیفیت هوای سازمان حفاظت محیط زیست (EPA) تشکیل شد. دو پردازشگر داده ورودی، مؤلفه های نظارتی سیستم مدل سازی AERMOD هستند: AERMET: که یک پیش پردازشگر داده های هواشناسی است و پراکندگی هوا را بر اساس ساختار تلاطم لایه مرزی سیاره ای و مفاهیم مقیاس بندی ترکیب می کند، و AERMAP که یک پیش پردازشگر داده های توپوگرافی است و توپوگرافی پیچیده را با استفاده از داده های ارتفاعی دیجیتال سازمان زمین شناسی آمریکا (USGS) در نظر می گیرد (EEA., 2019). پیش پردازشگر AERMET داده های هواشناسی را پردازش کرده و مدل های لایه مرزی جو را برای استفاده در مدل برآورد می کند، و پیش پردازشگر AERMAP اطلاعات توپوگرافی منطقه را تحلیل کرده و در نهایت مدل از آن استفاده می کند. این دو پیش پردازشگر به همراه اطلاعات تکمیلی مربوط به منبع انتشار و شبکه دریافت، محاسبات خود را انجام داده و نتیجه نهایی را ارائه می دهد (Cimorelli et al., 2004). در این بخش، اطلاعات مورد نیاز در مدل کیفیت هوا شامل پارامترهای منبع، اطلاعات ساختمان های پایین دست برای هر نیروگاه، اطلاعات مربوط به ضرایب انتشار آلاینده خروجی نیروگاه پس از شناسایی نوع آلاینده هر منبع، اطلاعات اقلیمی و هواشناسی تهیه و وارد مدل می شود. اطلاعات به شرح زیر است، سپس نتیجه نرم افزار، نقشه های توزیع و مناطق تحت تأثیر آلودگی در نواحی اطراف نیروگاه را نشان می دهد. همچنین، وضعیت شهرهای تحت تأثیر آلودگی و تعیین سهم آلودگی در مناطق مشخص می شود. از آنجاکه نیروگاه های مورد نظر منابع نقطه ای هستند، اطلاعات مورد نیاز به صورت زیر تهیه می شود:

- مختصات جغرافیایی هر دودکش
 - نرخ انتشار PM (گرم بر ثانیه) بر اساس اندازه گیری های وزارت نیرو
 - ارتفاع و قطر دودکش
 - سرعت و دمای گازهای خروجی
 - نوع سوخت مصرفی
 - عوامل هواشناسی مانند:
 - سرعت باد
 - منحنی دمای مطلق
 - فشار هوا در منطقه
 - شرایط پایداری، ناپایداری هوا و زبری سطح
- جهت غالب باد در منطقه شمال غربی بوده و بیشینه سرعت باد در سال های ۱۳۹۴ و ۱۳۹۵ ثبت شده است (شکل ۲ - گلباد خروجی مدل). مدل برای هر سال به صورت مجزا اجرا شد و غلظت های میانگین سالانه PM در شبکه ای با تفکیک ۱×۱ کیلومتر محاسبه گردید.



تحت نسبت جمعیت قابل انتساب انجام می‌شود که به عنوان بخشی از پیامد سلامت در یک جمعیت معین که برای یک دوره خاص در معرض یک آلاینده جوی خاص قرار گرفته‌اند، تعیین می‌شود (Fallahizadeh et al., 2021) (Omidi et al., 2016) نسبت قابل انتساب را می‌توان به خطر نسبی با رابطه زیر مرتبط کرد (معادله ۱):

$$AP = \Sigma[(RR(c) \times 1) \times P(c)] [RR(c) \times P(c)] \quad (1)$$

که در آن $RR(c)$ مقدار خطر نسبی برای پیامدهای سلامت خاص در دسته «C» مواجهه است که از توابع پاسخ-مواجهه در مطالعات اپیدمیولوژیک مختلف به دست آمده است، AP نسبت قابل انتساب پیامدهای سلامت است و $P(c)$ نسبت جمعیت در معرض در دسته «C» می‌باشد. نرخ نسبت قابل انتساب مرتبط با مواجهه را زمانی می‌توان برآورد کرد که فراوانی پایه پیامد سلامت خاص در جمعیت مشخص باشد:

$$IE = I \times AP \quad (2)$$

که I میزان بروز پایه پیامد سلامت در جمعیت مورد مطالعه است و IE نرخ پیامد سلامت قابل انتساب به مواجهه می‌باشد (Fallahizadeh et al., 2021) (Omidi et al., 2016) (Omidi Khaniabadi et al., 2019) تعداد موارد اضافی برآورد شده مرتبط با مواجهه را می‌توان با دانستن اندازه جمعیت محاسبه کرد (معادله ۳):

$$NE = IE \times N \quad (3)$$

که NE تعداد موارد اضافی و N اندازه جمعیت مورد مطالعه است.

نرم افزار $AirQ+$ حاوی مقادیر پیش فرض RR مورد استفاده در مطالعه است. روش خطی-لگاریتمی برای برآورد خطرات نسبی غلظت‌های مختلف انتخاب شده است. داده‌های آلودگی ذرات معلق (PM): این مطالعه وضعیت آلودگی ذرات معلق ناشی از نیروگاه‌های تهران را برای یک دوره ۵ ساله (۱۳۹۴ - ۱۳۹۸) بررسی کرد. داده‌ها بر اساس تراز انتشار محاسبه شده توسط وزارت نیرو و داده‌های فیزیکی دودکش‌های نیروگاه‌ها است و در مدل آلودگی هوا استفاده شده است.

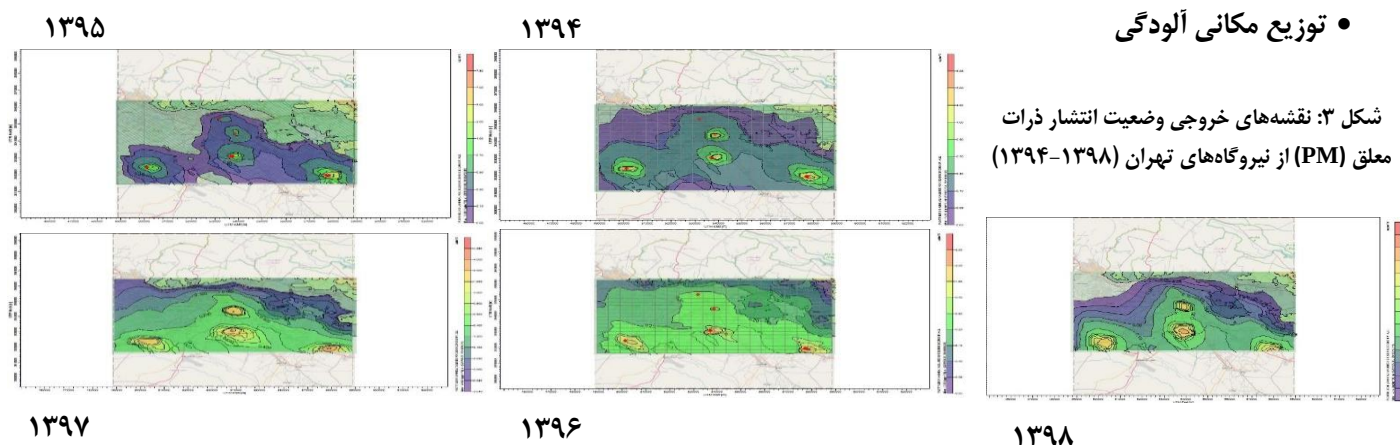
ارزیابی به‌طور کلی شامل چند مرحله کلیدی به شرح زیر است:

- ۱- تعیین غلظت انتشار از دودکش.
- ۲- ارزیابی انتقال آلودگی در محیط.
- ۳- محاسبه خطرات بهداشتی غیرسرطانی و سرطانی.
- ۴- تعیین خطرات بهداشتی.

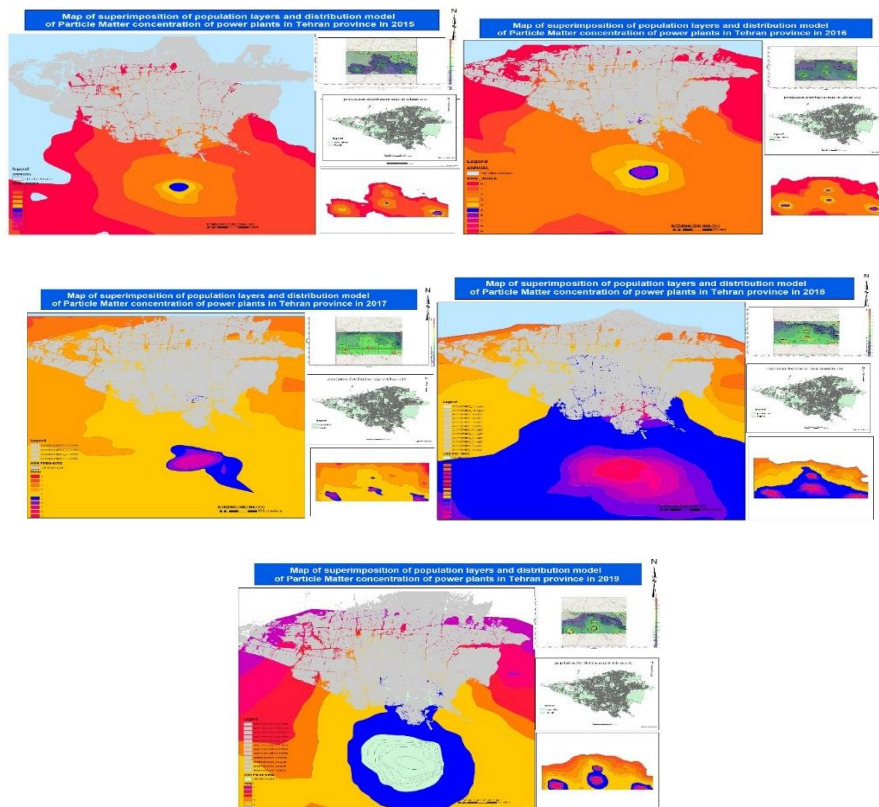
۳- نتایج

در این تحقیق، ۵ نیروگاه حرارتی در محدوده شهر تهران از نظر آلاینده‌های هوا در دوره‌های ۵ ساله از ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۹ مورد بررسی قرار گرفتند. این بررسی شامل ثبت‌های موجود، اندازه‌گیری دودکش‌های خروجی، وضعیت آلودگی و غیره بود که توسط مدل $AERMOD$ ، وضعیت انتشار ذرات معلق و مناطق تحت تأثیر آلودگی تعیین شد و همچنین تعیین اثرات بهداشتی ناشی از انتشار آلودگی در مناطق با استفاده از مدل $AIRQ+$ انجام گردید. در ادامه، بر اساس شهرهای تعیین شده و جمعیت در معرض، میزان پیامدهای بهداشتی تعیین شد.

• توزیع مکانی آلودگی



نتایج توزیع حاصل از مدل آلودگی هوا نشان داد که بیشینه آلودگی ذرات معلق در سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۹ به‌ترتیب برابر با ۱۷۰۵، ۱۵۰۱، ۲۳۰۳، ۳۷ و ۴۱۰۱۴ میکروگرم بر مترمکعب بوده است. برای تعیین جمعیت در معرض آلاینده‌های ذرات معلق ناشی از نیروگاه‌های مورد مطالعه، در این بخش، جمعیت بین سنین ۱ تا ۷۵ سال در مناطق با روی هم‌گذاری لایه‌های خروجی مدل AERMOD و لایه‌های جمعیت محاسبه شد. روش استفاده‌شده در این بخش، تحلیل اشتراک (Intersect) در نرم‌افزار ArcGIS است که اشتراک هندسی ویژگی‌های ورودی را محاسبه می‌کند. ویژگی‌ها یا بخش‌هایی از ویژگی‌ها که در همه لایه‌ها یا کلاس‌های ویژگی همپوشانی دارند، در کلاس ویژگی خروجی نوشته می‌شوند.



شکل ۴: نقشه‌های خروجی همپوشانی (اشتراک) آلودگی و جمعیت ناشی از نیروگاه‌ها (۱۳۹۴-۱۳۹۸)

نتایج حاصل از بررسی نقشه‌های خروجی مدل آلودگی هوا و جمعیت در تهران در سال‌های ۱۳۹۴ تا ۱۳۹۸ نشان می‌دهد که گروه‌های سنی در معرض آلودگی هوا در محدوده سنی ۳۰ تا ۳۵ سال در ۲۲ منطقه شهرداری تهران قرار داشته‌اند.

• ارزیابی اثرات بهداشتی با استفاده از: AirQ+

برای آلاینده ذرات معلق (PM)، پارامترهای موردنیاز نرم‌افزار (صدک ۹۸ سالانه) به‌دست آمد و غلظت‌ها در دسته‌های ۱۰ میکروگرم بر مترمکعب، متناظر با دسته‌های مواجهه معادل، ثبت شدند. برای داده‌های PM به‌صورت میانگین سالانه. مواجهه با در نظر گرفتن شهر تهران به‌عنوان یک مجموعه واحد، با جمعیت ساکن سال‌های ۱۳۹۴ تا ۱۳۹۸ برآورد شد. نرم‌افزار فرض می‌کند که غلظت‌های اندازه‌گیری‌شده معرف میانگین مواجهه افراد است. مرگ‌ومیرهای زود هنگام ناشی از علل طبیعی قابل‌انتساب به PM به‌ازای هر ۱۰۰۰۰۰ جمعیت در معرض خطر (سنین ۳۰ سال و بالاتر) در تهران. مقادیر در ستون‌ها میانگین و فاصله اطمینان ۹۵٪ برآوردهای AirQ+ در مناطق تهران هستند.

جدول ۲: خطر نسبی (RR) با فواصل اطمینان (۹۵٪ CI) و مرجع مربوطه

سال	جمعیت در معرض آلاینده	قرار گرفتن در معرض PM			RR
		درصد نسبت قابل انتساب برآوردی	تعداد موارد قابل انتساب برآوردی	تعداد موارد قابل انتساب برآوردی به ازای هر ۱۰۰,۰۰۰ جمعیت در معرض خطر	
۱۳۹۴	۷۹۲۳۱۶	۴/۴۱ (۲/۹-۵/۸)	۱۸۴۵	۲۳/۲۹	۱/۰۴۶ (۱/۰۲۹-۱/۰۶۱)
۱۳۹۵	۹۰۰۶۴۱۶	۳/۰۲ (۱/۹۸-۳/۹۸)	۱۳۳۶	۱۴/۸۳	۱/۰۳۱ (۱/۰۲-۱/۰۴۱)
۱۳۹۶	۸۸۶۳۳۶۲	۸/۶۳ (۵/۷۱-۱۱/۲۷)	۳۹۵۴	۴۴/۶۱	۱/۰۹۴ (۱/۰۶-۱/۱۲)
۱۳۹۷	۹۴۲۴۷۲۶	۱۳/۹۶ (۹/۳۴-۱۸/۰۷)	۶۴۳۵	۶۸/۲۸	۱/۱۶ (۱/۱۰-۱/۲۲)
۱۳۹۸	۱۰۰۳۶۲۴۳	۱۷/۰۱ (۱۱/۴۵-۲۱/۹)	۸۱۹۴	۸۱/۶۶	۱/۲ (۱/۱۳-۱/۲۸)

جدول شماره ۳ مرگ و میرهای منتسب به بیماری‌های ناشی از اثرات ذرات معلق (PM) را ارائه می‌دهد و همچنین میزان بروز پایه و RR (با فاصله اطمینان ۹۵٪) به ازای هر ۱۰ میکروگرم بر مترمکعب را در سال‌های ۱۳۹۴ تا ۱۳۹۸ نشان می‌دهد.

جدول ۳: برآورد تعداد مرگ و میر/بیماری‌ها ناشی از اثرات آلاینده

مرگ/ بیماری ناشی از												
سرطان ریه		عفونت حاد تنفسی ¹ تحتانی		بیماری مزمن ² انسدادی ریه		تومور سرطانی ³		بیماری ایسکمیک قلبی ⁴		سکته مغزی ⁵		
سال	موارد برآوردی به‌ازای هر ۱۰۰,۰۰۰ جمعیت در معرض خطر	RR	موارد برآوردی به‌ازای هر ۱۰۰,۰۰۰ جمعیت در معرض خطر	RR	موارد برآوردی به‌ازای هر ۱۰۰,۰۰۰ جمعیت در معرض خطر	RR	موارد برآوردی به‌ازای هر ۱۰۰,۰۰۰ جمعیت در معرض خطر	RR	موارد برآوردی به‌ازای هر ۱۰۰,۰۰۰ جمعیت در معرض خطر	RR	موارد برآوردی به‌ازای هر ۱۰۰,۰۰۰ جمعیت در معرض خطر	RR
۱۳۹۴	۳۳/۰۵	۱/۰۷	۳۵۲۸	۱/۰۸	۳۳/۸۷	۱/۰۷	۲۵/۹۷	۱/۰۵	۴۱/۶۴	۱/۰۹	۳۴/۳۳	۱/۰۷
۱۳۹۵	۲۱/۱۱	۱/۰۴	۲۵/۶۴	۱/۰۶	۲۲/۹۱	۱/۰۵	۱۷/۱۵	۱/۰۴	۲۸/۸۷	۱/۰۶	۲۳/۴۹	۱/۰۵
۱۳۹۶	۶۲/۶۹	۱/۱۴	۶۶/۱۳	۱/۱۴	۵۶/۳۶	۱/۱۹	۴۵/۵۶	۱/۱	۶۵/۴۵	۱/۱۴	۵۵/۶۸	۱/۱۲
۱۳۹۷	۹۴/۷۸	۱/۲۴	۹۰/۶۹	۱/۲۳	۷۵/۷۸	۱/۱۸	۶۴/۱۴	۱/۱۵	۸۳/۶۴	۱/۲۰	۷۳/۲۵	۱/۱۸
۱۳۹۸	۱۱۲/۵۳	۱/۳۱	۱۰۲/۷۶	۱/۲۷	۸۵/۳۹	۱/۲۱	۷۳/۷۶	۱/۱۸	۹۲/۰۸	۱/۲۴	۸۱/۷۳	۱/۲۰

^۱ Acute lower respiratory infection^۲ Chronic obstructive pulmonary disease^۳ Leptomeningeal carcinomatosis^۴ ischemic heart disease^۵ brain attack

۴- بحث و نتیجه گیری

این مقاله یک مطالعه موردی با استفاده از رویکرد سازمان بهداشت جهانی برای ارزیابی تأثیر آلودگی نیروگاه‌ها بر سلامت انسان برای ساکنان تهران، یکی از پرجمعیت‌ترین مناطق جهان که ویژگی‌های جغرافیایی آن کیفیت هوا را در میان بدترین‌ها در جهان قرار داده است، ارائه می‌دهد. بر اساس داده‌های جمعیتی، تعداد موارد منتسب به آلاینده در طول ۵ سال مطالعه روند افزایشی دارد و رابطه مستقیمی بین افزایش انتشار و نوع مصرف سوخت وجود دارد. تعداد برآوردی موارد قابل‌انتساب در سال ۱۳۹۸ برابر با ۸۱۹۴ و تعداد برآوردی موارد قابل‌انتساب به‌ازای هر ۱۰۰۰۰۰ جمعیت در معرض خطر برابر با ۸۱۰۶۶ بوده است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که در سال‌های اخیر، به‌دلیل افزایش مصرف انرژی و کمبود سوخت پاک و مصرف بالای سوخت فسیلی، انتشار ذرات معلق بالا بوده و موارد مرگ منتسب به این آلاینده نیز روند صعودی داشته است. از نرم‌افزار AirQ+ برای برآورد RR استفاده شد زیرا میزان ارتباط بین مواجهه و بیماری را منعکس می‌کند RR. ناشی از مواجهه با آلاینده‌های ذرات معلق از نیروگاه‌های تهران در میان شهرهای مورد بررسی بالاترین است. بیشترین مقدار در سال ۱۳۹۸ با $RR=1.2$ (فاصله اطمینان ۹۵٪: ۱۰۲۸-۱۰۱۳) بود. با این حال، کمترین RR مربوط به سال ۱۳۹۴ با مقدار $RR=1.046$ (فاصله اطمینان ۹۵٪: ۱۰۰۶۱-۱۰۰۲۹) بود. این مقادیر RR قابل‌توجه هستند و باید توسط تصمیم‌گیرندگان برای کاهش آلودگی هوا اقداماتی صورت گیرد. بر اساس نتایج مدل AirQ+، می‌توان مشاهده کرد که برآورد موارد منتسب به بیماری‌ها از سال ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۹ افزایش یافته و با افزایش انتشار آلاینده‌ها رابطه مستقیم دارد. از سوی دیگر، سرطان ریه با حدود ۱۱۲۰۵۳ ($RR=1.31$) با فاصله اطمینان ۹۵٪ در سال ۱۳۹۸ در مقایسه با سایر موارد، بیشترین میزان را دارد. مقدار برآورده شده منتسب به بیماری‌ها در ۱۰۰۰۰۰ نفر نشان می‌دهد که سرطان ریه در رتبه اول و عفونت حاد تنفسی تحتانی (ALRI) با حدود ۱۰۲۰۷۶ ($RR=1.27$) با فاصله اطمینان ۹۵٪ در مرحله دوم قرار دارند. کمترین میزان مربوط به LC در سال ۲۰۱۹ در محدوده ۷۶۰۷۶ ($RR=1.18$) با فاصله اطمینان ۹۵٪ بود. این یافته با مطالعه Kuan (2020) Ken همخوانی دارد که در آن ۴۷۶ مطالعه از ۱۲۳ کشور نشان داد آلودگی هوای داخل منزل با آسم $RR=1.23$ ، ۹۵٪ CI: 1.11-1.36) ارتباط مثبت دارد. مطالعه دیگری توسط Khomenko (2021) نشان داد که رعایت دستورالعمل‌های WHO می‌تواند از ۵۱۰۲۱۳ مرگ (۹۵٪ CI: 34,036-68,682) در سال برای مواجهه با $PM_{2.5}$ جلوگیری کند. همچنین مطالعه Hadei (2020) نشان داد که آلودگی ذرات معلق عامل خطر اصلی برای بیماری ایسکمیک قلبی و سکته مغزی است و مرگ‌ومیر زود هنگام ناشی از این بیماری‌ها را در ۱۰ شهر ایران برآورد کرد. بررسی نتایج بیماری‌های منتسب به آلاینده‌های ذرات معلق از نیروگاه‌ها در ۵ سال مورد مطالعه نشان می‌دهد که مقادیر در سال ۱۳۹۵ نسبت به سایر سال‌ها کمتر بوده است که نشان‌دهنده کاهش انتشار آلاینده‌ها به‌دلیل تغییر در نوع سوخت مصرفی در نیروگاه‌های شهر تهران و اعمال دستورات اصلاح سوخت به سوخت پاک از سوی سازمان حفاظت محیط زیست است. در نتیجه گیری نهایی، این مطالعه از نرم‌افزار AirQ+ و رویکرد پیشنهادی سازمان بهداشت جهانی برای ارائه داده‌های کمی در مورد تأثیر ذرات معلق (PM) بر سلامت افراد ساکن در یک منطقه خاص استفاده کرد. نتایج با سایر تحقیقات همخوانی دارد و علی‌رغم محدودیت‌هایی که با مطالعات مشابه مشترک است، نشان می‌دهد که این روش ابزاری مؤثر و آسان را ارائه می‌دهد که در تصمیم‌گیری مفید است. وسعت اثرات بهداشتی برآورد شده برای شهر تهران، ضرورت اقدام فوری برای کاهش بار بیماری‌های ناشی از آلودگی هوا را نشان می‌دهد. مقامات محلی از طریق سیاست‌هایی که عمدتاً با هدف کاهش انتشار از نیروگاه‌ها تدوین می‌شوند، می‌توانند به دستاوردهای قابل‌توجهی در حوزه سلامت دست یابند. این مطالعه با تلفیق مدل پراکندگی ذرات معلق ناشی از نیروگاه‌ها و لایه‌های جمعیتی در محیط GIS و واردسازی داده‌ها در نرم‌افزار AirQ+، رویکردی نوین برای برآورد کمی اثرات بهداشتی آلودگی هوا ارائه می‌دهد. نوآوری پژوهش در روی هم‌گذاری مستقیم لایه‌های آلودگی و جمعیت در بازه ۵ ساله است که امکان تعیین دقیق جمعیت در معرض و نسبت‌دهی پیامدهای سلامتی را فراهم می‌کند. نتایج، همسو با مطالعات پیشین، بار قابل توجه بیماری‌های ناشی از PM را در شهر تهران نشان می‌دهد و بر ضرورت اقدام فوری سیاست‌گذاران محلی برای کاهش انتشار از نیروگاه‌ها تأکید دارد. این روش، ابزاری مؤثر، آسان و قابل استفاده در تصمیم‌گیری مدیریتی برای تحلیل وضعیت موجود و پیش‌بینی اثرات مداخلات ارائه می‌دهد.

۵- محدودیت های مطالعه

- فرض یکنواختی غلظت PM در کل سطح هر منطقه، در حالی که تنوع مکانی قابل‌توجه وجود دارد.
 - استفاده از داده‌های انتشار بر اساس اندازه‌گیری‌های مقطعی و نه پایش پیوسته.
 - عدم لحاظ سایر منابع آلاینده (ترافیک، صنایع) که ممکن است برآورد میزان اثرات را تغییر دهد.
 - استفاده از مقادیر پیش‌فرض WHO برای BI و RR که ممکن است با جمعیت ایران تفاوت داشته باشد
- با وجود این محدودیت‌ها، رویکرد تلفیقی به‌کاررفته در این مطالعه، نخستین کمی‌سازی اختصاصی اثرات نیروگاه‌های تهران با تفکیک مکانی و زمانی است و می‌تواند مبنایی برای تحلیل‌های هزینه-فایده و اولویت‌بندی اقدامات کنترلی قرار گیرد.

۶- تعارض منافع

نویسندگان مقاله حاضر اعلام می‌دارند که هیچ گونه منافع مالی رقابتی یا روابط شخصی شناخته‌شده‌ای که بتواند بر کار گزارش‌شده در این مقاله تأثیر بگذارد، ندارند.

۷- قدردانی

نویسندگان از سازمان حفاظت محیط زیست ایران و دفتر برنامه‌ریزی انرژی وزارت نیرو به‌خاطر ارائه داده‌های انتشار و هواشناسی، و همچنین از مرکز آمار ایران برای در اختیار گذاشتن داده‌های جمعیتی، صمیمانه سپاسگزاری می‌کنند.

۸- منابع و مراجع

- Asl, F.B., Leili, M., Vaziri, Y., Arian, S.S., Cristaldi, A., Conti, G.O., Ferrante, M., 2018. Health impacts quantification of ambient air pollutants using AirQ model approach in Hamadan, Iran. *Environ. Res.* 161, 114–121
- Brito, J., Bernardo, A., Goncalves, L., L., 2022. Atmospheric pollution and mortality in Portugal: Quantitative assessment of the environmental burden of disease using the AirQ+ model, *Science of the Total Environment*, 815, 152964
- Cimorelli, A. J., Perry, S. G., Venkatram, A., Weil, J. C., Paine, R. J., Wilson, R. B., Lee, R. F., Peters, W. D., Brode, R. W., Paumier, J. O., (2004), “AERMOD: description of model formulation”. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards, Emissions Monitoring and Analysis Division, Research Triangle Park, North Carolina, EPA-454/R-03-004, 91 pp
- EEA, 2019. Report No 10/2019, Air quality in Europe—2019 report -European Environment Agency. <https://doi.org/10.2800/822355> Accessed: 4.4.21
- Fallahizadeh, S., Kermani, M., Israeli, A., Asadgol, Z., Gholami, M., 2021, The effects of meteorological parameters on PM₁₀: Health impacts assessment using AirQ+ model and prediction by an artificial neural network (ANN), *Urban Climate* 38 (2021) 100905
- Fattore, E., Paiano, V., Borgini, A., Tittarelli, A., Bertoldi, M., Crosignani, P., Fanelli, R., 2011. Human health risk regarding air quality in two municipalities in an industrialized area of northern Italy. *Environ. Res.* 111, 1321–1327.
- Ghosikali, Mohammad Ghanbari, Mosaferi, Mohammad, Hossein Safari, Gholam Jaafari, Jalil, 2016. Effect of exposure to O₃, NO₂, and SO₂ on chronic obstructive pulmonary disease hospitalizations in Tabriz, Iran. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 22 (4), 2817e2823.
- Guerreiro, C., Gonzalez Ortiz, A., de Leeuw, F., Viana, M., Colette, A., 2018. European environment agency. In: Air quality in Europe—2018 report.
- Hadei, M., Hashemi Nazari, S.S., Eslami, A., Khosravi, A., Yarahmadi, M., Naghdali, Z., Shhsavandi, A., 2022, Distribution & number of ischemic heart disease (IHD) & stroke deaths due to chronic exposure to PM_{2.5} in 10 cities of IRAN (2013-2015); AIRQ+ modeling, *Journal of Air Pollution and Health* (Summer 2017); 2(3): 129-136
- Hadei, M., Hopke, P.K., Nazari, S.S.H., Yarahmadi, M., Shhsavani, A., Alipour, M.R., 2017. Estimation of mortality and hospital admissions attributed to criteria air pollutants in Tehran metropolis, Iran (2013-2016). *Aerosol Air Qual. Res.* 17, 2474–2481.
- Haniabadi, Y.O., Daryanoosh, S.M., Hopke, P.K., Ferrante, M., De Marco, A., Sicard, P., Conti, G.O., Goudarzi, G., Basiri, H., Mohammadi, M.J., 2017a. Acute myocardial infarction and COPD attributed to ambient SO₂ in Iran. *Environ. Res.* 156, 683–687
- Jalili naghan, D., Neisi, A., Goudarzi, G., Dasoorpoor, M., Fadaei, A., Ahmad Angali, K., 2022, Estimation of the effects PM_{2.5}, NO₂, O₃ pollutants on the health of Shahrekord residents based on AirQ+ software during (2012–2018), *Toxicology Reports* 9, 842–847
- Kermani, M., Fallah, Jordan, S., Aghaei, M., Dolati, Mohsen, 2015, Estimation of the Number of Mortality Due to Cardiovascular and Respiratory Diseases, Attributed to Pollutants O₃, and NO₂ in the Air of Tehran, *Journal of Health Research in Community*, Volume 1, Issue 4, (in Persian)
- Khaefi, M., Geravandi, S., Hassani, G., Yari, A.R., Soltani, F., Dobaradaran, S., Moogahi, S., Mohammadi, M.J., Mahboubi, M., Alavi, N., 2016. Association of particulate matter impact on the prevalence of chronic obstructive pulmonary disease in Ahvaz, Southwest Iran during 2009-2013. *Aerosol Air Qual. Res.* 17, 230–237
- Khaniabadi, Y.O., Fanelli, R., De Marco, A., Daryanoosh, S.M., Kloog, I., Hopke, P.K., Conti, G.O., Ferrante, M., Mohammadi, M.J., Babaei, A.A., 2017b. Hospital admissions in Iran for cardiovascular

- and respiratory diseases attributed to the middle eastern dust storms. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 24, 16860–16868
- Khaniabadi, Y.O., Goudarzi, G., Daryanoosh, S.M., Borgini, A., Tittarelli, A., De Marco, A., 2017c. Exposure to PM₁₀, NO₂, and O₃ and impacts on human health. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 24, 2781–2789
 - Khaniabadi, Y.O., Polosa, R., Chuturkova, R.Z., Daryanoosh, M., Goudarzi, G., Borgini, A., Tittarelli, A., Basiri, H., Armin, H., Nourmoradi, H., 2017d. Human health risk assessment due to ambient PM₁₀ and SO₂ by an air quality modeling technique. *Process. Saf. Environ. Prot.* 111, 346–354.
 - Khomenko, S, Cirach, M, Pereira-Barboza, E, Mueller, N, Barrera-Gomez, J, Rojas-Rueda, D, 2021, Premature mortality due to air pollution in European cities: a health impact assessment, *Lancet Planet Health* 2021; 5: e121–34
 - kuan ken L, Bing, R, Kiang, J, Bashir, S, Spath, N, Stelale, D, Mortimer, K, Bularga, A, Doudesis, D, Joshi, S.S, Strachan, F, Gumy, S, Rohani, H, A, 2020, Adverse health effects associated with household air pollution: a systematic review, meta-analysis, and burden estimation study, *Lancet Glob Health*; 8: e1427–34
 - Omid Khaniabadi, Y., Sicard, P., Omid Khaniabadi, A., Mohammadinejad, S., Keishams, F., Takdastan, A., Najafi, A., De Marco, A., Daryanoosh, M., 2019. Air quality modeling for health risk assessment of ambient PM₁₀, PM_{2.5} and SO₂ in Iran. *Human Ecol. Risk Assess.* 25, 1298–131
 - Omid, Y., Goudarzi, G., Heidari, A.M., Daryanoosh, S.M., 2016. Health impact assessment of short-term exposure to NO₂ in Kermanshah Iran using AirQ model. *Environ. Health Eng. Manag* 3 (2), 91–97
 - WHO, 2016. World Health Statistics 2016: Monitoring Health for the SDGs Sustainable Development Goals. World Health Organization.
 - Yunesian, M, Rostami, R, Zarei, A, Fazlzadeh, M, Janjani, H, 2019, Exposure to high levels of PM_{2.5} and PM₁₀ in the metropolis of Tehran and the associated health risks during 2016–2017, *Microchemical Journal* Volume 150, 104174